

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

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(101)/2019

4(101)/2019

PEER REVIEWED JOURNAL

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE 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., Professor, Saint-Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Board

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

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

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

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

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

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

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

V. Khimenko

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

G. Maltsev

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

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

Y. Podoplyokin

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

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

A. Shalyto

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

A. Shepeta

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

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

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

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

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

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Y. Umnitina**Layout and composition:** Y. Umnitina**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

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

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

Tel.: +7 - 812 494 70 02

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS**Tsilika K. D.** *An exact solution method for Fredholm integro-differential equations* 2**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Kostygov D. V., Tolmaheva M. V.** *Fault-tolerant and energy-efficient MCSoc for information processing and control* 9**Shilov N. G.** *Personalization of information delivery through digital signage: major requirements and methodology* 19**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Britov G. S., Mironovskiy L. A.** *Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems* 29**Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G.** *Controlled microrobot for moving in human vessels* 38**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Markovnikov N. M., Kipyatkova I. S.** *Encoder-decoder models for recognition of Russian speech* 45**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Ponomarenko V. I., Navrotskaya E. V., Kul'minskii D. D., Prokhorov M. D.** *Estimation of confidentiality of a communication system based on chaotic time-delay generator with switchable delay time* 54**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V.** *Analysis of frequency resource for FHSS mode* 62**SYSTEM ANALYSIS****Gorbunova A. V., Medvedeva E. G., Gaidamaka Yu. V., Shorgin V. S., Samouylov K. E.** *Effective user service strategies in a multi-user MIMO system* 69**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 82Submitted for publication 01.07.19. Passed for printing 22.08.19. Format 60x84_{1/8}.
Phototype SchoolBookC. Digital printing.Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, RussiaThe 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 «Pressa Rossii» catalogue.
№ 15385 — semiannual subscript.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, 2019

4(101)/2019

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

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

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

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

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

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

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

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА*Tsilika K. D. An exact solution method for Fredholm integro-differential equations*

2

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ*Грузликов А. М., Колесов Н. В., Костыгов Д. В., Толмачева М. В. Отказоустойчивая и энергоэффективная система обработки информации и управления на кристалле*

9

Шилов Н. Г. Персонализация предоставления информации на электронных табл: основные требования и методология

19

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ*Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем*

29

Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г. Управляемый микробот для перемещения в сосудах человека

38

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ*Марковников Н. М., Кипяткова И. С. Исследование методов построения моделей кодер-декодер для распознавания русской речи*

45

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ*Пономаренко В. И., Навроцкая Е. В., Кульминский Д. Д., Прохоров М. Д. Оценка конфиденциальности системы передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием и переключаемым временем задержки*

54

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ*Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты*

62

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ*Горбунова А. В., Медведева Е. Г., Гайдамака Ю. В., Шоргин В. С., Самуйлов К. Е. Эффективные стратегии обслуживания пользователей в многопользовательской системе MIMO*

69

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

82

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

Сдано в набор 01.07.19. Подписано в печать 22.08.19. Формат 60×84/8. Гарнитура SchoolBookS. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10, 1. Уч.-изд. л. 13,9. Тираж 1000 экз (1-й завод 67 экз.). Заказ № 307.

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 в любом отделении связи по каталогу «Пресса России»: № 15385 — полугодовой индекс.

An exact solution method for Fredholm integro-differential equations

K. D. Tsilika^a, PhD, Assistant Professor, orcid.org/0000-0002-9213-3120, ktsilika@uth.gr

^aLaboratory of Operations Research, Department of Economics, University of Thessaly, Volos, 38221, Greece

Introduction: Linear boundary value problems for Fredholm ordinary integro-differential equations are seldom considered with integral boundary conditions in the literature. In our case, integro-differential equations are subject to multipoint or nonlocal integral boundary conditions. It should be noted that finding exact solutions even for multipoint problems or problems with nonlocal integral boundary conditions with a differential equation is a difficult task. **Purpose:** Finding the uniqueness and existence criterion of solutions for Fredholm ordinary integro-differential equations with multipoint or nonlocal integral boundary conditions and obtaining exact solutions in closed form of such problems. **Results:** Within the class of abstract operator equations, for the special case of Fredholm integro-differential equations with multipoint or nonlocal integral boundary conditions, a criterion for the existence and uniqueness of an exact solution is proved and the analytical representation of the solution is given. A direct method analytically solving such problems is proposed, in which all calculations are reproducible in any program of symbolic calculations. If the user sets the input parameters and the initial conditions of the problem, the computer codes check the conditions of existence and uniqueness and of solution generate the analytical solution. The stages of the solution method are illustrated by two examples. The article uses computer algebra system Mathematica to demonstrate the results.

Keywords — boundary value problems, ordinary differential equations, Fredholm integro-differential equations, multipoint boundary conditions, nonlocal integral boundary conditions, correct operators, exact solutions.

For citation: Tsilika K. D. An exact solution method for Fredholm integro-differential equations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-2-8

Introduction

Consider the boundary value problem of the type

$$Bu = Au - \mathbf{gF}(Au) = f, D(B) = \{u \in D(A): \Phi(u) = \mathbf{N}\Psi(u)\}, u \in X, f \in Y, \quad (1)$$

where A is an ordinary differential operator; $\mathbf{F}(Au) = \text{col}(F_1(Au), \dots, F_n(Au))$ is a functional vector representing the integral part of the integro-differential equation; $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_n)$ is a vector; \mathbf{N} — a constant $m \times l$ matrix; $\Phi = \text{col}(\Phi_1, \dots, \Phi_m)$; $\Psi = \text{col}(\Psi_1, \dots, \Psi_l)$ are functional vectors with $\Psi(u)$ standing for the multipoint or integral part of the boundary conditions.

Note that problem (1) describes the particular case of the multipoint boundary value problem with integro-differential equation (IDE) (see [1]) given below

$$u^{(m)}(x) + \sum_{i=1}^m p_i(x)u^{(m-i)}(x) + \sum_{i=0}^m \int_a^b K_i(x, y)u^{(m-i)}(y)dy = f(x); \sum_{j=0}^{v+1} \sum_{i=1}^m a_{kij}u^{(i-1)}(x_j) + (u, \varphi_k) = 0, k = 1, \dots, s, (a = x_0 < x_1 < \dots < x_{v+1} = b), \quad (2)$$

where (u, φ_k) is an integral part of the boundary conditions. IDEs like (2) are investigated also in [2]. In [1, 2] the existence theorem for (2) has been proved. This problem is reduced to problem (1) if

$$s = m, v = 0, K_i(x, y) = g(x)h(y)p_i(y), i = 0, 1, \dots, m, p_0(x) = 1 \text{ and } \|a_{kij}\|_{k,i=1}^m = \mathbf{I}_m.$$

Indeed, then we can take

$$Au = u^{(m)}(x) + \sum_{i=1}^m p_i(x)u^{(m-i)}(x); \Phi_i(u) = u^{(i-1)}(x_0), i = 1, \dots, m, \Psi_{i(u)} = \begin{cases} u^{(i-1)}(x), i = 1, \dots, m \\ (u, \varphi_{i-m}), i = m + 1, \dots, 2m \end{cases},$$

$$\mathbf{F}(Au) = \int_a^b h(y) \left[u^{(m)}(y) + \sum_{i=1}^m p_i(y)u^{(m-i)}(y) \right] dy \text{ and}$$

$$\mathbf{N} = -\|a_{kij}\|_{k,i=1}^m, \delta_{ki} \text{ is a Kronecker delta function.}$$

In this paper, we study the solvability of problem (1) and analytically construct its solution. The present work lies in the field of boundary value problem for linear integral equations [3, 4]. In this setting, problems are often too complex to be solved analytically and therefore numerical solutions are proposed [5, 6]. Analytical solutions of a class of boundary value problems, involving the governing differential equation or slight generalizations of the one considered in (1), but with different and/or simpler differential operators, have been proposed in [7–10]. Existence theorems for nonlocal multipoint boundary value problem and IDEs via analytical methods are given in [11–13]. Boundary value problems $B: X \rightarrow X$ of the type of (1) for the specific case of $l = n$

have been studied by Vassiliev, Parasidis, Providas in [14, 15], using the extension method. The extension method is a generalization of the direct method, which is presented in [4]. Here, problem (1) is investigated and solved for the case $l \neq n$, $X \neq Y$ mainly by functional transformations and by employing the properties of linear operators. The results of this method coincide with the results of [14, 15] for $l = n$.

The novelties of the present paper are the following. First we address the local boundary value problem of the type of (1) without restrictions to the dimensions l, n, m ; second, we assume multipoint or nonlocal integral boundary conditions, which allows us to consider a very large class of problems for the equation (1). The ultimate result is the exact solution of problem (1).

We describe now the setting of our approach. Let X, Y be complex Banach spaces and X^* the adjoint space of X , i. e. the set of all complex-valued linear and bounded functionals on X . We denote by $f(x)$ the value of f on x . $D(A)$ and $R(A)$ are, respectively, the domain and the range of the operator A . The following definitions are extremely important in the analysis of the next section.

Definition 1. An operator A_2 is said to be an extension of an operator A_1 , or A_1 is said to be a restriction of A_2 , in symbol $A_1 \subset A_2$, if $D(A_2) \supset D(A_1)$ and $A_1x = A_2x$, for all $x \in D(A_1)$.

Definition 2. An operator $A: X \rightarrow Y$ is called closed if for every sequence $x_n \in D(A)$ converging to x_0 with $Ax_n \rightarrow f_0$ follows that $x_0 \in D(A)$ and $Ax_0 = f_0$.

Definition 3. A closed operator A is called maximal if $R(A) = Y$ and $\ker A \neq 0$.

Definition 4. An operator $\hat{A}: X \rightarrow Y$ is called correct if $R(\hat{A}) = Y$ and the inverse \hat{A}^{-1} exists and is continuous on Y .

Definition 5. An operator \hat{A} is called a correct restriction of the maximal operator A if it is a correct operator and $\hat{A} \subset A$.

Basic notations. If $\Psi_i \in X^*$, $i = 1, \dots, l$, then we consider the functional vectors $\Psi = \text{col}(\Psi_1, \dots, \Psi_l)$ and $\Psi(x) = \text{col}(\Psi_1(x), \dots, \Psi_l(x))$. Let $g = (g_1, \dots, g_n)$ be a vector of X^n . Hereafter we will denote by $\Psi(g)$ the $l \times n$ matrix whose i, j -th entry $\Psi_i(g_j)$ is the value of functional Ψ_i on element g_j . Note that $\Psi(gC) = \Psi(g)C$, where C is a $n \times k$ constant matrix. We will also denote by I_n the identity $n \times n$. By 0 we will denote the zero column vector. We will denote by $\ker A$ the kernel of an operator A .

Exact solution method for Fredholm IDEs

Suppose that $A: X \rightarrow X$ is an ordinary m -order differential operator

$$Au(x) = a_0u^{(m)}(x) + a_1u^{(m-1)}(x) + \dots + a_mu(x), \quad a_i \in R, \quad (3)$$

$X = C[a, b]$ or $X = L_p(a, b)$, $p \geq 1$, $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ a basis of $\ker A$ and \hat{A} be a correct restriction of A defined by

$$\hat{A} \subset A, \quad D(\hat{A}) = \{u \in D(A) : \Phi(u) = 0\}, \quad (4)$$

where the components of the functional vector $\Phi = \text{col}(\Phi_1, \dots, \Phi_m)$, belong to $[X_A^m]^*$ and are biorthogonal to z_1, \dots, z_m . Everywhere below we denote by $X_A^m = C^m[a, b]$ if $X = C[a, b]$, or $X_A^m = W_p^m(a, b)$ if $X = L_p(a, b)$ and by $[X_A^m]^*$ we denote the adjoint to X_A^m space, i. e. the space of all linear bounded functionals defined on X_A^m . It is a well-known fact that the operator $\hat{A}: C[a, b] \rightarrow C[a, b]$ defined by

$$\begin{aligned} \hat{A}u(x) &= a_0u^{(m)}(x) + a_1u^{(m-1)}(x) + \dots + a_mu(x) = f, \\ a_i &\in R, \quad x \in [a, b], \\ D(\hat{A}) &= \\ &= \left\{ u(x) \in C^m[a, b] : u(a) = u'(a) = \dots = u^{(m-1)}(a) = 0 \right\}, \\ a_0 &\neq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

is a correct restriction of A and the unique solution of (5) for $a_0 = 1, a_1 = \dots = a_m = 0, a = 0$ is

$$\begin{aligned} u(x) &= \hat{A}^{-1}f(x) = \frac{1}{(m-1)!} \int_a^x (x-t)^{m-1} f(t) dt, \\ f(x) &\in C[0, b]. \end{aligned} \quad (6)$$

Before we address the issue of finding the exact analytic solutions of the Fredholm IDE, we will mention briefly some properties of the linear operators of these equations.

Lemma 1. Let A be a differential operator defined by (3), $z = (z_1, \dots, z_m)$ a basis of $\ker A$, N a $m \times l$ matrix with constant elements, the components of a vector $\Psi = \text{col}(\Psi_1, \dots, \Psi_l)$ be functionals on X_A^m , the matrix $V = I_l - \Psi(z)N$ and the operator $C: X_A^m \rightarrow X_A^m$ be defined by

$$Cu = u - zN\Psi(u).$$

Then:

- (i) The operator C is invertible if and only if $\det V \neq 0$;
- (ii) the inverse operator $C^{-1}v = v + zNV^{-1}\Psi(v)$.

Proof: Let $\det V \neq 0$ and $u \in \ker C$. Then $u - zN\Psi(u) = 0$ and $\Psi(u - zN\Psi(u)) = 0$, $\Psi(u) - \Psi(z)N\Psi(u) = 0$, $[I_l - \Psi(z)N]\Psi(u) = 0$. From the last equation since $\det V \neq 0$ follows that $\Psi(u) = 0$. Substituting this value into $u - zN\Psi(u) = 0$ we get $u = 0$. Consequently, $\ker C = \{0\}$ and C is invertible.

Conversely, let $\det V = 0$. Then there exists a vector $c \neq 0$ such that $Vc = 0$.

Consider the element $u_0 = zNc$. Note that $u_0 \neq 0$, otherwise the linear independence of the components of the vector z implies $Nc = 0$ and then $Vc = [I_l - \Psi(z)N]c = c - \Psi(z)Nc = c - 0 = c \neq 0$. This contradicts the hypothesis that $c \neq 0$. So, $u_0 \neq 0$. We will show that $u_0 \in \ker C$. Observe that $Cu_0 = u_0 - zN\Psi(u_0) = zNc - zN\Psi(z)Nc = zN[I_l - \Psi(z)N]c = zNVc = zN0 = 0$. Thus $u_0 \in \ker C$ and $\ker C \neq \{0\}$. Hence C is not invertible. So C is invertible if and only if $\det V \neq 0$. Let $Cu = v$, i. e. $u - zN\Psi(u) = v$. Then $\Psi(u) - \Psi(z)N\Psi(u) = \Psi(v)$, or $[I_l - \Psi(z)N]\Psi(u) = \Psi(v)$, which implies $\Psi(u) = V^{-1}\Psi(v)$. From the last equation and $u - zN\Psi(u) = v$ follows that $u = v + zNV^{-1}\Psi(v)$, which yields $u = C^{-1}v$. The lemma is proved.

The next theorem is analogous to theorem which has been proved in [8] when F_1, \dots, F_n are linearly independent. This theorem is already proved for the linearly independent set g_1, \dots, g_n , though using a different method. In addition, it is proved here that the criterion for correctness of the operator B in [8] coincides with the criterion for injectivity of B .

Theorem 1. Let X, Y be complex Banach spaces, $\hat{A}: X \rightarrow Y$ be a correct linear operator, the functional vector $F = \text{col}(F_1, \dots, F_n) \in [Y^*]^n$, a vector $g = (g_1, \dots, g_n) \in Y^n$ and g_1, \dots, g_n is a linearly independent set. Then:

(i) The operator B defined by

$$Bu = \hat{A}u - gF(\hat{A}u) = f, \quad D(B) = D(\hat{A}), \quad f \in Y \quad (7)$$

is injective if and only if

$$\det W = \det[I_n - F(g)] \neq 0. \quad (8)$$

(ii) If B is injective, then B is correct and the unique solution of (7) is given by

$$u = B^{-1}f = \hat{A}^{-1}f + (\hat{A}^{-1}g)[I_n - F(g)]^{-1}F(f), \quad f \in Y. \quad (9)$$

Proof: (i) Let $\det W = 0$ and $u \in \ker B$, i. e. $Bu = \hat{A}u - gF(\hat{A}u) = 0$. Since $g_i \in R(\hat{A}) = Y$, $i = 1, \dots, n$, by using (7) we have $F(\hat{A}u) - F(g)F(\hat{A}u) = 0$ and $[I_n - F(g)]F(\hat{A}u) = 0$. Taking into account that $\det W \neq 0$, from the last equation we get $F(\hat{A}u) = 0$. Then $Bu = \hat{A}u = 0$ and $u = 0$. The last follows from $\ker \hat{A} = \{0\}$. So $\ker B = \{0\}$ and B is an injective operator.

Conversely. Let $\det W \neq 0$. Then there exists a vector $c = \text{col}(c_1, \dots, c_n) \neq 0$ such that $Wc = 0$. Note that $gc \neq 0$ because g_1, \dots, g_n is a linearly independent set. Then $u_0 = \hat{A}^{-1}gc \neq 0$ and $Bu_0 = \hat{A}u_0 - gF(\hat{A}u_0) = gc - gF(g)c = g[I_n - F(g)]c = gWc = g0 = 0$.

Hence $u_0 = \hat{A}^{-1}gc \in \ker B \neq \{0\}$ and B is not injective. So statement (i) holds.

(ii) Let $\det W \neq 0$. Then from (7) we get

$$F(\hat{A}u) - F(g)F(\hat{A}u) = F(f),$$

$$[I_n - F(g)]F(\hat{A}u) = F(f),$$

$$F(\hat{A}u) = W^{-1}F(f) \quad \text{for all } f \in Y; \quad (10)$$

$$u - \hat{A}^{-1}gF(\hat{A}u) = \hat{A}^{-1}(f). \quad (11)$$

Substituting (10) into (11), we obtain the unique solution (9) of (7) for all $f \in Y$. Then $R(\hat{A}) = Y$. The boundedness of B^{-1} on Y results from the boundedness of the operator \hat{A}^{-1} and the components of vector F . Hence, B is correct.

Now we generalize this theorem for the case of perturbed boundary conditions and $\dim \ker A = m$. The next theorem is a generalization of the Theorem 1 of [14] for the case $l \neq n$ and $X \neq Y$.

Theorem 2. Let X, Y be complex Banach spaces, $A: X \rightarrow Y$ be an operator from (3) with finite dimensional kernel $z = (z_1, \dots, z_m)$ which is a basis of $\ker A$, the operator \hat{A} defined by (4) and the components of the functional vectors $\Phi = \text{col}(\Phi_1, \dots, \Phi_m)$, $\Psi = \text{col}(\Psi_1, \dots, \Psi_l)$, and $F = \text{col}(F_1, \dots, F_n)$ belong to $[X_A^m]^*$ and Y^* respectively. Suppose also that Φ_1, \dots, Φ_m are biorthogonal to z_1, \dots, z_m and the components of vector $g = (g_1, \dots, g_n) \in Y^n$ are linearly independent and N is a $m \times l$ matrix.

Then: (i) The operator B defined by

$$Bu = Au - gF(Au) = f, \quad f \in Y;$$

$$D(B) = \{u \in D(A) : \Phi(u) = N\Psi(u)\} \quad (12)$$

is injective if and only if

$$\det V = \det[I_l - \Psi(z)N] \neq 0; \quad (13)$$

$$\det W = \det[I_n - F(g)] \neq 0. \quad (14)$$

(ii) If B is injective, then B is correct and for all $f \in Y$ the unique solution of (12) is given by

$$u = B^{-1}f = \hat{A}^{-1}f + \left[\hat{A}^{-1}g + zNV^{-1}\Psi(\hat{A}^{-1}g) \right] \times W^{-1}F(f) + zNV^{-1}\Psi(\hat{A}^{-1}f). \quad (15)$$

Proof: (i) The problem (12) can be rewritten as

$$Bu = A(u - zN\Psi(u)) - gF(A[u - zN\Psi(u)]) = f, \quad f \in Y, \\ D(B) = \{u \in D(A) : \Phi(u - zN\Psi(u)) = 0\}. \quad (16)$$

Then $u - zN\Psi(u) \in D(\hat{A})$, $Bu = \hat{A}(u - zN\Psi(u)) - gF(\hat{A}[u - zN\Psi(u)]) = f$ for every $u \in D(B)$. We introduce the substitution $v = u - zN\Psi(u)$ or since

Lemma 1, $v = Cu$, where we take $C: X \rightarrow X$, $D(C) = D(B)$. It is evident that C is a linear operator and $R(C) \subseteq D(\hat{A})$. From (16) it follows that problem (12), by the substitution $v = Cu$, is reduced to the problem

$$Bu = B_1v = \hat{A}v - gF(\hat{A}v) = f, \quad v \in D(B_1) = D(\hat{A}). \quad (17)$$

Since $v = Cu$, from (17) we get $Bu = B_1Cu$ for all $u \in D(B)$. Then B is injective if and only if B_1 and C are also injective. Note that the operator C , by Lemma 1, is injective if and only if $\det V = \det[I_l - \Psi(z)N] \neq 0$. The operator B_1 , by Theorem 1, where instead of B , u we have B_1v , v respectively, is injective if and only if (8) holds. So the operator B is injective if and only if (13), (14) hold true.

(ii) The unique solution of (17) by (9) for all $f \in Y$ is given by

$$v = \hat{A}^{-1}f + (\hat{A}^{-1}g)W^{-1}F(f). \quad (18)$$

Then

$$\Psi(v) = \Psi(\hat{A}^{-1}f) + \Psi(\hat{A}^{-1}g)W^{-1}F(f) \quad (19)$$

and since $\det V \neq 0$, $v = u - zN\Psi(u)$, by Lemma 1, we get

$$\begin{aligned} u &= C^{-1}v = v + zNV^{-1}\Psi(v) = \\ &= \hat{A}^{-1}f + (\hat{A}^{-1}g)W^{-1}F(f) + \\ &+ zNV^{-1}[\Psi(\hat{A}^{-1}f) + \Psi(\hat{A}^{-1}g)W^{-1}F(f)]. \quad (20) \end{aligned}$$

The last equation easily implies the unique solution of (12) defined by (15). The operator B_1 , by Theorem 1, is correct. Then $R(B_1) = Y$, which since $Bu = B_1v$ gives $R(B) = Y$. Since the operator \hat{A}^{-1} and the functionals $F_1, \dots, F_n, \Psi_1, \dots, \Psi_l$ are bounded, the boundedness of B^{-1} follows from (15). Hence, the operator B is correct. This completes the proof of Theorem 2.

Now, we implement the solution method of Theorem 2 on two numerical examples, the first involving a linear second order differential operator and the other a linear fourth order differential operator A .

Example 1. Consider the multipoint problem for loaded differential equation on $C[0, 1]$

$$\begin{aligned} u'' - (3t^3 - 2t)[u'(1) - u(1) + u(0)] &= \\ &= -6t^3 + 4t + 4, \quad (21) \\ u(0) &= 2u(1) + u(0.5) - 2u'(1), \\ u'(0) &= -u(1) - 2u(0.5) + 3u'(1). \end{aligned}$$

All the assumptions of Theorem 2 hold and the unique solution of (21) is

$$u(t) = 2t^2 - 5t + 3. \quad (22)$$

Proof: If we compare (21) with (12), it is natural to take $X = Y = C[0, 1]$,

$$\begin{aligned} Bu &= u'' - (3t^3 - 2t)[u'(1) - u(1) + u(0)] = \\ &= u'' - (3t^3 - 2t) \int_0^1 xu''(x)dx, \\ D(B) &= \\ &= \left\{ u(x) \in D(A) : \begin{pmatrix} u(0) \\ u'(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 \\ -1 & -2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(1) \\ u(0.5) \\ u'(1) \end{pmatrix} \right\}, \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Au &= u''(t), \quad D(A) = \{u \in C^2[0, 1]\}, \\ X_A^m &= C^2[0, 1], \quad X = C[0, 1], \quad m = 2, \quad l = 3, \quad n = 1, \\ z &= (z_1, z_2) = (1, t), \quad \hat{A}u = Au, \\ D(\hat{A}) &= \{u \in D(A) : u(0) = u'(0) = 0\}. \end{aligned}$$

The operator \hat{A} is correct and, since (6), its solution is $\hat{A}^{-1}f(t) = \int_0^t (t-x)f(x)dx$. Further comparing (21), (23) with (12), we take $g(t) = 3t^3 - 2t$, $f(t) = -6t^3 + 4t + 4$, $N = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 \\ -1 & -2 & 3 \end{pmatrix}$, $F(Au) = \int_0^1 xu''(x)dx$.

The solution method of Theorem 2 for problem (21) is implemented in computer algebra system Mathematica (v. 11.3) [16]. The Mathematica notebook containing the solution method is available upon request.

Even though Mathematica has a dedicated function to symbolically solve an integro-differential equation (solves also Fredholm integral equations), `DSolveValue` (new feature in Mathematica v. 11, see <https://www.wolfram.com/language/11/symbolic-and-numeric-calculus/solve-an-integro-differential-equation.html?product=language>), in this example fails to give an output. Trying to take the analytic solution with `NDSolveValue` instead, the procedure gave a bunch of errors. Built-in function `NDSolve` failed also.

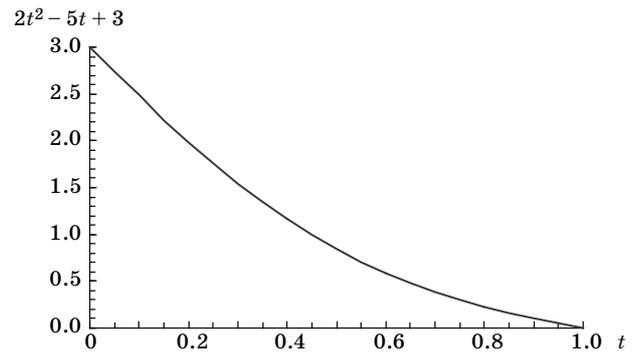
In the Mathematica codes given below, we provide an overview of the symbolic computations we employed for the illustrative Example 1. The computer codes give to the reader a computerized approach along with the analytical one. All of the commands have quite similar analogues in the case of any order integro-differential equation. It is then possible to create a script for solving this type of integro-differential equations. Here, only the main ideas and procedures for the solution are given and the basic knowledge of how to use Mathematica is assumed.

In Mathematica's environment, we begin by writing the functions that represent the structural elements of the operator equation (21). Then we de-

fine the functional vectors of the boundary conditions. Functions and functional vectors are written in a way to take various elements as arguments. In Example 1, t takes values from the interval $[0, 1]$. The criterion for injectivity of B that is tested and verified is the only requirement to apply Theorem 2 and formulate the unique solution as in (15).

```

Mathematica code
in[*]:= (*definitions*)
in[*]:= (*Give the order m of the differential operator A or the number of conditions or the dimension m of the functional vector Φ*)
in[*]:= m = 2;
in[*]:= (*Give the dimension l of the functional vector Ψ*)
in[*]:= l = 3;
in[*]:= (*Give the dimension n of the functional vector F*)
in[*]:= n = 1;
in[*]:= (*Define the structural elements of the operator equation Au - gF(Au) = f*)
in[*]:= (*F is the integral part of the IDE*)
in[*]= F[function_] := {∫01 x*function dx}
in[*]:= f[t_]:= {-6*t^3 + 4*t + 4}
in[*]:= g[t_]:= {3*t^3 - 2*t}
in[*]:= (*Give the values of the variables in the boundary conditions*)
in[*]:= ti = {1, 0.5, 1};
in[*]:= (*Give the m × l N matrix “nmatrix” such that Φ(u) = NΨ(u)*)
in[*]:= nmatrix = {{2, 1, -2}, {-1, -2, 3}};
in[*]:= (*Give the functional vector Ψ such that Φ(u) = NΨ(u)*)
in[*]:= Ψ[function_] := {function/.t → ti[[1]], function/.t → ti[[2]], D[function, t]/.t → ti[[3]]}
in[*]:= (*The solution method*)
in[*]:= W := IdentityMatrix[n] - F[g[x]]
in[*]:= V := IdentityMatrix[l] - Ψ[z].nmatrix
in[*]:= z := Table[t^i/i!, {i, 0, m - 1}];
in[*]:= inverse A[function_] :=
=  $\frac{1}{(m-1)!} \int_0^t (t-x)^{m-1} *function dx$ 
in[*]:= (*Verify the assumptions of Theorem 2*)
in[*]:= (*Testing necessary and sufficient conditions for operator Bu = Au - gF(Au) to be injective*)
in[*]:= Det[W]
out[*] =  $\frac{16}{15}$ 
in[*]:= Det[V]
out[*] = 1.5
in[*]:= (*Testing the existence and uniqueness criterion*)
in[*]:= If[Det[W] ≠ 0 && Det[V] ≠ 0, “The IDE has a unique solution”, “The solution is not unique”]
out[*] := The IDE has a unique solution
    
```



■ Values for $u(t)$ over the domain $[0, 1]$

```

in[*]:= (*Here is the unique solution by the exact solution method*)
in[*]:= solution := Simplify[inverseA[f[x]] + (inverseA[g[x]] + z.nmatrix.Inverse[V].Ψ[inverseA[g[x]]].Inverse[W].F[f[x]] + z.nmatrix.Inverse[V].Ψ[inverseA[f[x]]])]
in[*]:= Print[“The exact solution of the IDE is” Flatten[solution]]
{The exact solution of the IDE is (3.-5.t + 2t^2)}
The graphical representation of the analytical solution to this problem is shown in Figure:
in[*]:= Plot[3 - 5t + 2t^2, {t, 0, 1}, AxesLabel → {t, 3 - 5t + 2t^2}].
    
```

Example 2. Consider the multipoint problem for differential equation on $C[0, 1]$

$$u^{(4)}(t) - (t^2 - 4t + 1) \times \int_0^1 x u^{(4)}(x) dx = -12t^2 + 48t + 12, \quad (24)$$

$$u(0) = 3u(1), u'(0) = -5u'(1) + u''(1),$$

$$u''(0) = -\frac{1}{5}u''(1), u'''(0) = 24u'''(1) - 10u''''(1).$$

The unique solution of (24) is

$$u(t) = t^4 - t^2. \quad (25)$$

We solve problem (24) using the previous Mathematica script, by changing only the input parameters $m, l, n, F, f(t), g(t), N, \Psi(u)$. The program checks if all the assumptions of Theorem 2 hold and the unique solution is determined explicitly in finitely many steps of computation, following (15).

```

Mathematica code
in[*]:= (*definitions*)
in[*]:= (*Give the order m of the differential operator A / number of conditions or the dimension m of the functional vector Φ*)
in[*]:= m = 4;
in[*]:= (*Give the dimension l of the functional vector Ψ*)
in[*]:= l = 4;
    
```

```

in[*] = (*Give the dimension n of the functional
vector F*)
in[*] = n = 1;
in[*] = (*Define the structural elements of the
operator equation Au = gF(Au) = f*)
in[*] = (*F is the integral part of the IDE*)
in[*] = F[function_] := {∫01 x*function dx}
in[*] = f[t_] := {-12*t2 + 48*t + 12}
in[*] = g[t_] := {t2 - 4*t + 1}
in[*] = (*Give the values of the variables in the
boundary conditions*)
in[*] = ti = {1, 1, 1, 1};
in[*] = (*Give the m × l N matrix “nmatrix” such
that Φ(u) = NΨ(u)*)
in[*] = nmatrix = {{3, 0, 0, 0}, {0, -5, 1, 0}, {0, 0,
-1/5, 0}, {0, 0, 24, -10}};
in[*] = (*Give the functional vector Ψ such that
Φ(u) = NΨ(u)*)
in[*] = Ψ[function_] := {function/.t → ti[[1]];
D[function, t]/.t → ti[[2]], D[function, {t, 2}]/.t →
ti[[3]], D[function, {t, 3}]/.t → ti[[4]]}
in[*] = (*The solution method*)
in[*] = W: = IdentityMatrix[n] - F[g[x]]
in[*] = V: = IdentityMatrix[l] - Ψ[z].nmatrix
in[*] = z: = Table[ti/i!, {i, 0, m - 1}];
in[*] = inverseA[function_] :=
=  $\frac{1}{(m-1)!} \int_0^t (t-x)^{m-1} * function dx$ 
in[*] = (*Verify the assumptions of Theorem 2*)
in[*] = (*Testing necessary and sufficient condi-
tions for operator Bu = Au - gF(Au) to be injective*)
in[*] = Det[W]

```

```

out[*] =  $\frac{19}{12}$ 
in[*] = Det[V]
out[*] =  $\frac{648}{5}$ 
in[*] = (*Testing the existence and uniqueness
criterion*)
in[*] = If[Det[W] ≠ 0 && Det[V] ≠ 0, “The IDE
has a unique solution”, “The solution is not unique”]
out[*] = The IDE has a unique solution
in[*] = (*Here is the unique solution by the exact
solution method*)
in[*] = solution: = Simplify[inverseA[f[x]] + (in-
verseA[g[x]] + z.nmatrix.Inverse[V].
Ψ[inverseA[g[x]]].Inverse[W].F[f[x]] + z.nmatrix.
Inverse[V].Ψ[inverseA[f[x]]]]
in[*] = Print[“The exact solution of the IDE is”
Flatten[solution]]
{The exact solution of the IDE is t2(-1 + t2)}
in[*] = Expand[solution[[1]]]
out[*] = -t2 + t4

```

Conclusion

In the paper, an analytical method for giving exact solutions for Fredholm integro-differential equations is presented. This analytical method is constructive in the sense that it allows to study the unique solvability of the problem and analytically construct its solution. A couple of numerical examples were solved by this method in Mathematica software. Reproducibility of the proof is possible through the Mathematica script.

References

1. Parkhimovich I. V. Multipoint boundary value problems for linear integro-differential equations in the class of smooth functions. *Differentsial'nye uravneniya* [Differential Equations], 1972, vol. 8, no 3, pp. 549–552 (In Russian).
2. Tamarkin J. D. The notion of the Green's function in the theory of integro-differential equations. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1927, vol. 29, no. 4 pp. 755–800.
3. Polyanin A. D., Zhurov Alexei I. Exact solutions to some classes of nonlinear integral, integro-functional and integro-differential equation. *Doklady Mathematics*, 2008, vol. 77, no. 2, pp. 315–319. doi:10.1134/S1064562408020403
4. Wazwaz A. M. *Linear and Nonlinear Integral Equations. Methods and Applications*. Springer, Beijing, 2011. 657 p.
5. Dzhumabaev D. S. On one approach to solve the linear boundary value problems with Fredholm integro-differential equations. *Journal of Computational and*

6. Applied Mathematics, 2016, vol. 294, pp. 342–357. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.08.023>
6. Dhamacharoen A., Chompuvised K. An efficient method for solving integro-differential boundary value problems. *AIP Conference Proceedings* 1982, 2018, pp. 020015-1–020015-11.
7. Oinarov R. O., Parasidi I. N. Correct extensions of operators with finite defect in Banach spaces. *Izvestiya Akademii Nauk Kazakhskoi SSR*, 1988, no. 5, pp. 42–46 (In Russian).
8. Parasidis I. N., Tsekrekos P. C. Some quadratic correct extensions of minimal operators in Banach space. *Operators and Matrices*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 225–243. doi:dx.doi.org/10.7153/oam-04-11
9. Parasidis I. N., Tsekrekos P. C. Correct and self-adjoint problems for quadratic operators. *Eurasian Mathematical Journal*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 122–135.
10. Parasidis I. N., Providas E. *Extension Operator Method for the Exact Solution of Integro-Differential Equations*. In: Pardalos P., Rassias T. (eds). *Contributions in Mathematics and Engineering: In Honor of*

- Constantin Caratheodory*. Springer, 2016. P. 473–496. doi:10.1007/978-3-319-31317-7_23
11. Abdullaev A. R., Skachkova E. A. On one class of multipoint boundary value problems for a second-order linear functional-differential equation. *Journal of Mathematical Sciences*, 2018, vol. 230, no. 5, pp. 647–650.
 12. Benchohra M., Ntouyas S. K. Existence results on the semiinfinite interval for first and second order integro-differential equations in Banach spaces with non-local conditions. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis, Facultas Rerum Naturalium, Mathematica*, 2002, vol. 41, pp. 13–19.
 13. Ionkin N. I. The solution of a certain boundary value problem of the theory of heat conduction with a non-classical boundary condition. *Differentsial'nye uravneniya* [Differential Equations], 1977, vol. 13, no. 2, pp. 294–304 (In Russian).
 14. Vassiliev N. N., Parasidis I. N., Providas E. Exact solution method for Fredholm integro-differential equations with multipoint and integral boundary conditions. Part 1. Extension method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 14–23. doi:10.31799/1684-8853-2018-6-14-23
 15. Vassiliev N. N., Parasidis I. N., Providas E. Exact solution method for Fredholm integro-differential equations with multipoint and integral boundary conditions. Part 2. Decomposition-extension method for squared operators. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 2, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2019-2-2-9
 16. Wolfram Research, Inc. *Mathematica*, Version 11.3, Champaign, Illinois, 2018.

УДК 338.984

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-2-8

Метод точного решения для интегро-дифференциальных уравнений Фредгольма

К. Д. Тсилика^a, PhD, доцент, orcid.org/0000-0002-9213-3120, ktsilika@uth.gr

^aУниверситет Фессалии, 38221, Волос, Греция

Введение: линейные краевые задачи с интегральными граничными условиями для дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений Фредгольма редко рассматриваются в литературе. Представляется важным исследование интегро-дифференциальных уравнений с многоточечными или нелокальными интегральными граничными условиями. Даже для дифференциальных уравнений получение точных решений с подобными граничными условиями является непростой задачей. **Цель:** поиск критерия существования и единственности решений для обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений Фредгольма с сепарабельным ядром и многоточечными или нелокальными интегральными граничными условиями; разработка математической методики, ведущей к точным аналитическим решениям заданного уравнения. **Результаты:** для одного класса абстрактных операторных уравнений, частным случаем которых являются интегро-дифференциальные уравнения Фредгольма с многоточечными или нелокальными интегральными граничными условиями, получены критерии существования и единственности точного решения и его аналитическое представление; предложен прямой метод, символически решающий подобные задачи, в котором все вычисления воспроизводимы в любой программе символьных вычислений. Если пользователь устанавливает входные параметры и начальные условия задачи, выделенные компьютерные коды проверяют условия существования и единственности и генерируют аналитическое решение задачи. Этапы решения проиллюстрированы двумя примерами. В статье использовано программное обеспечение CAS Mathematica.

Ключевые слова — краевые задачи, обыкновенные дифференциальные уравнения, интегро-дифференциальные уравнения Фредгольма с сепарабельным ядром, многоточечные граничные условия, нелокальные интегральные граничные условия, корректные операторы, точные решения.

Для цитирования: Tsilika K. D. An exact solution method for Fredholm integro-differential equations. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-2-8

For citation: Tsilika K. D. An exact solution method for Fredholm integro-differential equations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-2-8

Отказоустойчивая и энергоэффективная система обработки информации и управления на кристалле

А. М. Грузликов^а, канд. техн. наук, начальник отдела, orcid.org/0000-0001-8814-0726

Н. В. Колесов^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-3287-7504, kolosovnv@mail.ru

Д. В. Костыгов^а, аспирант, orcid.org/0000-0003-4379-5803

М. В. Толмачева^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-0795-7617

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

Постановка проблемы: большинство реальных сложных систем проектируются с учетом требований отказоустойчивости, однако при этом все известные подходы имеют целью лишь повышение надежности. **Цель:** разработка подхода для проектирования отказоустойчивых систем на кристалле, нацеленного не только на повышение надежности, но и на снижение потребляемой системой мощности. **Результаты:** предложен двухэтапный подход к построению отказоустойчивых систем на многоядерном кристалле. На первом этапе формируется энергоэффективная архитектура проектируемой системы. При этом для каждого используемого в системе ядра определяется оптимальное в рамках существующих ограничений число дополнительных ядер. Критерием оптимальности при этом служит минимум потребляемой системой мощности. Предложенный алгоритм формирования энергоэффективной архитектуры основан на зависимости потребляемой в системе мощности от значений напряжения питания и тактовой частоты. На втором этапе разрабатывается процедура диагностирования и восстановления системы, использующая принципы распределенного диагностирования, предполагающего взаимные проверки между ядрами системы. Процедура позволяет децентрализовать процесс диагностирования и восстановления системы после отказов. Дополнительно в статье исследуется организация коммуникационной подсистемы, основу которой составляет общая память. Исследование опирается на проведенное моделирование в целях оценивания времени принятия решения об отказе в системах типа решетка, тор и гиперкуб. **Практическая значимость:** предложенный подход позволяет обеспечивать при проектировании системы необходимые значения для двух важнейших ее характеристик – отказоустойчивости и энергоэффективности. При этом обеспечивается децентрализация при принятии решений об отказе и восстановлении и, как следствие, повышение надежности системы.

Ключевые слова – отказоустойчивость, рем-модель, децентрализованная система, энергоэффективность, система на кристалле.

Для цитирования: Грузликов А. М., Колесов Н. В., Костыгов Д. В., Толмачева М. В. Отказоустойчивая и энергоэффективная система обработки информации и управления на кристалле. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 9–18. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-9-18

For citation: Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Kostygov D. V., Tolmacheva M. V. Fault-tolerant and energy-efficient MCSoc for information processing and control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 9–18 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-9-18

Введение

Разработка сложных систем обработки информации и управления всегда сопряжена с необходимостью удовлетворения целому набору технических требований и ограничений. Понятно, что в случае реализации этой системы на кристалле уровень ограничений лишь возрастает. В настоящей работе рассматривается последняя проблема с фокусированием на вопросах создания распределенной вычислительной отказоустойчивой системы реального времени. Очевидно, что проблема носит существенно комплексный характер. Как будет видно из дальнейшего изложения, кроме аспектов отказоустойчивости и энергопотребления, будут затронуты вопросы организации процесса диагностирования.

История исследований вопросов разработки отказоустойчивых систем насчитывает несколько десятилетий. Однако данная проблематика

по-прежнему остается актуальной и широко освещается в современной литературе [1–5]. При этом традиционный подход обычно связывают с использованием того или иного варианта резервирования. Все эти варианты хорошо и давно известны специалистам. К числу их общих недостатков можно отнести, в частности, то, что построение осуществляется без учета уровня энергопотребления будущей отказоустойчивой системы. Эта проблема является одной из ключевых при проектировании вычислительных систем. В последние десятилетия ей уделяется особое внимание, в том числе и в связи с обсуждением ее в отношении систем на кристалле [6–9], когда снижение энергопотребления (рассеиваемой мощности) достигается за счет снижения тактовой частоты и напряжения питания. О признании практической значимости этого направления свидетельствует и тот факт, что разработчики процессоров в целях снижения энергопотреб-

ления стали предусматривать в своих проектах встроенные средства для варьирования тактовой частотой и напряжением питания.

Заметим, что необходимым элементом отказоустойчивой системы являются средства диагностирования, выполняемые на основе техник тестового и функционального диагностирования [10–14]. По их сигналам принимается решение о появлении отказа в системе, указывается его место и запускается процедура восстановления. Для сложных многопроцессорных вычислительных систем известен подход распределенного диагностирования, названный РМС-моделью (предложенной Ф. П. Препаратом, Г. Метцом и Р. Т. Ченом (F. P. Preparata, G. Metzger and R. T. Chien)) [15–17], который основан на взаимных проверках, осуществляемых процессорами системы. За прошедшие десятилетия данный подход неоднократно уточнялся, однако при этом средства диагностирования, как правило, реализовались по централизованной схеме, когда выделяется некоторая часть их аппаратуры, в отношении которой делается предположение об априорной исправности. В результате в системе возникает «узкое место», отказ которого является катастрофическим для системы.

Основной вклад и практическая значимость настоящей статьи состоят в разработке подхода к построению децентрализованных отказоустойчивых и энергоэффективных систем, т. е. систем, лишенных «узких мест». Проблема рассматривается применительно к многоядерным системам на кристалле, что не исключает возможности применения полученных результатов и по отношению к другим типам многопроцессорных систем.

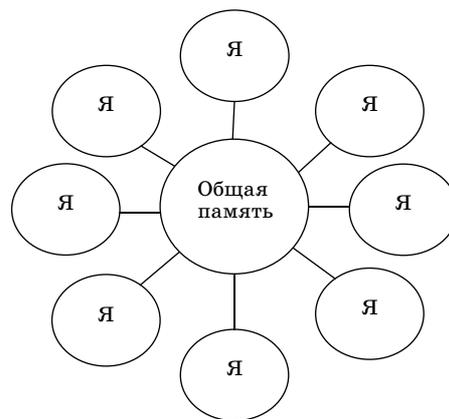
Материал излагается в следующем порядке. Обсуждается формирование архитектуры распределенной системы. При этом в ее состав так вводятся дополнительные ядра, чтобы снизить потребляемую системой мощность. На основе полученной архитектуры формулируется концепция отказоустойчивой системы, исследуются особенности коммуникационной системы и диагностического эксперимента.

Энергоэффективный алгоритм определения архитектуры системы

Постановка проблемы. Многоядерная гомогенная система на кристалле (рис. 1) включает совокупность одинаковых ядер *Я*, взаимодействующих через общую память. Будем считать, что каждое ядро оснащено устройством для параметрического управления его тактовой частотой и напряжением питания. Код настройки в это устройство может поступать как извне (начальная настройка), так и от самого ядра-хозяина в процессе функционирования.

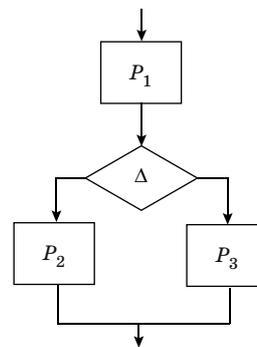
Рассмотрим проблему для такой системы реального времени с одним заданием. Сразу отметим, что, как будет пояснено в дальнейшем, случай с несколькими заданиями не слишком сильно отличается от рассматриваемого. Гипотетический пример граф-схемы задания показан на рис. 2. В системе реального времени это задание выполняется с периодом, равным периоду съема информации с датчиков. Предположим, что каждая операторная вершина P_1-P_3 задания реализуется отдельным программным модулем и выполняется на отдельном ядре. Таким образом, архитектуру *A* системы составляют три ядра. В дальнейшем каждое ядро исходной реализации системы будем называть стадией. Предположим, что на кристалле существуют дополнительные неиспользуемые ядра. Проблема определения архитектуры сводится к поиску такого перераспределения вычислительной нагрузки между всеми ядрами, чтобы мощность *P*, потребляемая системой, была минимальной:

$$A = \underset{A}{\operatorname{arg\,min}} P(A). \quad (1)$$



■ Рис. 1. Упрощенная архитектура многоядерного кристалла

■ Fig. 1. A architecture of MCSocS



■ Рис. 2. Граф-схема задания

■ Fig. 2. Flowgraph of a task

Алгоритм определения архитектуры. Обсудим соотношения, описывающие потребляемую системой мощность P , поскольку именно она составляет основу критерия оптимизации на данном этапе.

Сразу отметим, что случай с минимизацией энергии вместо мощности аналогичен рассматриваемому ниже, поскольку энергия, потребляемая системой, равна произведению мощности на время работы системы. Известно [8], что мощность имеет две составляющие — динамическую P_d и статическую P_s . Выражения, описывающие эти составляющие без излишней для данного изложения детализации, имеют вид

$$P_d = aNV^2f; P_s = bN, \quad (2)$$

где a, b — коэффициенты пропорциональности, зависящие от свойств кристалла; N — число процессоров (ядер) в системе; V — напряжение питания; f — тактовая частота. Поскольку вклад статической мощности в суммарную потребляемую мощность невелик, далее будем учитывать лишь динамическую составляющую. Для ее анализа полезна приближенная формула, определяющая задержку, вносимую схемой при напряжении питания V [8]:

$$D = cV, \quad (3)$$

где c — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств кристалла.

При снижении частоты тактовых импульсов в обратной пропорции возрастает их период, ограничивающий допустимое время для переходных процессов, возникающих в системе при каждом срабатывании. При исходном значении напряжения питания фактическое время переходных процессов будет мало по отношению к новому увеличенному значению периода, а значит, возникает возможность пропорционально снизить напряжение питания с увеличением задержки в рамках периода тактовых импульсов в соответствии с (3). В результате выполнения этих двух шагов может быть достигнуто существенное снижение потребляемой мощности (2). Действительно, пусть как частота, так и напряжение питания снижены в k раз. Тогда в соответствии с (2) динамическая мощность снижается в k^3 раз. При этом, правда, и время работы ядра увеличивается в k раз. Если для сохранения его на прежнем уровне увеличить в k раз число ядер, а вычислительную нагрузку разделить между всеми ядрами поровну, то в результате потребляемая мощность по отношению к исходному варианту уменьшится в k^2 раз. Описанный факт положен в основу предлагаемого подхода к определению архитектуры системы.

Суть подхода состоит в последовательном определении для каждой стадии количества реализующих ее ядер. При этом предполагается, что все ядра стадии работают на одной частоте и при одном напряжении питания, а также что для системы известен допустимый исходный вариант значений параметров f_0, V_0 . Безусловно, проектируя систему на кристалле, разработчик всегда ограничен не только по потребляемой мощности, но также по площади s_0 кристалла, отведенной для реализации вычислительной системы:

$$s \leq s_0, \quad (4)$$

по напряжению питания

$$V \geq V_0 \quad (5)$$

и частоте

$$f \leq f_0. \quad (6)$$

Зная размер площади s_k , занимаемой одним ядром, можно пересчитать ограничение по площади кристалла в допустимое число n_d дополнительных ядер:

$$n_d = \frac{s_0 - s_k n}{s_k}.$$

В общем случае, когда стадий несколько, возникает вопрос, как наилучшим образом с точки зрения минимизации потребляемой мощности распорядиться дополнительными ядрами (запасом по площади) в рамках ограничений (5) и (6). На него отвечает приводимый ниже алгоритм определения энергоэффективной архитектуры. Будем называть ядра исходной реализации системы «исходными», процесс добавления в i -ю стадию $n_{d,i}$ дополнительных ядер «расщеплением i -го исходного ядра», а образованное в результате этого расщепления множество ядер — «расщепленным множеством i -го ядра». Кроме того, будем считать расщепленное множество i -го ядра предельным, если исключение из него одного ядра делает его среднюю по множеству потребляемую мощность максимальной среди стадий системы. Интуитивно, по-видимому, ясно, что экономия мощности будет максимальной, если разгружаться будут наиболее загруженные ядра, а распределение нагрузки между ядрами в расширенном множестве будет осуществляться сбалансированным образом, т. е. равномерно. По этому принципу работает предлагаемый алгоритм. В дальнейшем этот принцип будет обоснован. Заметим, что идеальная сбалансированность при распределении нагрузки, когда нагрузка делится на равные части между ядрами

стадии, на практике в общем случае невозможно. В связи с этим речь идет лишь о приближенной сбалансированности. Архитектуру системы представим вектором состава $\mathbf{A} = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$, где a_i — число ядер в расщепленном множестве i -го ядра, и вектором средней потребляемой мощности $\bar{\mathbf{P}} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$, где \bar{P}_i — средняя по расщепленному множеству i -го ядра потребляемая мощность. Итак, предлагается следующий простой алгоритм определения энергоэффективной архитектуры.

Шаг 1. Сделать начальные присвоения: $M = n_d$ (допустимое число дополнительных ядер), $\mathbf{A} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$, $\bar{\mathbf{P}} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$.

Шаг 2. Выбрать в $\bar{\mathbf{P}} = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$ компоненту с максимальным значением \bar{P}_{\max} . Пусть ее номер равен l . Ввести дополнительное ядро в l -ю стадию. Произвести между ядрами l -й стадии приближенно сбалансированное перераспределение нагрузки. Пересчитать параметры алгоритма: $\bar{\mathbf{P}}, a_l := a_l + 1, M := M - 1$. Если $M \neq 0$, то повторить шаг 2, иначе конец.

Проведем качественный анализ приведенного алгоритма. Нестрогость дальнейшего анализа связана с предположением о делимости нагрузки стадий при расщеплении ядер на необходимое для реализации шагов алгоритма число частей. В результате мы сможем говорить о возможности строго сбалансированного назначения задач при расщеплении ядер.

Лемма 1. Если упорядочить стадии системы по убыванию потребляемой мощности, то соответствующая оптимальная последовательность, составленная из постадийных мощностей множеств используемых ядер, будет невозрастающей.

Доказательство: Запишем выражение для значения ΔP сэкономленной мощности

$$\Delta P = \sum_i P_i - \sum_i \frac{P_i}{n_i^2}.$$

Поскольку мощность безызбыточной системы $\sum_i P_i$ задана, для максимизации ΔP следует минимизировать слагаемое $\sum_i \frac{P_i}{n_i^2}$. Эту сумму можно рассматривать как произведение двух числовых

последовательностей $\{P_i \mid i = \overline{1, n}\}$ и $\left\{\frac{1}{n_i^2} \mid i = \overline{1, n}\right\}$.

Упорядочим первую последовательность по убыванию значений. Тогда известно [18], что рассматриваемая сумма будет минимальной, если соответствующая вторая последовательность будет неубывающей. Неубывание членов последовательности означает в данном случае невозрастание мощности множеств ядер, используемых на разных стадиях. ■

Данное утверждение подтверждает направленность предложенного алгоритма на разгрузку наиболее загруженных ядер.

Теорема 1. Алгоритм является «жадным», а именно, каждый его шаг является оптимальным по критерию $A = \arg \min_A P(A)$.

Доказательство: Покажем, что получаемый на каждом шаге алгоритма вклад в сэкономленную мощность будет максимальным. Запишем выражение для сэкономленной мощности:

$$\Delta P_i = \frac{P_i}{n_i^2} - \frac{P_i}{(n_i + 1)^2}.$$

Перейдем от дискретной функции $\frac{P_i}{(n_i + 1)^2}$ к непрерывной и воспользуемся для ее представления двумя первыми слагаемыми из разложения в ряд Тейлора:

$$\Delta P_i \frac{P_i}{n_i^2} - \frac{P_i}{n_i^2} + 2 \frac{P_i}{n_i^2} \frac{1}{n_i} = 2 \frac{P_i}{n_i^2} \frac{1}{n_i}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что прирост сэкономленной мощности равен удвоенной удельной мощности стадии. Следовательно, выбор по максимуму удельной мощности соответствует жадному выбору по максимуму сэкономленной мощности. ■

Теорема 2. Алгоритм поставяет архитектуру, оптимальную по критерию $A = \arg \min_A P(A)$, при

заданном ограничении на число дополнительных ядер $n_d \leq n_{d0}$.

Доказательство: Прежде всего заметим, что в оптимальной архитектуре все расщепленные множества системы являются предельными, кроме, возможно, множества с максимальной удельной мощностью. Действительно, предположим противное, а именно, что в оптимальной архитектуре существует неопредельное расщепленное множество с не максимальной удельной мощностью. Тогда из этой стадии можно исключить одно ядро и перенести его в стадию с максимальной удельной мощностью. При этом сэкономленная мощность увеличится, а значит, предположение о существовании такой оптимальной архитектуры неверно. Очевидно, что алгоритм на каждом шаге поставяет архитектуру, в которой все расщепленные множества системы являются предельными, кроме, возможно, множества с максимальной удельной мощностью. При этом он осуществляет перебор всех возможных таких архитектур в рамках заданного ограничения на $n_d \leq n_{d0}$, который в конце концов приведет к оптимальному решению.

Поскольку приведенный алгоритм оперирует не с абсолютными значениями мощностей, а с их соотношением, то с инженерной точки зрения воз-

возможен переход к оперированию не потребляемыми в стадиях мощностями, а вычислительными сложностями решаемых в стадиях задач. Итак, пусть планируется m заданий $\{\tau_j | j = \overline{1, m}\}$, каждое j -е из которых включает n задач $\{\tau_{j,i} | i = \overline{1, n}\}$. Введем понятие вычислительной сложности Ψ_j задания τ_j , под которой будем понимать число составляющих это задание операций. В относительных расчетах, проводимых далее в примере, в качестве оценок можно использовать его исходную длительность (до снижения частоты). Аналогично введем вычислительную сложность $\Psi_{j,i}$ для задачи $\tau_{j,i}$, а также вычислительную сложность Ψ^i для стадии i . При этом

$$\Psi_j = \sum_{i=1}^n \Psi_{j,i}; \quad \Psi^i = \sum_{j=1}^m \Psi_{j,i}.$$

Выбирая в расщепленном множестве каждого i -го исходного ядра ядро с максимальной нагрузкой Ψ_{\max}^i , рассчитываем для стадии минимальную тактовую частоту как пропорциональную вычислительной сложности:

$$f_{\min}^i = f_0 \frac{\Psi_{\max}^i}{\Psi^i}. \quad (8)$$

Далее в той же пропорции снижается напряжение питания:

$$V_{\min}^i = V_0 \frac{\Psi_{\max}^i}{\Psi^i}.$$

Подчеркнем, что выбор варианта размещения задач стадии целесообразно делать в пользу сбалансированного назначения, поскольку в этом случае вычислительная сложность максимального блока будет минимальной, а значит, и минимальной будет выбираемая тактовая частота стадии (8). Рассмотрим иллюстративный пример.

Пример 1. Пусть система содержит три ядра, на которых выполняются четыре задания $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$, имеющие длительности стадий, выраженные в условных единицах (табл. 1).

■ Таблица 1. Длительности стадий

■ Table 1. Stage executions

Задание	$\tau_{i,1}$	$\tau_{i,2}$	$\tau_{i,3}$
τ_1	3	2	1
τ_2	3	1	1
τ_3	3	1	1
τ_4	2	1	1
τ_5	11	5	4

В нижней строке таблицы приведены суммарные длительности для всех задач каждой из стадий. Далее они будут использованы как оценки вычислительной сложности и оценки потребляемой на каждой стадии мощности в условных единицах. Необходимо определить наилучшее расщепление для каждого ядра при условии, что запас по площади позволяет добавить в систему четыре ядра ($n_d = 4$).

Для решения задачи воспользуемся вышеприведенным алгоритмом с анализом длительностей стадий.

1. Делаем начальные присвоения $M = 4, A = (1 \ 1 \ 1), \bar{P} = (11 \ 5 \ 4)$.

2. Расщепляем ядро первой стадии, вводя два дополнительных ядра. Распределяем нагрузку примерно равномерно между тремя ядрами: {5, 3, 3}. Вычисляем среднюю мощность, потребляемую ядрами расщепленного множества 1-й стадии: $\bar{P}_1 = 3,6 < 5$. Вычисляем количество запасных ядер $n_d = 4 \neq 0$. Переходим к следующему шагу расщепления.

3. Расщепляем ядро второй стадии, вводя одно дополнительное ядро. Распределяем нагрузку примерно равномерно между двумя ядрами: {3, 2}. Вычисляем среднюю нагрузку ядер расщепленного множества 2-й стадии: $\bar{P}_2 = 2,5 < 3,6$. Вычисляем количество запасных ядер $n_d = 1 \neq 0$. Переходим к следующему шагу расщепления.

4. Расщепляем ядро третьей стадии, вводя одно дополнительное ядро. Распределяем нагрузку равномерно между двумя ядрами: {2, 2}. Вычисляем среднюю мощность, потребляемую ядрами расщепленного множества 3-й стадии: $\bar{P}_3 = 2$. Вычисляем количество запасных ядер $n_d = 0$. Конец.

Таким образом, результирующая система содержит семь ядер и характеризуется следующим вектором средних нагрузок для стадий $\bar{P} = (3,6 \ 2,5 \ 2)$. Оценим приближенно достигаемое при этом снижение потребляемой мощности. В качестве оценки мощности в условных единицах, потребляемой исходной системой, будем использовать, как уже отмечалось: $P_0 = \sum_j R_{\Sigma,j}$.

При этом для преобразованной системы выражение будет иметь вид

$$P = \sum_j \frac{\bar{R}_{\Sigma,j}}{k_j^2},$$

где $k_j = \frac{\bar{R}_{\Sigma,j}}{\bar{P}_{j,\max}}$ — коэффициент снижения частоты

(напряжения питания); $\bar{P}_{j,\max}$ — наибольшая средняя мощность, потребляемая ядрами расщепленного множества j -й стадии. В результате снижение мощности выражается величиной $l = 5,3$.

Безусловно, реальный выигрыш будет меньше, поскольку в проведенных вычислениях не учтено ограничение (5) по напряжению питания.

Концепция построения децентрализованной энергоэффективной отказоустойчивой многоядерной системы на кристалле

Концепция основана на рассмотренных выше принципах построения энергоэффективных систем, а также принципах распределенного диагностирования, предполагающего взаимные проверки между процессорными модулями и распределенную процедуру принятия решений. При построении энергоэффективной отказоустойчивой системы предлагается воспользоваться скрытой избыточностью описанной в предыдущем разделе энергоэффективной архитектуры. Действительно, при формировании архитектуры в состав системы вводились дополнительные ядра с последующим снижением тактовой частоты и напряжения питания. В результате сформировалась архитектура многоядерного кристалла (см. рис. 1), включающая множество ядер, обменивающихся информацией через общую память. Общая память разбита на области, через каждую из которых реализуется информационная связь между соответствующей парой ядер по принципу «точка-точка». Для обеспечения отказоустойчивости предлагается при возникающих отказах организовать обратный процесс слияния ядер, а именно, задачи с отказавшего ядра переносить на ядро, в результате расщепления которого образовалось отказавшее. Безусловно, этот процесс должен сопровождаться увеличением тактовой частоты и напряжения питания для ядра слияния. Таким образом, за отказоустойчивость система «расплачивается» энергоэффективностью. Следует отметить, что как уровень энергоэффективности, так и уровень отказоустойчивости, достигаемые в конкретном приложении, могут быть весьма различными и в общем случае невысокими. Многие при этом будет определяться имеющимся запасом по площади кристалла и, как следствие, количеством дополнительных ядер. Более того, даже при большом числе использованных избыточных ядер может оказаться, например, что достигается высокий уровень энергоэффективности и низкий уровень отказоустойчивости. Это возможно, когда запас по дополнительным ядрам истрачен для разгрузки исходно перегруженных ядер, а для всех остальных исходных ядер дополнительных попросту не хватило. При этом, конечно, возможен поиск компромиссных вариантов, однако эти вопросы в настоящей работе не рассматриваются.

Для создания энергоэффективной отказоустойчивой системы требуется дополнительно решить еще несколько вопросов. Среди них определение структуры коммуникационной системы, разработка процедур диагностирования отказавшего ядра и восстановления системы после отказа.

Применим при разработке отказоустойчивой энергоэффективной системы РМС-модель [17] с распределенным принятием решения об отказе. Это позволит реализовать децентрализованную отказоустойчивую систему, лишенную «узких» мест. Обсудим реализацию РМС-модели, предварительно определив модель отказа ядра как утрату функции обработки информации при сохранении функции ее трансляции со входа ядра на выход. Процесс диагностирования можно разбить на три этапа: проверки, сбора диагностической информации и принятия решения об отказе. На первом этапе предполагается, что ядра осуществляют взаимные проверки. Каждая из проверок характеризуется малой длительностью, поскольку нацелена на диагностирование лишь небольшой части объекта диагностирования, опираясь на которую объект может далее построить процесс самодиагностирования. Второй этап, очевидно, должен отличаться наибольшей длительностью, поскольку предполагает передачу результатов взаимных проверок и самодиагностирования от каждого ядра к каждому. Наконец, на третьем этапе в каждом из ядер происходит анализ результатов диагностирования и принятие решения об отказе.

В основу процедуры реконфигурации (восстановления) системы после отказа положим предположение о том, что в памяти каждого ядра есть таблицы назначения задач для номинальной ситуации, а также для ситуаций отказа любого из ядер. В результате после принятия решения об отказе данное ядро знает, где будут решаться задачи отказавшего модуля. При этом возможно, что какие-то из этих задач будет исполнять оно. Переход на повышенную вычислительную нагрузку потребует повышения тактовой частоты и напряжения питания путем направления в устройство параметрического управления соответствующих кодов настройки. Аналогична описанной процедура возвращения восстановленного ядра в состав системы. Действительно, ядра, которые взяли на себя после отказа исполнение дополнительных задач, убедившись в процессе взаимных проверок в работоспособности восстановленного ядра, прекращают исполнение дополнительных задач. Важно, что никакого влияния на другие ядра данное ядро не будет оказывать, а значит, и в случае если отказало именно оно, с его стороны не будет никакого неадекватного влияния.

Анализ диагностического эксперимента

В рамках РМС-модели могут быть реализованы различные подходы, но для всех них справедливы достаточные условия t -диагностируемости (локализации t отказавших ядер) в системе из n ядер [19, 20]:

- 1) $n \geq 2t + 1$;
- 2) не существует двух ядер, проверяющих друг друга;
- 3) каждое ядро проверяется минимум t ядрами.

Можно выделить два наиболее распространенных подхода. Первый рассчитан на случай $t = 1$ и предполагает выделение в графе межъядерных связей системы гамильтонова цикла (цикла, проходящего через все вершины системы, причем через каждую из них не более чем по одному разу). Далее каждое ядро проверяет лишь одно ядро системы, а именно следующее за ним в гамильтоновом цикле. Ясно, этот диагностический эксперимент удовлетворяет приведенным достаточным условиям. Во втором подходе гамильтонов цикл не выделяется, а каждое ядро проверяет всех своих непосредственных соседей. При этом, очевидно, число проверок зависит от числа соседей, т. е. геометрии связей, реализованной в коммуникационной системе.

Пример 2. Рассмотрим эксперимент, в котором используется гамильтонов цикл в системе из трех ядер.

В табл. 2 приведены синдромы проверок. Ее строки сопоставлены с отказами ядер, а столбцы — с проверками. В таблице «0» означает положительный, «1» — отрицательный, «х» — неопределенный результат проверки. Из таблицы видно, что при любом варианте ее доопределения строки таблицы не будут совпадать, а значит, отказы будут различимы.

Проанализируем требования, предъявляемые к коммуникационной системе. Как уже отмечалось, общая память системы коммуникаций разделена на области, соотносимые с информационными связями конкретных пар ядер. Понятно, что, с одной стороны, число таких связей необходимо сокращать в целях сокращения площа-

■ **Таблица 2.** Синдромы проверок

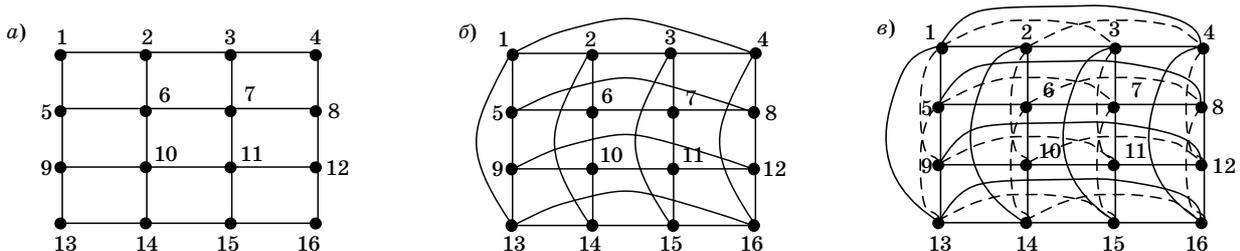
■ **Table 2.** Check results

Отказ	Проверка		
	1→2	2→3	3→1
1	х	0	1
2	1	х	0
3	0	1	х

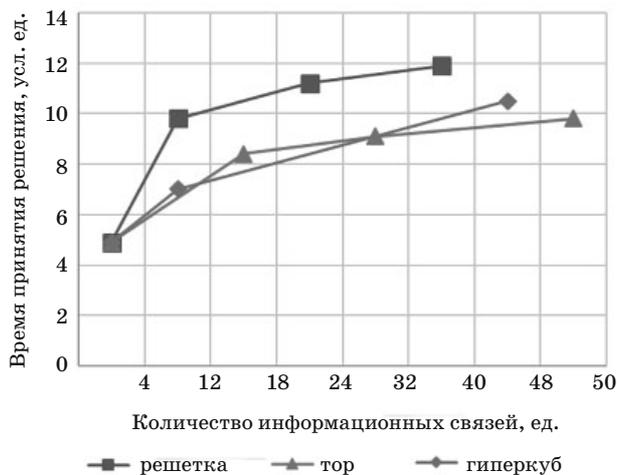
ди кристалла, отведенной под общую память. Однако, с другой стороны, число и геометрия этих связей влияют на эффективность диагностического эксперимента. Действительно, применяемая коммуникационная система должна не только допускать организацию в системе принятого диагностического эксперимента, но и не увеличивать чрезмерно его длительность, оставаясь в заданных ограничениях по площади кристалла. Для проектирования коммуникационной системы необходимо располагать значениями ее соответствующих характеристик. Для получения таких характеристик было проведено моделирование в среде YACSIM [21]. При этом исследовались коммуникационные системы трех типов: решетка, тор, гиперкуб [22, 23] (рис. 3, а–в).

Целевой характеристикой моделирования была длительность диагностического эксперимента, включающего взаимные межпроцессорные проверки и сбор всех результатов в каждом из процессоров. Моделирование проводилось в предположении, что реализуется эксперимент с проверкой соседних ядер, причем время проверки одного ядра другим было принято равным 2,1 усл. ед., а время трансляции диагностической информации со входа ядра на его выход — равным 1,4 усл. ед.

Для каждого из трех типов на рис. 4 приведены зависимости этой характеристики от числа реализуемых информационных связей (объема используемой общей памяти). Последовательности



■ **Рис. 3.** Графы межъядерных связей в системе на кристалле: а — решетка; б — тор; в — гиперкуб
 ■ **Fig. 3.** Variants of intercore links in a SoC: а — grid; б — torus; в — hypercube



■ **Рис. 4.** Результаты моделирования
 ■ **Fig. 4.** Simulation results

расчетных точек на графиках соответствуют последовательности размерностей коммуникационной системы — 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 .

Литература

1. Dongarra J., Herault T., Robert Y. *Fault Tolerance Techniques for High-Performance Computing*. In: *Fault-Tolerance Techniques for High-Performance Computing* / ed. by Thomas Herault, Yves Robert. Cham, Springer International Publishing, 2015. Pp. 3–85. doi:10.1007/978-3-319-20943-2
2. Neelutpol G., Lakshmi P. S. Fault tolerance in distributed real time environment: a survey. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2015, vol. 4, iss. 6, pp. 829–836.
3. Mengfei Y., Gengxin H., Yanjun F., Jian G. *Fault-Tolerance Techniques for Spacecraft Control Computers*. Wiley, 2017. 344 p. doi:10.1002/9781119107392
4. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Distributed Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. In: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2016. Pp. 467–518. doi:10.1007/978-3-662-47943-8_10
5. Karavai M. F., Podlazov V. S. Extended generalized hypercube as fail-safe system network for multiprocessor systems. *Autom. Remote Control*, 2015, no. 2, pp. 336–352. doi:10.1134/S0005117915020137
6. Cannella E., Stefanov T. P. Energy efficient semi-partitioned scheduling for embedded multiprocessor streaming systems. *Design Automation for Embedded Systems*, September 2016, vol. 20, iss. 3, pp. 239–266. doi:10.1049/iet-wss.2011.0125
7. Dorransoro B., Nesmachnow S., Taheri J., Zomaya A., Talbi E.-G., Bouvry P. A hierarchical approach for energy-efficient scheduling of large workloads in multi-

В ходе диагностического эксперимента получено, что наиболее эффективной коммуникационной системой с точки зрения времени принятия решений является схема типа тор.

Заключение

В настоящей работе предложен подход к построению децентрализованной отказоустойчивой и энергоэффективной системы на многоядерном кристалле. Подход включает, во-первых, определение энергоэффективной архитектуры за счет введения в состав системы дополнительных ядер, сопровождающегося снижением тактовой частоты и напряжения питания, а, во-вторых, разработку процедур диагностирования и реконфигурации системы.

Финансовая поддержка

Работа поддержана грантом РФФИ 19-08-00052.

- core distributed systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2014, vol. 4, pp. 252–261. doi:10.1016/j.suscom.2014.08.003
8. Panda P. R., Shrivastava A., Silpa B. V. N., Gummidi K. *Power-Efficient System Design*. Springer US, 2010. 260 p. doi:10.1007/978-1-4419-6388-8
9. Rubavani R., Saranraj S., Saranya S., Ranjani Devi R. Power efficient scheduling for network on chip applications on multicore processor. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 7, pp. 4751–4757.
10. Patton R. J., Frank P. M., Clark R. N. *Issues in fault diagnosis for dynamic systems*. London, Springer-Verlag, 2000. 597 p. doi:10.1007/978-1-4471-3644-6
11. Isermann R. *Fault Diagnosis Application*. Heidelberg, Springer, 2011. 354 p. doi:10.1007/978-3-642-12767-0
12. Kaldmuae A., Kotta U., Jiang B., Shumsky A., and Zhirabok A. Measurement feedback disturbance decoupling in discrete-time nonlinear systems. *Automatica*, 2013, vol. 49, no. 9, pp. 2887–2891. doi:10.1016/j.automatica.2013.06.013
13. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Tolmacheva M. V. Event monitoring of parallel computations. *Int. J. Applied Mathematics and Computer Science*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 311–321. doi:10.1515/amcs-2015-0024
14. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V., Tolmacheva M. V. Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, iss. 24, pp. 1075–1082. doi:10.1016/j.ifacol.2018.09.724

15. Романкевич В. А. Самотестирование многопроцессорных систем с регулярными диагностическими связями. *Автоматика и телемеханика*, 2017, № 2, с. 115–127. doi:10.1134/S0005117917020084
16. Haider S., Nazir B. Fault tolerance in computational grids: perspectives, challenges, and issues. *Springer-Plus*, 2016, vol. 5, no. 1, p. 1991. doi:10.1186/s40064-016-3669-0
17. Teng Y.-H., Lin C.-K. A test round controllable local diagnosis algorithm under the PMC diagnosis model. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, vol. 244, pp. 613–623. doi:10.1016/j.amc.2014.07.036
18. Cloud M. J., Drachman B. C., Lebedev L. P. *Inequalities. With applications to engineering*. 2nd ed. Springer International Publishing, 2014. 239 p. doi:10.1007/978-3-319-05311-0
19. Min X., Liangcheng Y., Jiarong L. A t/k diagnosis algorithm on hypercube-like networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2017, vol. 30, e4358. doi:10.1002/cpe.4358
20. Димитриев Ю. К. Необходимые и достаточные условия t -диагностируемости многопроцессорных вычислительных систем для разных моделей ненадежного тестирования, полученные с помощью теоретико-графовой модели системы. *Автоматика и телемеханика*, 2016, № 6, с. 145–158. doi:10.1134/S0005117916060096
21. Молдованова О. В. Адаптивный алгоритм децентрализованной самодиагностики распределенных вычислительных систем. *Вестник СибГУТИ*, 2013, № 2, с. 22–30.
22. Shuming Z., Limei L., li X., Dajin W. The diagnosability of star graph networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, vol. 64, no. 2, pp. 547–555. doi:10.1109/TC.2013.228
23. Lidan Wang, Ningning Liu, Cheng-Kuan Lin, Tzu-Liang Kung, Yuan-Hsiang Teng. A diagnosis algorithm on the 2D-torus network. *Proc. of the 12th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2018)*, pp. 620–625. doi:10.1007/978-3-319-93554-6_60

UDC 621.38

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-9-18

Fault-tolerant and energy-efficient MCSoC for information processing and controlA. M. Gruzlikov^a, PhD, Tech., Head of Department, orcid.org/0000-0001-8814-0726N. V. Kolesov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3287-7504, kolesovnv@mail.ruD. V. Kostygov^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0003-4379-5803M. V. Tolmacheva^a, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-0795-7617^aConcern CSRI Elektropribor, JSC State Research Center of Russia, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The majority of real complex systems are designed with respect to fault tolerance requirements. However, all the known approaches are intended only to increase reliability. **Purpose:** An approach for designing fault-tolerant systems on a chip, aimed not only at increasing the reliability, but also at reducing the energy consumed by the system. **Results:** A two-stage approach to the design of fault-tolerant multicore systems-on-chip (MCSoCs) is proposed. At the first stage, an energy-efficient architecture of the designed system is formed. For each core used in the system, the optimal number of additional cores is determined within the framework of the imposed restrictions. The optimality criterion is the minimum power consumed by the system. The algorithm proposed for the formation of an energy-efficient architecture is based on the dependence of the power consumed in the system on the values of the supply voltage and the clock frequency. At the second stage, a procedure for diagnosing and repairing the system is developed which uses the principles of system-level diagnosis, involving mutual checks between the system cores. This procedure allows you to decentralize the process of diagnosing and restoring the system after a failure. Additionally, the article examines the organization of the communication subsystem based on shared memory. The study is based on a simulation conducted in order to estimate the time for making a decision about a failure in systems such as a lattice, torus and hypercube. **Practical relevance:** The proposed approach allows a system to provide the necessary values for its two most important characteristics: fault tolerance and energy efficiency. At the same time, decentralization is ensured when making decisions about a failure and restoration. As a result, the system becomes more reliable.

Keywords — fault tolerance, PMC model, decentralized system, energy efficiency, multicore system-on-chip (MCSoC).

For citation: Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Kostygov D. V., Tolmacheva M. V. Fault-tolerant and energy-efficient MCSoC for information processing and control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 9–18 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-9-18

References

1. Dongarra J., Heralut T., Robert Y. *Fault Tolerance Techniques for High-Performance Computing*. In: *Fault-Tolerance Techniques for High-Performance Computing*. Ed. by Thomas Heralut, Yves Robert. Cham, Springer International Publishing, 2015. Pp. 3–85. doi:10.1007/978-3-319-20943-2
2. Neelutpol G., Lakshmi P. S. Fault tolerance in distributed real time environment: a survey. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2015, vol. 4, iss. 6, pp. 829–836.
3. Mengfei Y., Gengxin H., Yanjun F., Jian G. *Fault-Tolerance Techniques for Spacecraft Control Computers*. Wiley, 2017. 344 p. doi:10.1002/9781119107392
4. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Distributed Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. In: *Diag-*

- nosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2016. Pp. 467–518. doi:10.1007/978-3-662-47943-8_10
5. Karavai M. F., Podlazov V. S. Extended generalized hypercube as fail-safe system network for multiprocessor systems. *Autom. Remote Control*, 2015, no. 2, pp. 336–352. doi:10.1134/S0005117915020137
 6. Cannella E., Stefanov T. P. Energy efficient semi-partitioned scheduling for embedded multiprocessor streaming systems. *Design Automation for Embedded Systems*, September 2016, vol. 20, iss. 3, pp. 239–266. doi:10.1049/iet-wss.2011.0125
 7. Dorransoro B., Nesmachnow S., Taheri J., Zomaya A., Talbi E.-G., Bouvry P. A hierarchical approach for energy-efficient scheduling of large workloads in multicore distributed systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2014, vol. 4, pp. 252–261. doi:10.1016/j.suscom.2014.08.003
 8. Panda P. R., Shrivastava A., Silpa B. V. N., Gummidipudi K. *Power-efficient System Design*. Springer US, 2010. 260 p. doi:10.1007/978-1-4419-6388-8
 9. Rubavani R., Saranraj S., Saranya S., Ranjani Devi R. Power efficient scheduling for network on chip applications on multicore processor. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 7, pp. 4751–4757.
 10. Patton R. J., Frank P. M., Clark R. N. *Issues in fault diagnosis for dynamic systems*. London, Springer-Verlag, 2000. 597 p. doi:10.1007/978-1-4471-3644-6
 11. Isermann R. *Fault Diagnosis Application*. Heidelberg, Springer, 2011. 354 p. doi:10.1007/978-3-642-12767-0
 12. Kaldmuae A., Kotta U., Jiang B., Shumsky A., and Zhirabok A. Measurement feedback disturbance decoupling in discrete-time nonlinear systems. *Automatica*, 2013, vol. 49, no. 9, pp. 2887–2891. doi:10.1016/j.automatica.2013.06.013
 13. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Tolmacheva M. V. Event monitoring of parallel computations. *Int. J. Applied Mathematics and Computer Science*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 311–321. doi:10.1515/amcs-2015-0024
 14. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V., Tolmacheva M. V. Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, iss. 24, pp. 1075–1082. doi:10.1016/j.ifacol.2018.09.724
 15. Romankevich V. A. Self-testing of multiprocessor systems with regular diagnostic connections. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, iss. 2, pp. 289–299 (In Russian). doi:10.1134/S0005117917020084
 16. Haider S., Nazir B. Fault tolerance in computational grids: perspectives, challenges, and issues. *SpringerPlus*, 2016, vol. 5, no. 1, p. 1991. doi:10.1186/s40064-016-3669-0
 17. Teng Y.-H., Lin C.-K. A test round controllable local diagnosis algorithm under the PMC diagnosis model. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, vol. 244, pp. 613–623. doi:10.1016/j.amc.2014.07.036
 18. Cloud M. J., Drachman B. C., Lebedev L. P. *Inequalities. With applications to engineering*. 2nd ed. Springer International Publishing, 2014. 239 p. doi:10.1007/978-3-319-05311-0
 19. Min X., Liangcheng Y., Jiarong L. A t/k diagnosis algorithm on hypercube-like networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2017, vol. 30, e4358. doi:10.1002/cpe.4358
 20. Dimitriev Yu. K. Necessary and sufficient conditions for t -diagnosability of multiprocessor computer systems for various models of nonreliable testing established using the system graph-theoretical model. *Automation and Remote Control*, 2016, vol. 77, iss. 6, pp. 1060–1070 (In Russian). doi:10.1134/S0005117916060096
 21. Moldovanova O. V. Adaptivnyj algoritm decentralizovannoj samodiagnostiki raspredelennyh vychislitel'nyh sistem. *Vestnik SibGUTI*, 2013, no. 2, pp. 22–30 (In Russian).
 22. Shuming Z., Limei L., Li X., Dajin W. The diagnosability of star graph networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, vol. 64, no. 2 pp. 547–555. doi:10.1109/TC.2013.228
 23. Lidan Wang, Ningning Liu, Cheng-Kuan Lin, Tzu-Liang Kung, Yuan-Hsiang Teng. A diagnosis algorithm on the 2D-torus network. *Proc. of the 12th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2018)*, pp. 620–625. doi:10.1007/978-3-319-93554-6_60

Персонализация предоставления информации на электронных табло: основные требования и методология

Н. Г. Шилов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-9264-9127, nick@iias.spb.su
^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: использование электронных табло является в настоящее время весьма популярным способом предоставления информации. Однако персонализированное (ориентированное на интересы и предпочтения конкретного пользователя) и контекстуализированное (учитывающее текущую ситуацию) предоставление информации данным способом подвержено ряду технологических и законодательных ограничений. **Цель:** разработка методологии функционирования систем предоставления персонализированной информации на электронных табло. **Результаты:** специфицированы требования к системам предоставления персонализированной информации на электронных табло: анонимность пользователей, динамическая оценка их интересов, кластеризация пользователей, структурированное хранение и обработка их интересов и предпочтений, ситуационная осведомленность. Определены принципы их функционирования, учитывающие необходимость соблюдения конфиденциальности персональных данных: сбор информации без активного участия пользователей, использование анонимных профилей, самообучение и адаптация, онтологическое моделирование интересов и предпочтений, применение технологии управления контекстом. Предложена оригинальная методология функционирования систем рассматриваемого класса, отличающаяся наличием обратной связи для уточнения предоставляемой информации и информации о пользователях и отсутствием необходимости ввода данных самими пользователями. Обратная связь осуществляется за счет применения методов анализа изображений пользователей, позволяющих достаточно точно определять время, потраченное пользователями на просмотр электронного табло, а также их пол, возраст и эмоции. Проведена частичная апробация результатов в части оценки визуальных характеристик человека на основе анализа фотографии. Выявлено, что существующие программные средства позволяют оценивать визуальные характеристики людей (пол, возраст, эмоциональное состояние) с высокой точностью, а просмотр анимированных изображений может влиять на эмоциональное состояние человека. **Практическая значимость:** предложенные требования, принципы и методология могут быть использованы при создании таких систем предоставления персонализированной информации неограниченному кругу лиц, как цифровые вывески и электронные табло.

Ключевые слова – персонализация, контекстуализация, предоставление информации, анализ изображений, электронные табло.

Для цитирования: Шилов Н. Г. Персонализация предоставления информации на электронных табло: основные требования и методология. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 19–28. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-19-28

For citation: Shilov N. G. Personalization of information delivery through digital signage: major requirements and methodology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 19–28 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-19-28

Введение

Сегодня предоставление информации неразрывно связано с вопросами персонализации (учетом интересов и предпочтений конкретного пользователя) и контекстуализации (учетом текущей ситуации). Системы предоставления информации и поддержки принятия решений должны анализировать предпочтения и информационные потребности конкретного пользователя, а также учитывать состояние окружающей среды (текущей ситуации), поскольку в противном случае пользователь может буквально потеряться в больших объемах доступной сегодня информации. В результате улучшение технологий персонализации, а также контекстная зависимость стали объектами усиленного внимания мирового научного сообщества [1, 2]. Таргетированная реклама является весьма хорошим примером предоставления

подобной информации [3, 4]. Она достаточно интенсивно используется такими интернет-ориентированными компаниями, как, например, Google и Microsoft. Однако в этом случае информация предоставляется одному конкретному пользователю.

В то же время большие электронные табло (Digital Signage [5, 6]) могут являться весьма эффективным способом предоставления информации, например, в инфраструктуре умного города [7], поскольку их может видеть одновременно большое количество людей. Сегодня такие экраны уже достаточно широко распространены, и их можно увидеть как в общественно доступных местах (торговых комплексах, выставочных центрах), так и в местах, доступных ограниченному кругу лиц (жилых помещениях, офисах). Электронные табло используются для предоставления информации как рекламного характера, так и некоммерческой.

Однако эффективное предоставление информации сегодня практически невозможно без ее персонализации, а применение подходов, используемых в области таргетированной рекламы на экранах персональных компьютеров и смартфонов, невозможно в связи с рядом проблем. Например, необходимо определить, какая информация будет интересна не одному человеку, а всем (или хотя бы большинству) зрителям, находящимся у экрана, т. е. необходимо определить общие для них интересы и предпочтения. Другим немаловажным вопросом является обеспечение конфиденциальности предпочтения и интересов пользователей, поскольку предоставление персонализированной информации группе зрителей может ее нарушить.

В статье представлены результаты исследований, ориентированных на решение проблемы предоставления персонализированной информации посредством электронных табло.

Обзор состояния исследований

Поскольку основной рассматриваемой областью приложения результатов данного исследования является таргетированная реклама и представление информации на электронных табло, при выполнении обзора состояния исследований был сделан акцент на результаты исследований, относящиеся к данной области.

В первую очередь необходимо уделить внимание наличию Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных» от 27 июля 2006 г. [8], а также подобным законам в других странах, например, Общим правилам защиты данных (General Rules for Data Protection in Europe — GDPR [9]). За исключением особых случаев, не относящихся к настоящему исследованию, данный закон обязывает при работе с персональными данными регистрироваться в уполномоченных органах, а также получать письменное согласие субъекта персональных данных на обработку своих персональных данных. Поскольку в условиях предоставления информации группам пользователей получение такого согласия является затруднительным, в исследовании мы будем ориентироваться на работу с деперсонализированными (анонимными) данными. Схожие проблемы отмечаются и в зарубежных исследованиях в силу существования подобных законов [10, 11].

Задача профилирования пользователей не является новой. Существует достаточно много работ, позволяющих создавать эффективные профили пользователей для различных задач, например [12–14]. Однако задача создания профилей пользователей или групп пользователей

с учетом конфиденциальности еще только начинает привлекать интерес научного сообщества [15, 16], а задача разработки анонимных профилей на сегодня является новой.

В результате анализа литературы было найдено лишь небольшое количество научных работ в области классификации предпочтений и интересов пользователей. Работа [17] частично решает задачу формирования хорошо структурированных профилей предпочтений. Значительное внимание уделено данной задаче в работе [18], однако она в большей степени посвящена исследованию вопросов категоризации «нравится» — не нравится», а не классификации предпочтений как таковой. Полезная работа [19], где интересы пользователей классифицируются с использованием классификации понятий Википедии, что является весьма эффективным подходом. Кроме того, авторы предлагают метод оценки близости категорий статей Википедии, что также может быть полезным для анализа интересов и предпочтений.

В системах поддержки принятия решений для персонализации и поддержки семантической целостности собираемой информации хорошо зарекомендовали себя онтологии [20–22], которые обычно используются для единого описания знаний некоторой проблемной области и являются весьма надежным и эффективным инструментом.

Определение предпочтений пользователей является достаточно сложной задачей, поскольку «заставить» людей вручную устанавливать настройки в приложении или на веб-странице оказывается затруднительно; а ввиду необходимости поддержки анонимности обрабатываемых данных использование социальных сетей для поиска конкретного человека и выявления его предпочтений не является допустимым. В работе [23] предложен способ динамической оценки того, насколько предоставляемая информация интересна пользователю. С этой целью использовался метод интеллектуальной видеоаналитики (IVA), с помощью которого определялось, насколько внимательно человек смотрит на экран при показе той или иной информации (например, смотрит внимательно, время от времени поглядывает или игнорирует). Данный метод является весьма полезным для оценки интересов пользователей. Для анонимного сбора данных авторы используют методы анонимной видеоаналитики (AVA), являющейся подклассом IVA. В работе [24] также анализируется уровень интереса зрителей к отображаемой информации и оцениваются следующие параметры: расстояние до человека, время пребывания возле экрана, количество зрителей, время, уделенное просмотру информации, количество обращений к экрану, а также пол и возрастная группа зри-

теля. Поскольку в настоящее время алгоритмы машинного обучения позволяют достаточно точно определять пол, возраст и настроение человека [25–27], применение данного метода может позволить выявлять целевые группы и анализировать их интересы, а также уточнять их посредством анализа корреляции между вниманием пользователей определенного типа и содержанием информационных объявлений.

Спецификация требований к системам предоставления персонализированной информации на электронных табло

На основе проведенного анализа проблемной области были специфицированы следующие требования к системам предоставления персонализированной информации на электронных табло.

1. Анонимность зрителей (пользователей).

Требование анонимности пользователей вытекает из необходимости следования законам РФ и других государств [8, 9]. Безусловно, выполнение данных законов не обязательно требует полной анонимности. Например, если мы рассматриваем систему, установленную в офисе компании, где число пользователей ограничено, и все они согласятся подписать разрешение на использование персональных данных, то решение проблемы обеспечения анонимности значительно облегчается. Однако это скорее исключительный случай, в то время как цифровые табло, установленные в общедоступных местах, встречаются существенно чаще.

2. Динамическая оценка интересов пользователей.

Проблема оценки релевантности информации, предоставляемой пользователям на электронных табло, является актуальной. С одной стороны, по причине возможного нарушения конфиденциальности, в таких системах нельзя использовать собранную информацию о действиях конкретного пользователя, как это делают, например, Google и Amazon в своих системах предоставления таргетированной рекламы в интернет-обозревателях [3]. С другой стороны, явная обратная связь также невозможна из-за большого количества потенциальных пользователей, которые вряд ли согласятся тратить свое время на заполнение анкет (даже коротких). В результате системы предоставления персонализированной информации на электронных табло должны быть способны отслеживать, насколько пользователю интересна предоставляемая информация, в целях повышения степени «понимания» интересов пользователя, оценивать соответствие предоставляемой информации тем или иным интересам, а также адаптировать свою работу к изменяющимся интересам пользователя.

3. Кластеризация пользователей.

Определение групп пользователей в зависимости от их возможного отношения к предоставляемой информации является ключевым элементом системы предоставления персонализированной информации на электронных табло. Кластеризация пользователей в зависимости от их интересов является необходимым требованием к работе систем выявления общих предпочтений групп пользователей с учетом их конфиденциальности. Таким кластерам могут быть приписаны типичные визуальные характеристики — возраст, пол и настроение пользователя.

4. Структурированное хранение и обработка интересов и предпочтений пользователей.

В силу необходимости обработки интересов пользователей, а также соотнесения их с предоставляемой информацией структурированное хранение интересов и предпочтений является необходимым условием работы систем рассматриваемого класса. Такое хранение может быть организовано различными способами.

5. Ситуационная осведомленность.

Ситуационная осведомленность (учет текущей ситуации) не столько является необходимой для персонализации, сколько позволяет существенно повысить точность соответствия предоставляемой информации интересам пользователей. Данное требование подразумевает учет таких внешних факторов, как время года, время суток, наличие каких-либо событий (например, чемпионат мира по футболу) и других (в зависимости от цели конкретной системы набор факторов может быть различен). Данные факторы влияют на интересы пользователей, а их учет позволит повысить качество предсказания их интересов.

Принципы работы систем предоставления персонализированной информации на электронных табло

На основе вышеуказанных требований были определены следующие принципы построения систем предоставления персонализированной информации на электронных табло.

1. Сбор информации о пользователях без их активного участия.

Системы, направленные на выявления общих предпочтений групп пользователей, как правило, ориентированы на большое число пользователей. Однако сбор информации от пользователей, обычно подразумевающий необходимость выполнения ими определенных действий (ввод информации, заполнение анкет, оценку результатов работы системы и др.), в случае систем предоставления информации на электронных табло не может являться надежным источником информации,

поскольку лишь малая часть пользователей согласится потратить свое время на ввод данных в систему. Следовательно, система должна собирать информацию, анализируя действия пользователей и не требуя от них каких-либо действий (например, анализируя, сколько времени пользователи тратят на просмотр предоставленной информации). Сегодня в чем-то схожие принципы используются рядом «информационных гигантов», таких как Microsoft, Google, Amazon [3] посредством анализа истории просмотра интернет-ресурсов. В случае с электронными табло этот же принцип требует отличной реализации, предполагающей анализ внимания пользователей к показанной информации.

2. Использование анонимных профилей интересов и предпочтений пользователей.

Как было указано в обзоре, российское и зарубежное законодательства запрещают использовать персональные данные без письменного согласия пользователей. Учитывая то, что системы выявления общих предпочтений групп пользователей, как правило, ориентированы на большое число пользователей, получение таких согласий в подавляющем числе случаев не представляется возможным. В связи с этим в системах рассматриваемого класса предполагается реализация анонимных профилей интересов и предпочтений пользователей, не допускающих идентификацию пользователей и отслеживание их действий. Анонимные профили являются новым оригинальным направлением. В некотором смысле анонимные профили являются шаблонами пользователей, включающими, кроме их интересов и предпочтений, такие характеристики, как возраст, пол, настроение (те характеристики, которые в настоящее время могут быть определены на основе использования методов видеоаналитики). Однако они имеют более сложную структуру, поскольку пользователи с одинаковыми характеристиками могут иметь различные интересы, которые необходимо анализировать.

3. Самообучение и адаптация в зависимости от реакции пользователя.

Принцип подразумевает непрерывный анализ отношения пользователей к отображаемой информации, а именно оценку их заинтересованности в данной информации посредством измерения времени, потраченного пользователем на внимательный просмотр информации, число взглядов на экран или их отсутствие (пользователь игнорирует информацию). Также возможна оценка изменения настроения пользователя в зависимости от увиденной информации. Такая оценка «в динамике», т. е. при изменении отображаемой информации, позволит сделать выводы о том, насколько она интересна и полезна пользователю. Подобные методы используются в раз-

личных исследованиях, однако при обзоре состояния дел в рассматриваемой области не было найдено систем или подходов, использующих их как инструмент обратной связи с пользователем.

4. Онтологическое моделирование интересов и предпочтений пользователей.

Одним из наиболее эффективных решений проблемы структурированного представления предпочтений с возможностью автоматической обработки являются онтологии. Хотя на настоящий момент не было найдено онтологий, описывающих различные интересы, данный подход нельзя назвать новым (зачастую сегодня такое представление используется в достаточно узких областях), однако именно это решение позволяет эффективно выполнить поиск общих интересов с возможностью анализа их семантической близости и обобщения [4].

5. Применение технологии управления контекстом для оценки текущей ситуации.

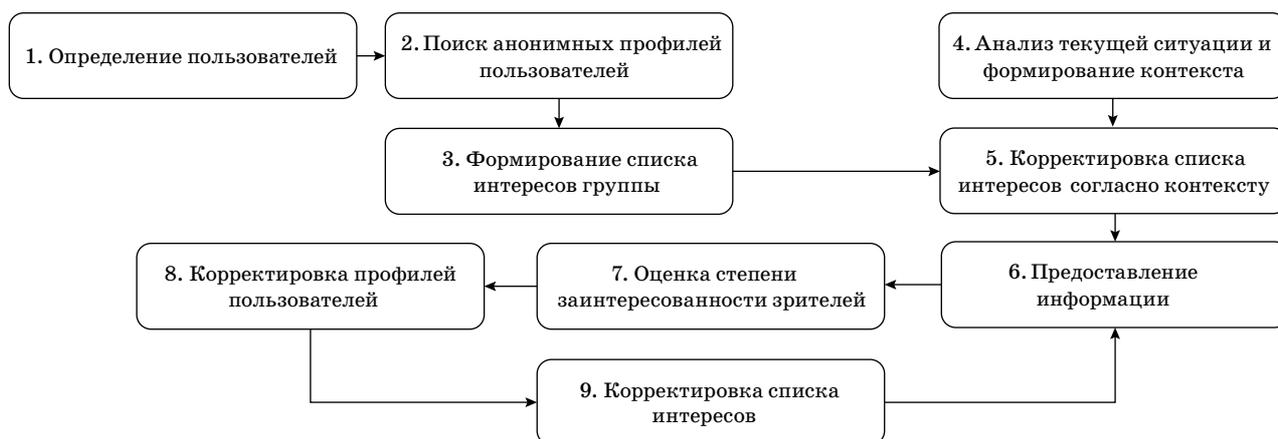
Технологии управления контекстом на сегодня являются наиболее перспективным инструментом для поддержки задач ситуационной осведомленности в различных системах [28–30]. Данный принцип не является новым, но использование контекста для оценки текущей ситуации может существенно повысить качество предоставляемой информации, поскольку позволит учесть ряд внешних факторов (время года, время суток, наличие каких-либо событий), не относящихся непосредственно к пользователям.

Методология функционирования систем предоставления персонализированной информации на электронных табло

В данном разделе предложена оригинальная методология функционирования систем предоставления персонализированной информации на электронных табло, ориентированная на выявление предпочтений групп пользователей с учетом их конфиденциальности. Данная методология основана на принципах, определенных выше, и отличается наличием обратной связи для уточнения предоставляемой информации, а также информации о пользователях. Согласно предложенной методологии, работа систем, направленных на выявление общих предпочтений групп пользователей с учетом их конфиденциальности, включает следующие шаги (рис. 1).

1. Определение пользователей: получение изображений людей, находящихся перед экраном, и анализ каждого из них на основе оценки его (ее) визуальных характеристик (пола, возраста, настроения).

2. Поиск анонимных профилей, соответствующих полученным характеристикам пользовате-



■ **Рис. 1.** Общая схема функционирования систем предоставления персонализированной информации на электронных табло

■ **Fig. 1.** The general scheme of the functioning of the systems delivering personalized information through digital signage

лей (для каждого пользователя может быть найдено несколько анонимных профилей); формирование списков интересов для отдельных пользователей, находящихся перед экраном, на основе анализа найденных анонимных профилей.

3. Формирование списка интересов для всей группы пользователей (разработанный ранее автором онтолого-ориентированный метод поиска общих для группы пользователей предпочтений [4] заключается в анализе семантической близости и обобщении предпочтений).

4. Анализ текущей ситуации и формирование контекста. Шаг 4 может быть выполнен одновременно с шагами 1–3.

5. Корректировка списка интересов группы пользователей согласно сформированному контексту, выбор информации (информационных фрагментов), соответствующей списку интересов.

6. Предоставление информации группе пользователей.

7. Мониторинг поведения пользователей и оценка степени заинтересованности отдельными пользователями предоставленной информацией.

8. Выполнение корректировки списка анонимных профилей в соответствии с результатами мониторинга.

9. Выполнение корректировки списка интересов и обновление отображаемой информации.

При появлении перед экраном новых пользователей для них выполняются шаги 1–2, а для всей группы — шаги 3, 5–9. При выходе пользователей из зоны наблюдения связанные с ними анонимные профили исключаются, и шаги 3, 5–9 повторяются для оставшейся группы пользователей. Если группа пользователей остается неизменной, повторяются шаги 7–9. Однако при повторе шагов необходимо следить, чтобы инфор-

мация на экране не менялась слишком часто, что может затруднить ее восприятие.

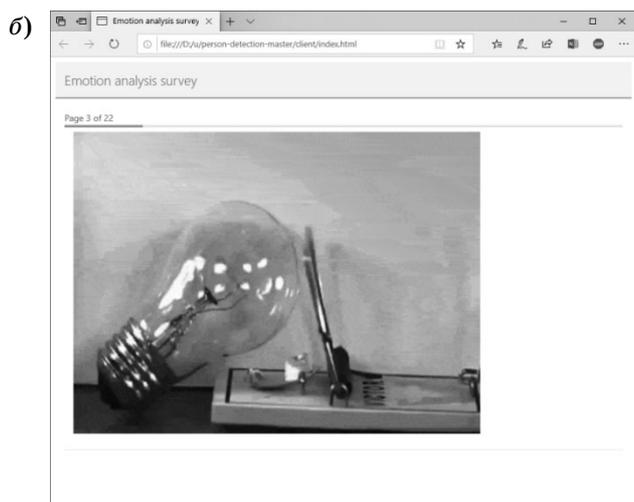
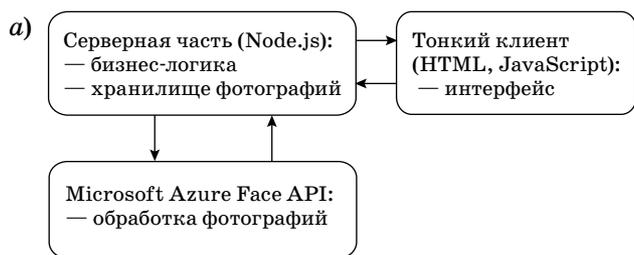
Результаты эксперимента

Для оценки возможности изменить эмоциональное состояние человека благодаря просмотру информационного фрагмента (изображения) был проведен эксперимент. Для этого был разработан программный макет, имеющий архитектуру клиент-сервер (в качестве сервера использовался Node.js) и использующий сервис Microsoft Azure Face API для обработки фотографий участников эксперимента (рис. 2, а). Данный программный макет является составной частью разрабатываемого в настоящее время прототипа системы предоставления персонализированной информации на электронном табло.

Участниками эксперимента являлись 13 мужчин в возрасте 23–42 лет и 6 женщин в возрасте 27–56 лет. Каждому участнику в случайном порядке были показаны 10 коротких анимированных изображений (рис. 2, б). Участник должен был просмотреть каждое изображение в течение 5 секунд. За это время осуществлялась фото-съемка участника с частотой 10 кадров в секунду (рис. 3). Полученные фотографии были обработаны при помощи сервиса Microsoft Azure Face API.

Вначале была выполнена оценка того, насколько точно Microsoft Azure Face API выполняет оценку возраста и пола. В рамках данного эксперимента пол участников был определен с точностью 100 %, а ошибка в определении возраста не превысила 4 года.

Далее была выполнена оценка того, можно ли пробудить эмоции у пользователей и оценить их.

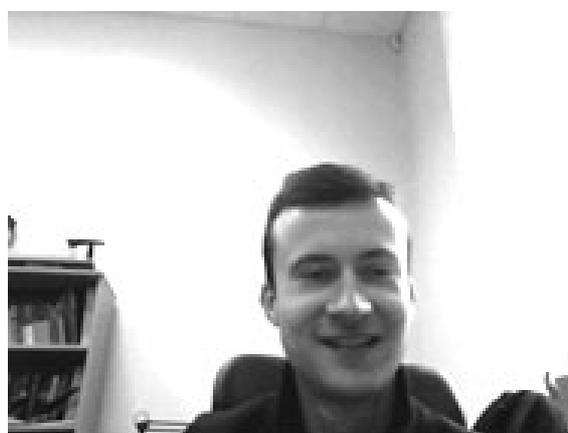
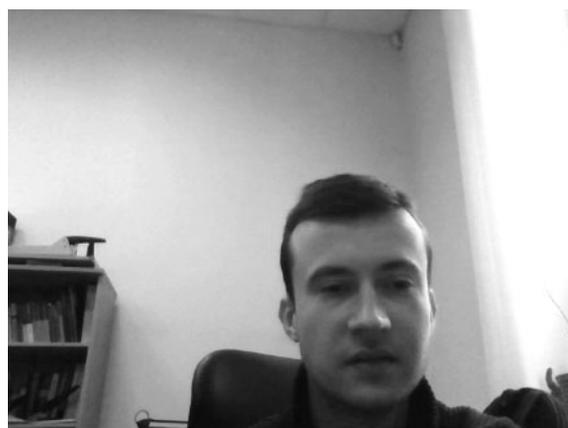


■ **Рис. 2.** Архитектура (a) и пример экранной формы (b) программного макета

■ **Fig. 2.** Architecture (a) and screenshot (b) of the software prototype designed for experimentation that presents an animated image of a braking bulb

Для этого было сделано предположение, какую эмоцию должно пробудить каждое из изображений. Результаты оценки изменения эмоционального состояния участников при просмотре изображений представлены в таблице.

В результате эксперимента было обнаружено, что доминантной эмоцией на подавляющем большинстве снимков было нейтральное состояние. Для оценки влияния изображений на эмоции были оценены минимальное, максимальное и среднее значения оценки эмоционального состояния, а также разница между минимальным и максимальным значениями и эмоциональным состоя-



■ **Рис. 3.** Примеры фотографий участника эксперимента с различными эмоциями

■ **Fig. 3.** Examples of photographs of an experiment participant with various emotions

- Эмоциональные состояния, ожидаемые и наблюдаемые от анимированных изображений
- Description of animated images together with expected and observed emotions of viewers

Описание	Ожидаемые эмоции	Наблюдаемые эмоции
Змея, плюющая ядом	Отвращение, страх	У 73 % участников состояние стало менее нейтральным, у трех участников зафиксировано незначительное увеличение показателей состояния злости, страха и отвращения

■ Окончание таблицы

■ Table continued

Описание	Ожидаемые эмоции	Наблюдаемые эмоции
Чудовище, внезапно появляющееся из темноты	Удивление, страх, отвращение	У 67 % участников состояние стало менее нейтральным, у 44 % повысился показатель состояния счастья, у двух участников зафиксировано незначительное удивление, у 27 % — увеличение презрительности и у 33 % — уменьшение презрительности
Счастливая пара, едущая на мотоцикле	Счастье	У 39 % участников снизился показатель состояния грусти, у 33 % повысился показатель состояния счастья, 56% участников стали менее нейтральными; у двух участников зафиксировано снижение показателя состояния злости, у одного — снижение показателя состояния отвращения
Забавный злой школьник	Счастье, нейтральное состояние	У 44 % участников состояние стало менее нейтральным, однако к концу просмотра у других 44 % состояние стало более нейтральным; у 28 % участников зафиксировано повышение показателя состояния счастья и снижение показателя состояния грусти
Разбивающаяся электролампа	Нейтральное состояние	У 44 % участников состояние стало более нейтральным
Группа школьников, нападающая на мальчика	Злость, грусть	У 39 % участников состояние стало менее нейтральным и менее счастливым, у 28 % — более грустным, у одного из участников зафиксировано незначительное повышение показателя злости
Плачущая женщина	Грусть	У 50 % участников зафиксировано повышение показателя состояния грусти, у 50 % — понижение показателя счастья
Человек, помогающий перевернувшегося жуку	Нейтральное состояние	У 50 % участников состояние стало более нейтральным, у 50 % зафиксировано понижение показателя счастья
Улыбающийся и танцующий мультипликационный персонаж	Счастье	У 33 % участников зафиксировано повышение показателя счастья, у 38 % — понижение показателя грусти
Женщина, танцующая на пляже с собакой	Счастье	У 50 % участников зафиксировано повышение показателя счастья, у 28 % — понижение показателя грусти

нием на первом и последнем снимках, сделанных при просмотре каждого анимированного изображения (Microsoft Azure Face API предоставляет оценку наличия каждого из эмоциональных состояний на фотографии человека по шкале от 0 до 1). Обычно разница в эмоциональном состоянии была весьма небольшой, однако, как видно из таблицы, демонстрация некоторых изображений достигла поставленной цели. Низкая эмоциональная реакция могла быть вызвана неспособностью участников эксперимента абстрагироваться от отвлекающих факторов, а также тем, что выбор изображений был сделан без консультаций с психологами.

Заключение

В статье предложен анализ проблемы предоставления персонализированной информации

посредством электронных табло, а также методология функционирования систем предоставления персонализированной информации на электронных табло, ориентированная на сохранение конфиденциальности персональных данных и использование неявной обратной связи для повышения качества персонализации. Обратная связь осуществляется за счет методов анализа изображений пользователей, позволяющих достаточно точно определять пол, возраст и эмоции людей.

Для оценки работоспособности предложенной методологии был проведен эксперимент, направленный на оценку возможности изменения эмоционального состояния человека при просмотре информации. Результат эксперимента показал, что существующие программные средства позволяют оценивать визуальные характеристики людей (пол, возраст, эмоциональное состояние) с высокой точностью, а просмотр анимирован-

ных изображений может влиять на эмоциональное состояние человека.

Дальнейшие исследования ориентированы на завершение работы над прототипом системы предоставления персонализированной информации на электронном табло и оценку работоспособности всей методологии в целом.

Литература

1. Gallacher S., Papadopoulou E., Abu-Shaaban Y., Taylor N. K., Williams M. H. Dynamic context-aware personalisation in a pervasive environment. *Pervasive Mobile Computing*, 2014, vol. 10, pp. 120–137.
2. Anagnostopoulos A., Broder A. Z., Gabrilovich E., Josifovski V., Riedel L. Just-in-time contextual advertising. *Proceedings of the sixteenth ACM Conference on Conference on Information and Knowledge Management — CIKM '07*, New York, NY, USA, ACM Press, 2007, pp. 331.
3. Muthukrishnan M., Tomkins A., Heck L., Gerami-fard A., Agarwal D. The future of artificially intelligent assistants. *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining — KDD '17*, New York, NY, USA, ACM Press, 2017, pp. 33–34.
4. Sandkuhl K., Smirnov A., Shilov N., Wißotzki M. Targeted digital signage: technologies, approaches and experiences. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of 18th International Conference, NEW2AN 2018, and 11th Conference, ruSMART 2018*, Saint-Petersburg, August 27–29, 2018/ O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy (Eds.), Springer, 2018, pp. 77–88.
5. Schaeffler J. *Digital Signage: Software, Networks, Advertising, and Displays: A Primer for Understanding the Business*. 1st ed. Focal Press, 2008. 296 p.
6. Want R., Schilit B. N. Interactive digital signage. *Computer*, 2012, vol. 45, no. 5, pp. 21–24.
7. Dustdar S., Nastić S., Šćekić O. *Smart Cities*. Cham, Springer International Publishing, 2017. 268 p.
8. Федеральный закон РФ от 27 июля 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных». 2006. *Российская газета*, 2006, 29 июля. <https://rg.ru/2006/07/29/personalnye-dannye-dok.html> (дата обращения: 12.04.2019).
9. GDPR — General Data Protection Regulation. <https://gdpr-info.eu/> (дата обращения: 22.03.2019).
10. Westermann H. *Change of Purpose: The effects of the Purpose Limitation Principle in the General Data Protection Regulation on Big Data Profiling*. Lund University, 2018. 86 p.
11. Salas J., Domingo-Ferrer J. Some basics on privacy techniques, anonymization and their big data challenges. *Mathematics in Computer Science*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 263–274.
12. Taniguchi Y. Content scheduling and adaptation for networked and context-aware digital signage: A literature survey. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 18–29.
13. Xie H., Zou D., Wang F. L., Wong T.-L., Rao Y., Wang S. H. Discover learning path for group users: A profile-based approach. *Neurocomputing*, 2017, vol. 254, pp. 59–70.
14. Roedler R., Kergl D., Rodosek G. D. Content driven profile matching across online social networks. *Proceedings of the 2017 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2017 — ASONAM '17*, New York, NY, USA, ACM Press, 2017, pp. 1049–1055.
15. Ahmed K. W., Hasan M. Z., Mohammed N. Image-centric social discovery using neural network under anonymity constraint. *2017 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*, IEEE, 2017, pp. 238–244.
16. Guo T., Dong K., Wang L., Yang M., Luo J. Privacy preserving profile matching for social networks. *2018 Sixth International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD)*, IEEE, 2018, pp. 263–268.
17. Bredereck R., Chen J., Woeginger G. J. Are there any nicely structured preference profiles nearby? *Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*, ACM Press, 2013. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2540140> (дата обращения: 12.04.2019).
18. Becker B. N. *Preference-Categorization: How Group Membership and Liking Affect Evaluative Scale Preference*. Texas A&M University, 2017. <http://hdl.handle.net/1969.1/161536> (дата обращения: 12.04.2019).
19. Kang J., Lee H. Modeling user interest in social media using news media and Wikipedia. *Information Systems*, 2017, vol. 65, pp. 52–64.
20. Pratiwi P. S., Xu Y., Li Y., Trost S. G., Clanchy K. M., Tjondronegoro D. W. User profile ontology to support personalization for e-Coaching systems. *ACM 12th International Workshop on Data and Text Mining in Biomedical Informatics Knowledge Management in Healthcare (DTMBio 2018)*, 2018. <https://eprints.qut.edu.au/121443/> (дата обращения: 12.04.2019).
21. Subramaniaswamy V., Manogaran G., Logesh R., Vijayakumar V., Chilamkurti N., Malathi D., Senthilselvan N. An ontology-driven personalized food recommendation in IoT-based healthcare system. *Journal of Supercomputing*, 2018. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11227-018-2331-8> (дата обращения: 12.04.2019).

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-01201) и бюджетной темы № 0073-2019-0005.

22. Piñeiro Torres B., García González A. *Evolution of the semantic web towards the intelligent web: from conceptualization to personalization of contents*. In: *Media and Metamedia Management*. Springer, 2017. Pp. 419–427.
23. Addicam S., Balkan S., Baydogan M., Addicam S., Baydogan M. Adaptive advertisement recommender systems for digital signage. *Americas Conference on Information Systems*, 2015, pp. 1–13.
24. Yıldız C., Tecim V. *Designing an intelligent digital signage system for business marketing*. In: *Economy, Finance and Business in Southeastern and Central Europe*. Springer, 2018. Pp. 757–767.
25. Lee T.-W., Chiu Y.-L., Wu Y.-S., Liu H.-S. An intelligent image-based customer analysis service. *The 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, IEEE, 2014, pp. 1–4.
26. Lee S.-H., Sohn M.-K., Kim H. Implementation of age and gender recognition system for intelligent digital signage. *Proceedings Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015)*/ A. Verikas, P. Radeva, D. Nikolaev (eds.), 2015, vol. 9875, p. 98750I.
27. Abraham R. E., Robert Kennedy M. Intelligent digital signage system based on gender identification. *Intelligent Embedded Systems: Select Proceedings of ICNETS2*, Springer, 2018, vol. II, pp. 251–262.
28. Abowd G. D., Dey A. K., Brown P. J., Davies N., Smith M., Steggles P. Towards a better understanding of context and context-awareness. *International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1999, pp. 304–307.
29. Flach J. M. Situation awareness: context matters! A commentary on Endsley. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 59–72.
30. *Situational Awareness*. 1st ed. (Salas E., ed.). London, Routledge, 2011. 544 p.

UDC 004.5

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-19-28

Personalization of information delivery through digital signage: major requirements and methodologyN. G. Shilov^a, PhD, Tech., Associate Professor, 0000-0002-9264-9127, nick@iiias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The use of digital signage is currently a popular way to provide information to large groups of people. However, personalized (oriented to the interests and preferences of a particular user) and contextualized (taking into account the current situation) information delivery through digital signage is subject to a number of technological and legislative restrictions. **Purpose:** Development of a methodology of systems providing personalized information through digital signage. **Results:** The requirements to the systems providing personalized information through digital signage have been specified: user anonymity, dynamic evaluation of user interest, user clustering, structured storage and processing of user interests and preferences, situational awareness. The principles of the functioning of the systems of the specified class have been determined taking into account the need to preserve confidentiality of personal data: information collection without active user participation, usage of anonymous profiles, self-learning and adaptation, ontological modelling of user interests and preferences, application of context management technology. An original methodology of the functioning of the considered systems has been proposed, characterized by the presence of feedback for refinement of the information delivered and information about users, as well as by the absence of any active participation of the users. The feedback is achieved through application of the image analysis techniques, that allow to identify precisely enough the time spent by the users for watching the information at digital signage as well as their age, gender, and emotions. Partial approbation of the results in the part of assessing personal visual characteristics (gender, age, emotional state) has been carried out based on photo analytics. It is shown that chosen software tools enable evaluation of the user visual characteristics (age, gender, and emotions) with high precision, and showing animated images can affect the emotional state of the viewer. **Practical relevance:** The proposed requirements, principles and methodology can be used for creating systems delivering personalized information to large groups of people, such as digital signage and electronic scoreboards.

Keywords — personalization, contextualization, information provision, image analysis, digital signage.

For citation: Shilov N. G. Personalization of information delivery through digital signage: major requirements and methodology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 19–28 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-19-28

References

- Gallacher S., Papadopoulou E., Abu-Shaabani Y., Taylor N. K., Williams M. H. Dynamic context-aware personalisation in a pervasive environment. *Pervasive Mobile Computing*, 2014, vol. 10, pp. 120–137.
- Anagnostopoulos A., Broder A. Z., Gabrilovich E., Josifovski V., Riedel L. Just-in-time contextual advertising. *Proceedings of the sixteenth ACM Conference on Conference on Information and Knowledge Management — CIKM '07*, New York, NY, USA, ACM Press, 2007, pp. 331.
- Muthukrishnan M., Tomkins A., Heck L., Geramifard A., Agarwal D. The future of artificially intelligent assistants. *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining — KDD '17*, New York, NY, USA, ACM Press, 2017, pp. 33–34.
- Sandkuhl K., Smirnov A., Shilov N., Wißotzki M. Targeted digital signage: technologies, approaches and experiences. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of 18th International Con-*

- ference, *NEW2AN 2018, and 11th Conference, ruSMART 2018*, Saint-Petersburg, August 27–29, 2018; O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy (Eds.), Springer, 2018, pp. 77–88.
5. Schaeffler J. *Digital Signage: Software, Networks, Advertising, and Displays: A Primer for Understanding the Business*. 1st ed. Focal Press, 2008. 296 p.
 6. Want R., Schilit B. N. Interactive digital signage. *Computer*, 2012, vol. 45, no. 5, pp. 21–24.
 7. Dustdar S., Nastić S., Šćekić O. *Smart Cities*. Cham, Springer International Publishing, 2017. 268 p.
 8. Federal Law of the Russian Federation of July 27 2006 # 152-FZ “On Personal Data”. *Rossijskaja Gazeta* [Russian Newspaper], 2006, 29 July. Available at: <https://rg.ru/2006/07/29/personaljnnye-dannye-dok.html> (accessed 12 April 2019) (In Russian).
 9. *GDPR — General Data Protection Regulation*. Available at: <https://gdpr-info.eu/> (accessed 22 March 2019).
 10. Westermann H. *Change of Purpose: The effects of the Purpose Limitation Principle in the General Data Protection Regulation on Big Data Profiling*. Lund University, 2018. 86 p.
 11. Salas J., Domingo-Ferrer J. Some basics on privacy techniques, anonymization and their big data challenges. *Mathematics in Computer Science*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 263–274.
 12. Taniguchi Y. Content scheduling and adaptation for networked and context-aware digital signage: A literature survey. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 18–29.
 13. Xie H., Zou D., Wang F. L., Wong T.-L., Rao Y., Wang S. H. Discover learning path for group users: A profile-based approach. *Neurocomputing*, 2017, vol. 254, pp. 59–70.
 14. Roedler R., Kergl D., Rodosek G. D. Content driven profile matching across online social networks. *Proceedings of the 2017 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2017 — ASONAM '17*, New York, NY, USA, ACM Press, 2017, pp. 1049–1055.
 15. Ahmed K. W., Hasan M. Z., Mohammed N. Image-centric social discovery using neural network under anonymity constraint. *2017 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*, IEEE, 2017, pp. 238–244.
 16. Guo T., Dong K., Wang L., Yang M., Luo J. Privacy preserving profile matching for social networks. *2018 Sixth International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD)*, IEEE, 2018, pp. 263–268.
 17. Bredereck R., Chen J., Woeginger G. J. Are there any nicely structured preference profiles nearby? *Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*, ACM Press, 2013. Available at: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2540140> (accessed 12 April 2019).
 18. Becker B. N. *Preference-Categorization: How Group Membership and Liking Affect Evaluative Scale Preference*. Texas A&M University, 2017. Available at: <http://hdl.handle.net/1969.1/161536> (accessed 12 April 2019).
 19. Kang J., Lee H. Modeling user interest in social media using news media and Wikipedia. *Information Systems*, 2017, vol. 65, pp. 52–64.
 20. Pratiwi P. S., Xu Y., Li Y., Trost S. G., Clanchy K. M., Tjondronegoro D. W. User profile ontology to support personalization for e-Coaching systems. *ACM 12th International Workshop on Data and Text Mining in Biomedical Informatics Knowledge Management in Healthcare (DTMBio 2018)*, 2018. Available at: <https://eprints.qut.edu.au/121443/> (accessed 12 April 2019).
 21. Subramaniaswamy V., Manogaran G., Logesh R., Vijayakumar V., Chilamkurti N., Malathi D., Senthilselvan N. An ontology-driven personalized food recommendation in IoT-based healthcare system. *Journal of Supercomputing*, 2018. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11227-018-2331-8> (accessed 12 April 2019).
 22. Piñeiro Torres B., García González A. *Evolution of the semantic web towards the intelligent web: from conceptualization to personalization of contents*. In: *Media and Metamedia Management*, Springer, 2017. Pp. 419–427.
 23. Addicam S., Balkan S., Baydogan M., Addicam S., Baydogan M. Adaptive advertisement recommender systems for digital signage. *Americas Conference on Information Systems*, 2015, pp. 1–13.
 24. Yıldız C., Tecim V. *Designing an intelligent digital signage system for business marketing*. In: *Economy, Finance and Business in Southeastern and Central Europe*, Springer, 2018. Pp. 757–767.
 25. Lee T.-W., Chiu Y.-L., Wu Y.-S., Liu H.-S. An intelligent image-based customer analysis service. *The 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, IEEE, 2014, pp. 1–4.
 26. Lee S.-H., Sohn M.-K., Kim H. Implementation of age and gender recognition system for intelligent digital signage. *Proceedings Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015)*; A. Verikas, P. Radeva, D. Nikolaev (eds.), 2015, vol. 9875, p. 987501.
 27. Abraham R. E., Robert Kennedy M. Intelligent digital signage system based on gender identification. *Intelligent Embedded Systems: Select Proceedings of ICNETS2*, Springer, 2018, vol. II, pp. 251–262.
 28. Abowd G. D., Dey A. K., Brown P. J., Davies N., Smith M., Steggle P. Towards a better understanding of context and context-awareness. *International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1999, pp. 304–307.
 29. Flach J. M. Situation awareness: context matters! A commentary on Endsley. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 59–72.
 30. *Situational Awareness*. 1st ed. Salas E., ed. London, Routledge, 2011. 544 p.

Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем

Г. С. Бритов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0452-523X, britovgs@gmail.com

Л. А. Мироновский^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-3584-7095

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

Введение: большинство исследований по терминальному диагностированию динамических систем посвящены методам расчета специальных, тестовых сигналов, обеспечивающих естественное движение системы, например, в заданных границах. Такое движение системы осуществляется с помощью рассчитанного терминального управления. Конечное состояние системы позволяет определить диагностический признак. Поэтому необходимо поставить и решить задачу оценки вероятности получения правильного результата диагностирования, определяющей его достоверность и чувствительность к ошибкам движения системы вследствие появления дефекта. **Цель:** разработка методов расчета достоверности и чувствительности диагностического признака терминального диагностирования динамических систем. **Методы:** использована теория чувствительности систем автоматического управления, позволившая построить формулы получения условий обнаружения дефектов, приводящих к ошибкам движения системы в заданных границах. **Результаты:** разработаны методы расчета коэффициентов чувствительности к ошибкам движения динамической системы при различных вариантах дефектов и требуемых исходных данных. Описан процесс оценки терминального диагностирования дискретных динамических систем, отличающийся от известных методов тестового диагностирования тем, что тестовое движение оказывается естественным движением системы в заданных границах. Компьютерное моделирование подтверждает, что полученные формулы оценки процесса диагностирования являются достоверными. Использование предложенных формул требует применения математического пакета MATLAB, так как расчеты основаны на программах-функциях и сценарии исследования достоверности и чувствительности терминального диагностирования. **Практическая значимость:** при принятии решения о наличии дефекта в проверяемом динамическом объекте оператор системы технического диагностирования получает инструмент для оценки достоверности и чувствительности диагностического признака.

Ключевые слова – модель движения системы, линейная дискретная система, границы движения, терминальное управление, ошибки движения системы, условия обнаружения дефектов.

Для цитирования: Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 29–37. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37
For citation: Britov G. S., Mironovskiy L. A. Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 29–37 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

Введение

Достоверность рассматривается в системотехнике с различных точек зрения. Прежде всего, достоверность определяется надежностью передачи, обработки и хранения информации. Она зависит как от интенсивности помех, так и от интенсивности сбоев и отказов. Разрабатываются методы помехоустойчивого кодирования, используемые для передачи данных по каналам связи или хранения их на магнитных носителях [1–3]. Метод избыточных переменных позволяет обнаруживать ошибки при выполнении вычислений на универсальных и специализированных компьютерах [4, 5]. Этот метод используется при моделировании динамических систем [6, 7].

Современная проблема достоверности теперь связана с компьютерной безопасностью [8, 9]. Достоверность здесь рассматривается как временная или постоянная защита информации пользователей, получивших права доступа.

Указанные подходы открыли перспективы оптимизации соотношения таких важных параметров системы, как помехоустойчивость и надежность, а также распределения информационной избыточности при передаче и переработке информации.

Наконец, в технической диагностике достоверности уделяли внимание при локализации дефектов, в частности, с помощью годографов в пространстве диагностических признаков [10, 11]. При функциональном диагностировании динамических систем в качестве диагностических признаков выступают инварианты исследуемой системы. Дефекты приводят к изменению ее параметров. В пространстве инвариантов строятся годографы изменения каждого параметра системы. Исправной системе соответствует номинальная точка, относительно которой решается задача локализации дефекта. С достоверностью локализации дефектов связана возможность не отличить их друг от друга.

Тестовому диагностированию динамических систем, обеспечивающему контроль их технического состояния, посвящены, например, работы [12–15]. Оценка достоверности контроля технического состояния диагностируемой системы при планировании испытаний и анализе их результатов требует выбора показателя достоверности и разработки методик его расчета на основе моделей процесса испытаний. При этом используемый показатель должен быть ориентирован прежде всего на достоверное заключение об исправности системы.

К проблеме достоверности в технике примыкает проблема чувствительности систем к изменению их параметров. Теория чувствительности систем автоматического управления является средством анализа влияния возмущений на динамику системы. Она широко применялась в различных областях, использующих системы управления [16]. Активное обращение к теории чувствительности наблюдается в работах, связанных с моделированием и диагностированием сложных систем [17–19].

Целью статьи является анализ достоверности и чувствительности терминального диагностирования дискретных систем управления. В работах [20, 21] рассмотрены методы расчета терминального управления, которое обеспечивает тестовое движение проверяемой системы в пространстве состояний. Диагностическим признаком является попадание системы в заданную конечную точку движения. Поскольку оно осуществляется при наличии помех, то необходимо исследовать достоверность проверки попадания диагностического признака в поле допуска. Возникают задачи повышения достоверности и чувствительности условий проверки.

Модель ошибок движения динамической системы в пространстве состояний

Рассмотрим управление линейными дискретными системами, которое целесообразно использовать при организации терминального диагностирования. Рассчитанное управление предполагает движение динамической системы в заданных границах при отсутствии или наличии дефекта. Если дефекта нет, то движение закончится в требуемой точке пространства состояний. В противном случае движение системы будет происходить с ошибками и не закончится в требуемой точке пространства состояний.

Поэтому необходимо определить математическую модель системы, которая должна быть положена в основу анализа принятия решения о результатах диагностирования. Для линейной дискретной системы используем модель движения

в пространстве состояний согласно следующим рекуррентным уравнениям:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t); \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}_k, \\ \mathbf{x}(t) \in R^n, \mathbf{u}(t) \in R^m, \mathbf{w}(t) \in R^n.$$

Обычно вектор $\mathbf{x}(t)$ недоступен, и осуществляется измерение выходных сигналов системы. Тогда при терминальном диагностировании необходим наблюдатель состояний, который позволяет выполнить оценку вектора состояний и сформировать диагностический признак [22].

Начальный вектор состояний \mathbf{x}_0 может быть установлен при тестировании системы. Конечный вектор состояний \mathbf{x}_k при числе шагов тестирования k обеспечивается расчетом терминального управления $\mathbf{u}(t)$ и обычно принимается равным нулю для того, чтобы упростить получение диагностического признака. Вектор возмущений $\mathbf{w}(t)$ не будет приводить к серьезному нарушению движения системы, если дефекта нет, и будет сильно нарушать ее движение при появлении дефекта.

Получим уравнения изменения вектора ошибок движения системы $\mathbf{e}(t)$ в пространстве состояний. Они будут иметь вид

$$\mathbf{e}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{w}(t), \mathbf{e}(0) = \mathbf{0}.$$

Положим, при отсутствии дефекта вектор возмущений представляет собой белый шум. Тогда уравнения для его математического ожидания и ковариационной матрицы будут следующими:

$$\bar{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{0}; \mathbf{K}_w(t) = \sigma^2 \mathbf{E}.$$

Соответственно, при отсутствии дефекта вектор ошибок движения системы будет определяться уравнениями для его математического ожидания и ковариационной матрицы вида

$$\bar{\mathbf{e}}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{e}}(t) + \bar{\mathbf{w}}(t); \mathbf{e}(0) = \mathbf{0}; \\ \mathbf{K}_e(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{K}(t) \cdot \mathbf{A}^T + \sigma^2 \mathbf{E}, \mathbf{K}(0) = \mathbf{0}.$$

Отсюда следует, что математическое ожидание и ковариационная матрица вектора ошибок движения системы будут иметь вид

$$\bar{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{0}; \\ \mathbf{K}_e(t) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{t-1} \mathbf{A}^i (\mathbf{A}^T)^i.$$

Диагностическим признаком терминального диагностирования является вектор разности заданного и полученного состояний системы в конечный момент времени. Поэтому, приняв $\mathbf{x}_k = \mathbf{0}$,

получим следующие вероятностные характеристики диагностического признака:

$$\bar{\Delta}(k) = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{K}_{\Delta}(k) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^i (\mathbf{A}^T)^i = \sigma^2 \mathbf{A}_{\Sigma}.$$

Здесь матрица \mathbf{A}_{Σ} представляет собой сумму произведений матриц \mathbf{A} и \mathbf{A}^T .

Известно, что рассеивание случайной величины можно определить с помощью числовых характеристик ковариационной матрицы:

- определителя $|\mathbf{K}_{\Delta}(k)|$;
- следа $Sp(\mathbf{K}_{\Delta}(k))$;
- спектрального радиуса $R(\mathbf{K}_{\Delta}(k))$;
- нормы $\|\mathbf{K}_{\Delta}(k)\|$.

Норма ковариационной матрицы может быть

— октаэдрической $\|a\| = \sum_{i=1}^n |a_i|$;

— евклидовой $\|a\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}$;

— кубической $\|a\| = \max_{1 \leq i \leq n} |a_i|$.

Построенная модель ошибок движения динамической системы в пространстве состояний используется для анализа достоверности обнаружения дефекта при терминальном диагностировании динамических систем.

Условия обнаружения дефекта при терминальном диагностировании

Диагностический признак должен быть равным нулю при отсутствии возмущений при движении системы в пространстве состояний. При наличии возмущений математическое ожидание диагностического признака будет равно нулю. Но рассеивание возмущений требует расчета допуска для диагностического признака.

Четыре варианта расчета допуска с использованием матрицы \mathbf{A}_{Σ} , определяющей ковариационную матрицу диагностического признака, следующие:

$$\Delta_{\partial 1} = \sigma \sqrt{\|\mathbf{A}_{\Sigma}\|};$$

$$\Delta_{\partial 2} = \sigma \sqrt{Tr(\mathbf{A}_{\Sigma})};$$

$$\Delta_{\partial 3} = \sigma \sqrt{R(\mathbf{A}_{\Sigma})};$$

$$\Delta_{\partial 4} = \sigma \sqrt{\|\mathbf{A}_{\Sigma}\|}.$$

Четвертый допуск, в свою очередь, может быть рассчитан тремя способами при использовании трех указанных выше норм матрицы \mathbf{A}_{Σ} .

Положим, в начале тестового движения системы при терминальном диагностировании возник дефект, приведший к сбою, который можно описать $(n \times k)$ -матрицей $\mathbf{W}_c = [\mathbf{w}_c, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}]$, где \mathbf{w}_c — дополнительное возмущение, которое появляется в начальный момент движения, а для достоверного обнаружения при диагностировании его величина должна зависеть от допуска на диагностический признак. Ошибка движения системы от дефекта при его окончании будет следующей:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{w}_c.$$

Поскольку принято, что $\mathbf{x}_k = \mathbf{0}$, то диагностический признак определяется этой величиной ошибки. Следовательно, условие обнаружения сбоя при наличии возмущений движения имеет вид

$$\|\mathbf{w}_c\| > \frac{\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}^{k-1}\|}.$$

Следует отметить, что допусков может быть четыре, видов норм — три. Поэтому должно быть двенадцать вариантов условий обнаружения сбоя.

Достоверное обнаружение сбоя при маловероятном ложном срабатывании

$$\|\mathbf{w}_c\| > \frac{3\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}^{k-1}\|}.$$

Положим, в начале тестового движения системы при терминальном диагностировании возник дефект, приведший к отказу, который можно описать $(n \times k)$ -матрицей $\mathbf{W}_o = [\mathbf{w}_o, \mathbf{w}_o, \dots, \mathbf{w}_o]$, где \mathbf{w}_o — дополнительное возмущение, которое действует в течение всего времени движения, а для достоверного обнаружения при диагностировании, как и раньше, величина его должна зависеть от допуска на диагностический признак. От дефекта ошибка движения системы по его окончании будет следующей:

$$\mathbf{e}(k) = \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{w}_o = \mathbf{A}_{\Sigma k} \mathbf{w}_o.$$

Условие обнаружения отказа при наличии возмущений движения имеет вид

$$\|\mathbf{w}_o\| > \frac{\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}_{\Sigma k}\|}.$$

Как и раньше, должно быть двенадцать вариантов условий обнаружения отказа.

Достоверное обнаружение отказа при маловероятном ложном срабатывании

$$\|\mathbf{w}_o\| > \frac{3\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}_{\Sigma k}\|}.$$

Таким образом, получены условия достоверного обнаружения дефектов при тестовом движении системы в пространстве состояний под действием рассчитанного терминального управления.

Чувствительность терминального диагностирования

Основу теории чувствительности составляют методы теории малых возмущений [17]. Выше рассмотрены случайные возмущения, возникающие в процессе движения исследуемой динамической системы в пространстве состояний. Ставится задача анализа влияния этих возмущений на результаты терминального диагностирования.

К фундаментальным понятиям относится функция чувствительности, вычисление которой является самой важной задачей теории чувствительности. Каждая функция чувствительности определяет влияние изменения конкретного параметра исследуемой системы на ее выходной сигнал.

В случае терминального диагностирования при действии возмущений на тестовое движение системы необходимо исследовать чувствительность условий проверки наличия сбоя или отказа, вызванных появлением дефекта.

Условия обнаружения сбоя или отказа содержат параметры, зависящие только от матрицы A

исследуемой системы. Поэтому определим коэффициент чувствительности как отношение нормы возмущения от дефекта к среднеквадратическому отклонению помехи. Количество вариантов расчета коэффициентов чувствительности достаточно велико. Каждая формула определяется следующими параметрами:

- видом дефекта: сбоем, отказом;
- характеристикой ковариационной матрицы: определителем, следом, спектральным радиусом, нормой;
- видом используемой нормы: октаэдрической, евклидовой, кубической.

Коэффициенты чувствительности для обнаружения сбоя приведены в табл. 1.

Коэффициенты чувствительности для обнаружения отказа приведены в табл. 2.

Двенадцать вариантов расчета допусков предполагает необходимость принятия решения для использования их в зависимости от особенностей задачи диагностирования. С вычислительной точки зрения достаточно простыми будут варианты с октаэдрической нормой векторов и со следом ковариационной матрицы. Однако с точки зрения информативности диагностических признаков могут оказаться сложные варианты с евклидовой нормой векторов и спектральным радиусом ковариационной матрицы. Наконец, с инженерной точки зрения полезными могут оказаться варианты с кубической нормой векторов и ковариационной матрицы.

■ Таблица 1. Коэффициенты чувствительности для обнаружения сбоя

■ Table 1. Sensitivity factors for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij} }$
Евклидова	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{\ A_{\Sigma}\ }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$
Кубическая	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} a_{\Sigma,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} a_{k-1,ij} }$

■ **Таблица 2.** Коэффициенты чувствительности для обнаружения отказа
 ■ **Table 2.** The sensitivity coefficients for fault detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij} }$
Евклидова	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{\ \mathbf{A}_\Sigma\ }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$
Кубическая	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$

Расчеты допусков и коэффициентов чувствительности целесообразно выполнить в математическом пакете MATLAB.

Компьютерное моделирование

Написана программа-сценарий для математического пакета MATLAB, решающая следующие задачи.

1. Ввод системных матриц **A** и **B**; начального состояния; числа шагов; среднеквадратического отклонения возмущений.
2. Расчет допуска и коэффициента чувствительности при различных нормах векторов и матриц; характеристиках ковариационной матрицы возмущений.
3. Моделирование процесса диагностирования, включая вычисление терминального управления, которое минимизирует затрачиваемую энергию; создание случайных помех; назначение требуемой величины ошибки вследствие возникновения сбоя или отказа; построение траектории движения системы от задаваемого начального до нулевого конечного состояний как при отсутствии, так и при наличии дефекта.
4. Просмотр результатов рассчитанного допуска; нормы диагностического признака; коэффициента чувствительности.

Приведем два варианта работы сценария. Вариант 1 предполагает использование октаэдрических норм, определитель ковариационной матрицы, дефект, приводящий к сбою и ошибке 0,1. Вариант 2 предполагает использование евклидовых норм, след ковариационной матрицы, дефект, приводящий к отказу и ошибке 0,2.

Вариант 1

Вводим
 A = 0 1
 1 0
 B = 0
 1
 xk = 1
 1
 k = 10
 sigma = 0.01
 Ошибка > 0.015 = 0
 Допуск на диагностический признак 0.1000
 Коэффициент чувствительности 5
 Норма диагностического признака 0.0445
 Ошибка > 0.015 = 0.1
 Допуск на диагностический признак 0.1000
 Коэффициент чувствительности 5
 Норма диагностического признака 0.1676

Вариант 2

Ошибка > 0.067082 = 0.2
 Допуск на диагностический признак 0.0447
 Коэффициент чувствительности 2.2361
 Норма диагностического признака 0.3496
 Конец

Результаты расчетов в виде пар допусков на диагностический признак и коэффициентов чувствительности для обнаружения сбоя ($\Delta_{\Sigma} | K_j$) приведены в табл. 3.

Результаты расчетов в виде пар допусков на диагностический признак и коэффициентов чув-

■ **Таблица 3.** Пары допусков и коэффициентов чувствительности для обнаружения сбоя

■ **Table 3.** A couple of tolerances and sensitivity coefficients for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	0,1 5	0,04 2,2	0,03 1,52	0,04 2,2
Евклидова	0,1 7,7	0,04 3,16	0,03 2,2	0,0376 2,6
Кубическая	0,1 10	0,04 4,47	0,03 3,16	0,03 3,16

■ **Таблица 4.** Пары допусков и коэффициентов чувствительности для обнаружения отказа

■ **Table 4.** A couple of tolerances and sensitivity coefficients for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	0,1 2,5	0,04 1,1	0,03 0,79	0,04 1,1
Евклидова	0,1 5	0,04 2,2	0,03 1,58	0,0376 1,88
Кубическая	0,1 10	0,04 4,47	0,03 3,16	0,03 3,16

ствительности для обнаружения отказа приведены в табл. 4.

Числовые результаты позволяют сделать следующие выводы.

— Для обнаружения дефектов, приводящих к сбоям или отказам, допуски на диагностический признак одинаковы.

— Допуск по определителю матрицы существенным образом отличается от почти одинаковых допусков по следу, спектральному радиусу и норме матрицы.

— Коэффициенты чувствительности при сбоях несколько отличаются от соответствующих коэффициентов при отказах.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предложенных расчетных формул.

Заключение

Терминальное диагностирование является разновидностью тестового диагностирования динамических систем, обеспечивающей контроль системы в естественном режиме движения ее в заданных границах. При выборе границ движения системы целесообразно задавать нулевые диагностические признаки, которые оказываются достаточно простыми для обнаружения дефектов. Приведенные формулы расчета вероятности правильной проверки диагностических признаков диагностирования, определяющей его достоверность, и коэффициентов чувствительности диагностических признаков относятся к дискретным системам. Предложен определенный

набор вариантов для выбора требуемых формул. Расчетные формулы реализованы в математическом пакете MATLAB. Получаемые числовые значения допусков на диагностический признак и коэффициентов чувствительности, в свою очередь, можно считать достоверными.

Рассмотренное компьютерное моделирование терминального диагностирования нейтральной системы второго порядка в присутствии случайных помех показало, что:

— при отсутствии дефекта полученный диагностический признак почти в два раза меньше рассчитанного допуска;

— при наличии дефекта, приводящего к сбою, полученный диагностический признак почти в два раза больше рассчитанного допуска;

— при наличии дефекта, приводящего к отказу, полученный диагностический признак почти в семь раз больше рассчитанного допуска;

— рассчитанные коэффициенты чувствительности достигают значений 10 и 2,2, показывая, насколько норма возмущения от дефекта должна быть больше среднеквадратического отклонения помехи.

В работах по функциональному диагностированию описан метод, позволяющий не только обнаружить, но и локализовать дефект. Он связан с использованием принципа диагностирования по годографам дефектов. Этот принцип требует специальных расчетов для создания годографов.

Финансовая поддержка

Работа поддержана грантом РФФИ 17-08-00244.

Литература

1. Таубин Ф. А. Решетчатые сигнально-кодовые конструкции для каналов с линейными искажениями. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 66–78. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-66-78
2. Афшер Х., Делич Х. Полярные коды с памятью высшего порядка. *Проблемы передачи информации*, 2018, т. 54, № 4, с. 3–34.
3. Бассалыго Л. А., Зиновьев В. А. Замечание об уравновешенных неполных блок-схемах, почти разрешимых блок-схемах и q-ичных равновесных кодах. *Проблемы передачи информации*, 2017, т. 53, № 1, с. 56–59.
4. Игнатъев М. Б. Когнитивные вычисления на основе лингво-комбинаторного подхода. *Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в III ч. Ч. II. Технические науки*. СПб., ГУАП, 2018, с. 321–324.
5. Игнатъев М. Б., Катермина Т. С. Метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени. *Труды СПИИРАН*, 2013, вып. 26, с. 234–252.
6. Игнатъев М. Б., Марлей В. Е., Михайлов В. В., Спесивцев А. В. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб., Политех-пресс, 2018. 501 с.
7. Жирабок А. Н., Овчинников Д. Ю., Филатов А. П., Шумский А. Е., Яценко Н. А. Диагностирование нелинейных динамических систем непараметрическим методом. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2018, № 19, с. 508–515. doi.org/10.17587/mau.19.508-515
8. Хлобыстова А. О., Абрамов М. В., Тулупьев А. П., Золотин А. А. Поиск кратчайшей траектории социоинженерной атаки между парой пользователей в графе с вероятностями переходов. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 6, с. 74–81. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-6-74-81
9. Штанько С. В. Ограничение несанкционированного доступа в радиотехнических системах с широкополосной передачей информации. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 57–65. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-57-65
10. Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 49–57. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.49
11. Копкин Е. В., Бородько Д. Н., Пастухова К. Е. Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 1, с. 31–39. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.31
12. Мионовский Л. А., Соловьева Т. Н. Анализ кратности ганкелевых сингулярных чисел управляемых систем. *Автоматика и телемеханика*, 2015, № 2, с. 18–33.
13. Ключев В. В., Иванов В. И., Туробов Б. В. Техническая диагностика в промышленности. *Контроль. Диагностика*, 2018, № 6, с. 4–13.
14. Данилевич С. Б., Третьяк В. В. Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля. *Контроль. Диагностика*, 2018, № 7, с. 56–60.
15. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V. Test-based diagnosis of faults in data exchange addressing in computer systems using parallel model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, no. 57(3), pp. 420–433.
16. Солдатенко С. А., Юсупов Р. М. Чувствительность нульмерной климатической модели и ее обратные связи в контексте проблемы управления погодой и климатом Земли. *Труды СПИИРАН*, 2017, № 3, с. 5–31.
17. Соколов Б. В., Бураков В. В., Микони С. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов. *Информация и космос*, 2018, № 3, с. 36–43.
18. Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы создания и применения катастрофоустойчивых информационных систем. *Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. конф., Санкт-Петербург, 1–3 ноября 2017 г.*, СПб., СПОИСУ, 2017, с. 15–16.
19. Аринчев С. В., Рачкин Д. А. Чувствительность внутренних возмущений панельной конструкции, содержащей ротор, к вариациям сосредоточенных масс. *Известия вузов. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 49–56.
20. Бритов Г. С. Терминальное диагностирование дискретных динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 4, с. 18–24. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
21. Печенин Д. В., Мионовский Л. А. Оптимальное программное импульсное управление линейными объектами. *Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в III ч. Ч. II. Технические науки*. СПб., ГУАП, 2018, с. 374–379.
22. Kolesov N. V., Gruzlikov A. M., Lukoyanov E. V. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty procedia. *Computer Science*, 2017, no. 103, pp. 499–504.

UDC 621.38

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systemsG. S. Britov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0452-523X, britovgs@gmail.comL. A. Mironovskiy^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3584-7095^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Most studies on terminal diagnostics of dynamic systems are devoted to the description of methods of calculating special test signals providing natural movement of the system, for example, within the given limits. Such a movement is carried out using calculated terminal control. The final state of the system allows you to determine a diagnostic feature. Therefore, it is necessary to set and solve the problem of assessing the probability of obtaining a correct result of diagnosis, which would determine its reliability and sensitivity to errors in the system movement caused by a defect. **Purpose:** Developing methods for calculating the reliability and sensitivity of a diagnostic feature in terminal diagnosis of dynamic systems. **Methods:** Formulas based on the theory of automatic control system sensitivity allowed us to obtain conditions for detecting defects which lead to errors in the system movement within specified boundaries. **Results:** Methods have been developed to calculate dynamic system motion error sensitivity coefficients for various defects and required initial data. The process of evaluating terminal diagnostics of discrete dynamic systems is described. This process differs from the known methods in that the test motion is a natural movement of the system within the specified boundaries. Computer simulation confirms that the obtained formulas of the diagnostics process estimation are accurate. The proposed formulas require the application of MATLAB mathematical package, as the calculation is based on function programs and a scenario for studying reliability and sensitivity of terminal diagnostics. **Practical relevance:** When making a decision about the presence of a defect in a tested dynamic object, the technical diagnostics system operator receives a tool for assessing the reliability and sensitivity of the diagnostic feature.

Keywords — system motion model, linear discrete system, border traffic, terminal control, system motion errors, conditions for defect detection.

For citation: Britov G. S., Mironovskiy L. A. Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 29–37 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

References

1. Taubin F. A. Trellis-coded modulation for linear distortion channels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 66–78 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-66-78
2. Afshere H., Delich H. Polar codes with higher order memory. *Problemy peredachi informacii*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 3–34 (In Russian).
3. Bassalygo L. A., Zinoviev V. A. Note on balanced incomplete block schemes, is almost soluble flowcharts and q-ary equilibrium codes. *Problemy peredachi informacii*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 56–59 (In Russian).
4. Ignatiev M. B. Cognitive computing based on the linguo-combinatorial approach. *Nauchnaya sessija GUAP* [Scientific Session of SUAI, vol. II. Technical Science], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2018, pp. 321–324 (In Russian).
5. Ignatiev M. B., Catermina T. S. The method of redundant variables for control and correction of computational processes in real time. *SPIIRAS Proceedings*, 2013, iss. 26, pp. 234–252 (In Russian).
6. Ignatyev M. B., Marley V. E., Mikhailov V. V., Spesivtsev A. V. *Modelirovanie slabo formalizovannykh sistem na osnove javnykh i nejavnykh jekspertnykh znaniij* [Modelling a poorly formalised system on the basis of public and non-public knowledge]. Saint-Petersburg, Politekh-press Publ., 2018. 501 p. (In Russian).
7. Zhirabok A. N., Ovchinnikov D. Yu., Filatov A. P., Shumsky A. E., Yatsenko N. A. Diagnosis of nonlinear dynamic systems-parametric method. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2018, no. 19, pp. 508–515 (In Russian). doi.org/10.17587/mau.19.508-515
8. Khllobystova A. O., Abramov M. V., Tulupyev A. P., Zolotin A. A. Search for the shortest path of socio-engineering attack between a pair of users in the graph with transition probabilities. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 74–81 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-6-74-81
9. Shtanko S. V. Restriction of unauthorized access in radio systems with broadcasting information. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 57–65 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-57-65
10. Maltsev G. N., Yakimov V. L. Reliability of multi-stage control of technical condition of test objects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 49–57 (In Russian). doi: 10.15217/issn 1684-8853.2018.1.49
11. Kopkin E. V., Borodko D. N., Pastukhova K. E. Algorithm for constructing a quasi-optimal flexible program for analyzing the technical condition of the object. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 31–39 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2017.1.31
12. Mironovsky L. A., Solovyeva T. N. Analysis of the multiplicity of Hankel singular values of the managed systems. *Automation and Remote Control*, 2015, no. 2, pp. 18–33 (In Russian).
13. Klyuev V. V., Ivanov V. I., Turobov B. V. Technical diagnostics in industry. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 6, pp. 4–13 (In Russian).
14. Danilevich S. B., Tretyak V. V. Metrological assurance of control results reliability. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 7, pp. 56–60 (In Russian).
15. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V. Test-based diagnosis of faults in data exchange addressing in computer systems using parallel model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, no. 57(3), pp. 420–433.
16. Soldatenko S. A., Yusupov R. M. Sensitivity of the zero-dimensional climate model and its feedbacks in the context of the earth's weather and climate control problem. *SPIIRAS Proceedings*, no. 3, pp. 5–31 (In Russian).
17. Sokolov B. V., Burakov V. V., Mikoni S. V., Yusupov R. M. Methodological and methodical bases of the theory of estimation of quality of models and polymodel complexes. *Informacija i kosmos*, 2018, no. 3, pp. 36–43 (In Russian).
18. Okhtilev M. Yu., Klyucharev A. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Metodologicheskie i metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya katastrofoustojchivyykh informacionnykh system. *Trudy konferentsii "Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost'"* [Proc. conf. "Regional computer science and information security"]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 15–16 (In Russian).

19. Arenuev S. V., Rachkin D. A. Sensitivity of the internal disturbances a panel structure containing the rotor, the variations of lumped masses. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye*, 2015, no. 1, pp. 49–56 (In Russian).
20. Britov G. S. Terminal diagnostics of discrete dynamical systems. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2017.4.18
21. Pechenin D. V., Mironovsky L. A. Optimal software impulse control of linear objects. *Nauchnaya sessiya GUAP* [Scientific Session of SUAI, vol. II. Technical Science], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2018, pp. 374–379 (In Russian).
22. Kolesov N. V., Gruzlikov A. M., Lukoyanov E. V. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty procedia. *Computer Science*, 2017, no. 103, pp. 499–504.

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно, в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставляемые в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, подающимися редактованию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, подающихся редактованию, используя векторные программы: Visio (*.vsd, *.vsdx); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.docx); Adobe Illustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

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

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Правила для авторов».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»
Тел.: (812) 494-70-02
Эл. почта: ius.spb@gmail.com
Сайт: www.i-us.ru

УДК 621.865.8, 616.7

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

Управляемый микроробот для перемещения в сосудах человека

А. Е. Городецкий^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-3465-4438

И. Л. Тарасова^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2282-150X, g17265@yandex.ru

В. Г. Курбанов^{а, б}, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2450-9341

^аИнститут проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

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

Введение: создание управляемых микророботов, способных перемещаться в сосудах человека в соответствии с заданным трафиком движения, является одной из наиболее сложных и трудно решаемых задач. Среди эффективных путей ее решения находится использование в конструкции подобных микророботов модулей SEMS (Smart ElectroMechanical Systems). Различные соединения таких модулей позволяют имитировать работу ресниччатого аппарата и жгутикового двигателя, которые могут использоваться в качестве двигателей микроробота. **Цель исследования:** разработка для медицинских целей управляемого микроробота, конструкция которого базируется на стандартных модулях SEMS. **Результаты:** разработан медицинский микроробот. Рассмотрены принципы управления коллективным движением таких микророботов. Особая роль в управлении группой микророботов отводится центральной нервной системе микроробота, выполняющей функцию системы автоматического управления. При синтезе оптимального ситуационного управления группой микророботов осуществляется перевод логико-вероятностных и логико-лингвистических ограничений в логико-интервальные, что позволяет оптимизационную задачу свести к решению ряда классических задач математического программирования. **Практическая значимость:** использование различных объединений модулей SEMS в конструкции медицинских микророботов позволяет повысить точность, быстродействие и их адаптивность к окружающей среде, так как, в отличие от известных механизмов, применяемых в микророботах, в данном случае вводится параллелизм не только в процессы измерения и вычисления, но и в процессы исполнения управляющих команд. Конструктивные особенности разработанных модулей обеспечивают широкие технологические возможности различных биомедицинских робототехнических комплексов.

Ключевые слова – безопасное управление, интеллектуальные роботы, умные электромеханические системы, групповое ситуационное взаимодействие, динамическое пространство конфигураций, центральная нервная система.

Для цитирования: Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г. Управляемый микроробот для перемещения в сосудах человека. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 38–44. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

For citation: Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Controlled microrobot for moving in human vessels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 38–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

Введение

В последние годы большое внимание уделяется созданию микророботов, имитирующих сложность и адаптивность биологических систем [1]. Исследование и разработка робототехнических систем с использованием бионического подхода становятся одной из главных целей в области робототехники [2], в том числе и для медицинского назначения [3].

Во всем мире ученые ищут способы использования микророботов для лечения болезней. Они вводятся в организм человека, чтобы быстро и безошибочно доставлять лекарства в нужный орган или выполнять операции, требующие максимальной точности (например, очистку забитых артерий).

Исследователи из Института умных систем имени Макса Планка (Германия) под руководством профессора Пира Фишера выяснили, что роботы в форме устриц являются отличными плов-

цами в неньютоновской жидкости. Сегодня робот-устрица выступает в качестве базовой структуры будущих микророботов [4]. Специалисты Харбинского технического института (Китай) создали микроскопического робота, который умеет плавать по человеческим венам самым быстрым видом плавания — кролем [5]. Ученые институтов EPFL и ETHZ (Швейцария) разработали робота, который имеет структуру бактерии, вызывающей африканский трипаносомоз (сонную болезнь) [6]. В Калифорнийском университете в Сан-Диего (США) разработан микроскопический робот, с помощью которого осуществляется транспортировка препарата в желудок подопытной мыши [7]. Ученые из России разработали медицинский микроробот, предназначенный для транспортировки с высокой эффективностью лекарственных препаратов в труднодоступные места живого организма [8].

Эффективность функционирования таких устройств существенно зависит от способности

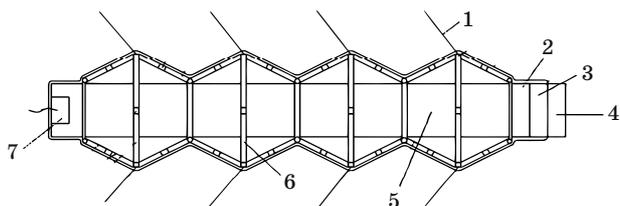
адаптироваться к окружающей среде, в том числе к возникающим на пути движения различного рода препятствиям.

Существующие медицинские микророботы имеют высокую сложность управления, требующую применения специальных средств визуализации положения микроробота в живом организме, низкую точность позиционирования и сильную зависимость от внешних электромагнитных полей [9].

Значительного прогресса в этой области можно достичь за счет использования в конструкции подобных микророботов модулей SEMS (Smart ElectroMechanical Systems) [10]. Различные соединения таких модулей позволяют имитировать работу реснитчатого аппарата и жгутикового движителя [11], которые могут использоваться в качестве движителей микроробота.

Модель и центральная нервная система робота

Конструкция микроробота, предназначенного для транспортировки лекарственных веществ в труднодоступные места живого организма, содержит (рисунок): корпус 5, состоящий из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS [10]; реснитчатые движители 1, которые крепятся к верхним и (или) нижним платформам промежуточных модулей корпуса медицинского микроробота и состоят из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS; центральную управляющую вычислительную машину 2, выполняющую функции системы автоматического управления (САУ); систему технического зрения 3, обеспечивающего САУ навигационной информацией; жгутиковый движитель 7, который крепится к нижней платформе первого модуля корпуса и состоит из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS; модули с управляемой жесткостью 6, устанавливаемые между модулями SM5 SEMS корпуса 5 и обеспечивающие требуемую гибкость в сочетании с твердостью; адаптивный захват 4, который крепится к верхней платформе последнего модуля корпуса и состоит из соедине-



- Медицинский микроробот
- Medical microrobot

ния типа кольцо модулей SEMS, например, типа SM7 SEMS [10].

Микроробот работает следующим образом. После введения медицинского микроробота в вену (сосуд) включается электропитание, и система технического зрения 3 передает изображение внутренних стенок сосуда оператору и в центральную управляющую вычислительную машину 2 САУ. Она анализирует полученное изображение и подает сигнал управления в модули SM5 SEMS корпуса 5 на изменение толщины робота в зависимости от текущей величины сечения сосуда.

Одновременно САУ подает управляющие сигналы в модули SM5 SEMS корпуса 5 на изменение положений их платформ и соответственно на изгиб тела робота сообразно текущему изгибу внутренних стенок сосуда. Кроме того, САУ подает управляющие сигналы на модули SM5 SEMS жгутикового движителя 7 для обеспечения продвижения робота вдоль сосуда и на модули SM5 SEMS реснитчатых движителей 1, создающих гребные движения, благодаря которым обеспечивается большая проходимость робота в труднодоступных участках. Эти гребные движения жгутиков могут создавать также эффект чистки внутренней поверхности сосуда. Улучшение проходимости робота достигается за счет поворотов робота и изменения его толщины. Кроме того, САУ может подавать управляющие сигналы в модули с управляемой жесткостью 6, обеспечивая изменение жесткости конструкции корпуса 5 в соответствии с изменяющимися условиями движения в сосудах. После прибытия робота к месту назначения САУ подает сигналы в модули SM7 SEMS адаптивного захвата 4, обеспечивая удаление бляшек.

Медицинский микроробот может быть снабжен центральной нервной системой (ЦНС), в которой происходит обработка информации, вычисления, управление по параллельным каналам [11]. ЦНС робота выполняет функции САУ, собирает сведения об окружающей обстановке и «поведении» самого робота и вырабатывает управляющие воздействия, обеспечивая его целесообразное или целеустремленное поведение [11]. Обеспечение роботов ЦНС и ее совершенствование является очень важной и актуальной задачей. Поэтому для того, чтобы роботы могли самостоятельно, обходясь без вмешательства человека, формулировать задачи и успешно их выполнять, они должны не только быть снабжены более совершенными датчиками ощущений, но и иметь способность понимать язык ощущений, т. е. обладать чувствами типа «свой — чужой», «опасно — безопасно», «любимый — нелюбимый», «приятно — неприятно» и др.

При создании ЦНС роботов целесообразно использовать, и в ряде случаев уже используется,

бионический подход [12]. При этом ЦНС будет содержать следующие параллельные цепочки: РЕЦЕПТОРЫ (сенсоры, датчики и другие измерительные системы робота) → НЕРВНАЯ ЦЕПЬ (информационный канал приема сигналов и их первичная обработка) → ЗОНЫ КОРЫ (объединение сигналов, распознавание, классификация, принятие решения) → ИМПУЛЬС (информационный канал передачи управляющих сигналов, их преобразование и формирование управляющего воздействия) → РЕАКЦИЯ (перемещение, растяжение и другие действия рабочих органов робота).

Управление движением группой роботов

При одновременной работе группы микророботов в сосудистой системе человека возникает задача ситуационного управления. Например, задача формирования формаций [13], отработки согласованных движений [14], совместного поиска и транспортировки объектов [15, 16] и др.

Однако рассматриваемые в этих задачах механизмы не гарантируют полноту инструментария, который необходим для решения всех задач, которые могут ставиться перед группой микророботов. Необходим еще один уровень управления, который являлся бы интерфейсом между группой и оператором, ставящим целевые задачи [17, 18], и который можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления [19–21]. При этом оператором может быть не только человек, но и компьютерная программа, принимающая решения [22, 23].

Характерным примером ситуационного управления роботами, перемещающимися в сосудах, может быть задача перевода группы роботов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, размещенных в момент времени t_0 в точках $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ окружающего ограниченного пространства $L^3 \subset E^3$ (E^3 — трехмерное евклидово пространство), в целевые точки $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ этого пространства к моменту времени t_f за минимальное время

$$T = t_f - t_0 \rightarrow \min \quad (1)$$

при минимальной вероятности столкновения роботов

$$P_A \rightarrow \min. \quad (2)$$

Обычно при использовании различных математических методов оптимизации условие (2) заменяется неравенством вида

$$\sum_{i,j} m_{ij}(t_k) \leq M, \quad (3)$$

где M — максимально допустимое число столкновений; i, j — номера роботов из чисел от 1 до n

($i \neq j$); k — номер момента времени из промежутка времени T ; значение $m_{ij}(t_k)$ определяется из логического выражения

Если в момент времени t_k траектория движения r_i робота a_j пересекается с траекторией движения r_j робота a_i , то есть $r_i \cap r_j \neq \emptyset$, то $m_{ij}(t_k) = 1$, иначе $m_{ij}(t_k) = 0$.

Поиск решения поставленной задачи производится в окружении выбора среды, которое меняется во времени t , т. е. является динамическим $O(t)$. Его можно разбить на слои $O(t_k)$ с некоторым постоянным или переменным шагом h_k :

$$O(t) = \{O(t_0), \dots, O(t_k), \dots, O(t_f)\}. \quad (4)$$

Каждый слой $O(t_k)$ ($k = 0, 1, \dots, [t_f/h_k]$) содержит окружающее пространство L^3 , разбитое на ячейки $e_q(t_k)$ с постоянными либо переменными шагами h_x, h_y, h_z по осям X, Y, Z ($q = 1, 2, \dots, Q$ — номер ячейки):

$$O(t_k) = \{e_1(t_k), e_2(t_k), \dots, e_Q(t_k)\}. \quad (5)$$

Каждая ячейка $e_q(t_k)$ характеризуется наличием либо отсутствием роботов a_i , различных препятствий $B_i(t_k)$ и др.:

$$B_i(t_k) = \{v_i(t_k), w_i(t_k), \gamma(t_k), \dots\}. \quad (6)$$

Кроме того, каждая ячейка характеризуется матрицами взаимодействия робота со средой $G(t_k) = \{G_1(t_k), G_2(t_k), \dots, G_v(t_k)\}$, описывающими влияние среды ячейки на динамическое состояние робота, а совокупность ячеек — правилами движения типа ЕСЛИ — ТО.

Сложность поставленной задачи, требующей использования методов ситуационного управления, заключается в том, что параметры и функции, характеризующие ячейки $e_q(t_k)$, могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными.

При централизованном управлении с оператором необходимы [17] взаимодействие между группой роботов и оператором; создание базы данных и базы правил об окружающей среде и роботах [24]; декомпозиция поставленной задачи на подзадачи; построение совместного плана действий группы роботов; распределение зон ответственности между роботами [25].

Большинство из этих функций характерны и для любой другой структуры управления. Для того чтобы рассматриваемая структура гарантированно обладала свойством полноты (т. е., если цель достижима, то последовательность действий к цели будет найдена), необходим доступ всех роботов группы к базе данных и знаний оператора. Это накладывает определенные ограничения на время доступа к общей базе каждого члена груп-

пы и требует вычисления и динамического перераспределения приоритетов на последовательность управления членами группы роботов.

При любом структурном подходе к организации ситуационного управления группой роботов необходимо собирать информацию о параметрах окружающей среды, о текущем состоянии отдельных роботов, о планируемых действиях членов группы роботов и др. После сбора информации в общем случае окружение выбора $O(t_k)$ может быть охарактеризовано в некоторый момент времени t_k следующим кортежем:

$$O(t_k) = \langle A(t_k), S(t_k), F(t_k), \sum_{i,j} m_{ij}(t_k), M, B_i(t_k), G(t_k), R_m(t_k) \rangle. \quad (7)$$

Планирование ситуационного управления группой роботов заключается:

— в разделении групповой задачи на подзадачи:

$$O(t_0) \xRightarrow{U(t_1)} O(t_1), \dots, O(t_0) \xRightarrow{U(t_f)} O(t_f); \quad (8)$$

$$U(t_k) = \{u_{a_1}(t_k), u_{a_2}(t_k), \dots, u_{a_n}(t_k)\}, \quad (9)$$

где $u_{a_i}(t_k)$ — управляющее воздействие, подаваемое на робот a_i в момент времени t_k , $k = 0, 1, \dots, f$;

— в распределении между роботами группы решений подзадач так, чтобы решение групповой задачи осуществлялось за минимальное время с учетом имеющихся ограничений, в том числе и на информационное взаимодействие.

В общем виде решением групповой задачи управления будет синтез алгоритма поиска упорядоченного множества $\omega \subset \Omega$ из множества альтернативных комбинаций управлений $U(t_k)$ лучших сочетаний законов управления каждого члена группы роботов u_{a_i} на основе оценок качества Q , построенных с учетом системы предпочтений и окружения выбора $O(t_k)$:

$$\omega \subset 2^U \times Q^U, \quad (10)$$

где 2^U обозначает множество всех подмножеств U , а Q^U — множество всех оценок качества (кортежей длиной от 2 до $|U|$); \times — знак декартова произведения.

В связи с тем, что параметры и функции, характеризующие окружение выбора, могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными, при решении такой

оптимизационной задачи требуется не полностью определенные ограничения записывать в виде логико-вероятностных и логико-лингвистических выражений. В дальнейшем эти ограничения целесообразно переводить с использованием введенных ранее [26] теорем в логико-интервальные сведения. Тогда решение оптимизационной задачи можно свести к решениям ряда классических задач математического программирования.

Заключение

Использование различных объединений модулей SEMS в моделях медицинских микроботов обеспечивает высокую точность, быстродействие и адаптивность к окружающей среде, так как, в отличие от известных конструкций, применяемых в микроботах, в данном случае вводится параллелизм не только в процессы измерения и вычисления, но и в процессы исполнения управляющих команд [10]. Причем системы управления такими роботами целесообразно строить в виде ЦНС робота. Структура и алгоритмы построения такой системы впервые предложены авторами [11, 12] по аналогии с ЦНС человека.

Управление движением группой таких роботов можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления. Тогда планирование ситуационного управления будет заключаться в разделении групповой задачи на подзадачи и в распределении между роботами группы решений подзадач так, чтобы решение групповой задачи осуществлялось за минимальное время с учетом имеющихся ограничений, в том числе и на информационное взаимодействие. Сложность поставленной задачи заключается в том, что параметры и функции, характеризующие окружение выбора, могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными. Имеющиеся в этом случае логико-вероятностные и логико-лингвистические ограничения целесообразно переводить в логико-интервальные. Тогда решение оптимизационной задачи можно свести к решению ряда классических задач математического программирования.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-04424, 18-01-00076, 19-08-00079.

Литература

1. Tarasova I. L., Kurbanov V. G., Gorodetskiy A. E. Adaptive Capture. In: *Smart Electromechanical Systems: The*

Central Nervous System. Series: Studies in Systems, Decision and Control/ Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 119–143. doi:10.1007/978-3-319-53327-8_10

2. Пат. PCT/US2011/025001 США, B25J 15/00 (2006.01), B25J 15/08 (2006.01). A Dexterous and compliant robotic finger, Torres-Jara (EC), Eduardo R. A. (US). № WO/2011/152898; заявл. 16.02.2011, опубл. 08.12.2012.
3. Li Zhang, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Bradley E. Kratochvil, Dominik Bell, Bradley J. Nelson. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 6, 064107. doi:10.1063/1.3079655
4. <https://robo-hunter.com/news/mikroskopicheskie-roboti-ustriciv-vashih-glazah> (дата обращения: 21.05.2013).
5. <https://nplus1.ru/news/2017/07/25/blood-roboswimmers> (дата обращения: 21.05.2013).
6. https://robo-hunter.com/?utm_source=geek-times&utm_campaign=1-02&utm_content=1-02 (дата обращения: 21.05.2013).
7. <http://integral-russia.ru/2018/02/03/17307/> (дата обращения: 21.05.2013).
8. Пат. № 2469752 РФ, МПК: А61М37/00. Медицинский микроробот. Агапов В. А. (RU), Городецкий А. Е. (RU), Кучмин А. Ю. (RU), Селиванова Е. Н. (RU). № 2011120517/14; заявл. 20.05.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. 7 с.
9. Hongliang Ren, Hritwick Banerjee. A Preface in Electromagnetic Robotic Actuation and Sensing in Medicine. In: *Electromagnetic Actuation and Sensing in Medical Robotics*/ Eds. Hongliang Ren, Jinji Sun. 2018. P. 1–10. doi:10.1007/978-981-10-6035-9_1
10. *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
11. *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
12. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Принятие решений в центральной нервной системе робота. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 21–30. <https://doi.org/10.15217/issnl684-8853.2018.1.21>
13. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224638>
14. Jong-Hyun Lee, Chang Wook Ahn, Jinung An. An approach to self-assembling swarm robots using multitree genetic programming. *The Scientific World Journal*, 2013, no. 1, pp. 10. Article ID 593848. doi:10.1155/2013/593848
15. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolffi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 60–71. doi:10.1109/MRA.2013.2252996
16. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Situational Control a Group of Robots Based on SEMS. In: *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9
17. Воробьев В. В. Логический вывод и элементы планирования действий в группах роботов. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*/ тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 88–96.
18. Иванов Д. Я., Шабанов И. Б. Модель применения коалиций интеллектуальных мобильных роботов при ограниченных коммуникациях. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*/ тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 97–105.
19. Поспелов Д. А. *Ситуационное управление: Теория и практика*. М., Наука, 1986. 286 с.
20. Кунц Г., О Доннел С. *Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций*. М., Прогресс, 2002. 588 с.
21. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Шабанов А. П. Об информационной поддержке деятельности в системах управления критическими технологиями на основе ситуационных центров. *Системы управления, связи и безопасности*, 2017, № 4, с. 98–113. <http://sees.intelgr.com/archive/2015-04/05-Zatsarinnyu.pdf> (дата обращения: 26.02.2019).
22. Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Logical-mathematical model of decision making in central nervous system SEMS. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*/ Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 51–60. doi:10.1007/978-3-319-53327-8_4
23. Dolgova E. V., Fayzrakhmanov R. A., Kurushin D. S. Decision-making in autonomous mobile robot control system based on active semantic network. *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint-Petersburg, Russia, May 24–26, 2017, с. 221–223.
24. Ludovico Orlando Russo, Stefano Rosa, Marcello Maggiora, Basilio Bona. A novel cloud-based service robotics application to data center environmental monitoring. *Sensors*, 2016 Aug, vol. 16, iss. 8, p. 1255. doi:10.3390/s16081255
25. Mohammed Owais Qureshi, Rumaiya Sajjad Syed. The impact of robotics on employment and motivation of employees in the service sector, with special reference to health care. *Safety and Health at Work*, 2014, vol. 5, iss. 4, pp. 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.07.003>

26. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of Logical-Probabilistic and Logical-Linguistic Constraints to Interval Constraints in the Synthesis of Optimal SEMS*. Series:

Studies in Systems, Decision and Control/ Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7

UDC 621.865.8, 616.7

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

Controlled microrobot for moving in human vessels

A. E. Gorodetskiy^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-3465-4438

I. L. Tarasova^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2282-150X, g17265@yandex.ru

V. G. Kurbanov^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2450-9341

^aInstitute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

Introduction: The creation of controlled microrobots capable of moving in human vessels in accordance with a given traffic is a sophisticated problem. An effective way to solve it is the use of SEMS (Smart ElectroMechanical System) modules. These modules connected in a special way can simulate the operation of a ciliary apparatus or a flagellated propulsor used as propulsive devices for a microrobot. **Purpose:** Development of a controlled medical microrobot based on standard SEMS modules. **Results:** A medical microrobot is developed. The principles of collective movement control for such microrobots are discussed. A special role in microrobot group control is assigned to the central nervous system of a microrobot which functions as an automatic control system. When synthesizing an optimal situational control over a group of microrobots, logical-probabilistic and logical-linguistic constraints are translated into logical-interval ones, reducing the optimization problem to solving a number of classical mathematical programming problems. **Practical relevance:** The use of various combinations of SEMS modules in medical microrobots allows you to increase their accuracy, speed and adaptability to the environment. This is because in this case, in contrast to the mechanisms commonly used in microrobots, parallelism is introduced not only in the measurement and calculation processes, but also in the execution of control commands. The design features of the developed modules allow you to provide broad technological capabilities of various biomedical complexes.

Keywords — safe control, intelligent robots, smart electromechanical systems, group situational interaction, dynamic configuration space, central nervous system.

For citation: Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Controlled microrobot for moving in human vessels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 38–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

References

1. Tarasova I. L., Kurbanov V. G., Gorodetskiy A. E. *Adaptive Capture*. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 119–143. doi:10.1007/978-3-319-53327-8_10
2. Torres-Jara (EC), Eduardo R. A. (US) *Dexterous and compliant robotic finger*, Patent USA, no. PCT/US2011/025001, 2012.
3. Li Zhang, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Bradley E. Kratochvil, Dominik Bell, Bradley J. Nelson. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 6, 064107. doi:10.1063/1.3079655
4. Available at: <https://robo-hunter.com/news/mikroskopicheskie-roboti-ustrici-v-vashih-glazah> (accessed 21 May 2019).
5. Available at: <https://nplus1.ru/news/2017/07/25/blood-robot-swimmers> (accessed 21 May 2019).
6. Available at: https://robo-hunter.com/?utm_source=geek-times&utm_campaign=1-02&utm_content=1-02 (accessed 21 May 2019).
7. Available at: <http://integral-russia.ru/2018/02/03/17307> (accessed 21 May 2019).
8. Agapov V. A. (RU), Gorodetskiy A. E. (RU), Kuchmin A. Yu. (RU), Selivanova E. N. (RU). *Medicinskij mikrorobot* [Medical microrobot]. Patent RU, no. № 2469752, 2012.
9. Hongliang Ren, Hritwick Banerjee. *A Preface in Electromagnetic Robotic Actuation and Sensing in Medicine*. In: *Electromagnetic Actuation and Sensing in Medical Robotics*. Eds. Hongliang Ren, Jinji Sun. 2018. P. 1–10. doi:10.1007/978-981-10-6035-9_1
10. *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
11. *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
12. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Decision-making in central nervous system of a robot. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 21–30 (In Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2018.1.21>
13. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224638>
14. Jong-Hyun Lee, Chang Wook Ahn, Jinung An. An approach to self-assembling swarm robots using multitree genetic programming. *The Scientific World Journal*, 2013, no. 1, pp. 10. Article ID 593848. doi:10.1155/2013/593848
15. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolfi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, vol. 20, no. 4. doi:10.1109/MRA.2013.2252996
16. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. *Situational Control a Group of Robots Based on SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5

- chanical Systems: Group Interaction. Series: Studies in Systems, Decision and Control. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9*
17. Vorob'ev V. V. Logical inference and action planning elements in robot groups. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 88–96 (In Russian).
 18. Ivanov D. Ya., Shabanov I. B. Model of application of coalitions of intelligent mobile robots with limited communications. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 97–105 (In Russian).
 19. Pospelov D. A. *Situacionnoe upravlenie: Teoriya i praktika* [Situational Management: Theory and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 286 p. (In Russian).
 20. Kunc G., O Donnel S. *Upravlenie: sistemnyj i situacionnyj analiz upravlencheskih funkcij* [Management: system and situational analysis of management functions]. Moscow, Progress Publ., 2002. 588 p. (In Russian).
 21. Zatsarinnyy A. A., Kozlov S. V., Shabanov A. P. Information support for the activities of the critical technologies in control systems based on situational centers. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 98–113. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-04/05-Zatsarinnyy.pdf> (accessed 26 February 2019) (In Russian).
 22. Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. *Logical-mathematical model of decision making in central nervous system SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System. Series: Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 51–60. doi:10.1007/978-3-319-53327-8_4
 23. Dolgova E. V., Fayzrakhmanov R. A., Kurushin D. S. Decision-making in autonomous mobile robot control system based on active semantic network. *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint-Petersburg, Russia, 2017, pp. 221–223 (In Russian).
 24. Ludovico Orlando Russo, Stefano Rosa, Marcello Maggiora, Basilio Bona. A novel cloud-based service robotics application to data center environmental monitoring. *Sensors*, 2016 Aug, vol. 16, iss. 8, p. 1255. doi:10.3390/s16081255
 25. Mohammed Owais Qureshi1, Rumaiya Sajjad Syed. The impact of robotics on employment and motivation of employees in the service sector, with special reference to health care. *Safety and Health at Work*, 2014, vol. 5, iss. 4, pp. 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.07.003>
 26. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of Logical-Probabilistic and Logical-Linguistic Constraints to Interval Constraints in the Synthesis of Optimal SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. Series: Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

Исследование методов построения моделей кодер-декодер для распознавания русской речи

Н. М. Марковников^а, программист, orcid.org/0000-0002-2352-4195, niklemark@gmail.com

И. С. Кипяткова^{а, б}, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-1264-4458

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

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

Введение: классические системы автоматического распознавания речи традиционно строятся с помощью акустической модели на основе скрытых моделей Маркова и статистической языковой модели. Такие системы демонстрируют довольно высокую точность распознавания, но состоят из нескольких независимых сложных частей, что при построении моделей может вызывать проблемы. В последнее время распространение получил интегральный метод распознавания с использованием глубоких искусственных нейронных сетей. Этот подход позволяет легко реализовывать модели, применяя только одну нейронную сеть. Интегральные модели часто демонстрируют лучшую производительность с точки зрения скорости и точности распознавания речи. **Цель:** реализация интегральных моделей для распознавания и вычислительных характеристик, таких как скорость обучения и декодирования. **Методы:** создание кодер-декодер-модели распознавания речи с использованием механизма внимания, применение техник стабилизации и регуляризации нейронных сетей, аугментация данных для обучения, установка частей слов в качестве выхода нейронной сети. **Результаты:** получена кодер-декодер-модель на основе механизма внимания для распознавания слитной русской речи без выделения признаков и использования языковой модели. В качестве элементов выходной последовательности были установлены части слов обучающей выборки. Полученная модель не смогла превзойти базовые гибридные модели, однако превзошла базовые интегральные модели как по точности распознавания, так и по скорости декодирования и обучения. Ошибка распознавания слов в речи равна 24,17 %, а скорость декодирования – 0,3 реального времени, что быстрее базовой интегральной и гибридной моделей на 6 и 46 % соответственно. Также показано, что интегральные модели могут работать и без языковых моделей для русского языка, демонстрируя при этом скорость декодирования выше, чем у гибридных моделей. Полученная модель была обучена на данных без выделения каких-либо признаков. В результате экспериментов обнаружено, что для русской речи гибридный тип механизма внимания дает наилучший результат по сравнению с механизмами внимания по расположению и по содержанию. **Практическая значимость:** полученным моделям требуется меньший объем памяти и меньшее время декодирования речи по сравнению с традиционными гибридными моделями, что может позволить использовать их на мобильных устройствах локально, без вычислений на удаленных серверах.

Ключевые слова – распознавание речи, нейронные сети, интегральные модели, машинное обучение, механизм внимания, кодер-декодер-модели.

Для цитирования: Марковников Н. М., Кипяткова И. С. Исследование методов построения моделей кодер-декодер для распознавания русской речи. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 45–53. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-45-53

For citation: Markovnikov N. M., Kipyatkova I. S. Encoder-decoder models for recognition of Russian speech. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 45–53 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-45-53

Введение

Системы автоматического распознавания речи (САРР) традиционно строятся с использованием акустической модели (АМ) с применением скрытых марковских моделей (СММ) и модели гауссовой смеси, а также языковой модели (ЯМ). Эти модели показывают хорошую точность распознавания, но они состоят из нескольких частей, которые приходится настраивать независимо. Таким образом, возникновение ошибок в одной части системы может привести к ошибкам в другой. Кроме того, сценарии стандартного распознавания требуют большого объема памяти и вычислительной мощности, что не позволяет

применять такие системы локально на мобильных устройствах и требует удаленных вычислений на серверах.

Недавно был предложен интегральный метод на основе глубоких искусственных нейронных сетей (ГИНС). Этот подход позволяет легко реализовывать модели, используя только одну нейронную сеть, обученную с помощью метода градиентного спуска и одной функцией потерь. Интегральные модели (end-to-end) часто демонстрируют лучшую производительность с точки зрения скорости и точности. Потенциально этим моделям требуется меньший объем памяти, что позволяет применять их на мобильных устройствах локально, но данные модели требуют боль-

шего объема данных для обучения и получения приемлемого результата.

Целью данного исследования было создание интегральных моделей для распознавания слитной русской речи, сравнение их с гибридными базовыми моделями по показателям точности распознавания и вычислительных затрат, таких как скорость обучения и скорость декодирования.

Точность моделей оценивалась по показателям количества неверно распознанных слов в речи (Word Error Rate — WER) и скорости декодирования (Real-Time Factor — RTF).

Краткий обзор интегральных моделей для автоматического распознавания речи

В статье [1] была предложена интегральная модель распознавания речи на основе механизма внимания и с использованием ЯМ на этапе декодирования моделей. Для интеграции модели с ЯМ были построены конечные взвешенные автоматы [2]. На этапе декодирования выполнялся поиск выходной последовательности, которая бы минимизировала функцию потерь, общую для модели и ЯМ. Таким образом, в данной работе на корпусе английской речи были получены значения WER = 11,3 % и CER = 4,8 %.

Независимо в работе [3] была предложена подобная интегральная система, основанная на архитектуре кодер-декодер с механизмом внимания. Система получила название «Listen, Attend and Spell». Кодер представлял собой нейросетевую модель с двунаправленной длинной краткосрочной памятью (Bidirectional Long Short-Term Memory — BLSTM) [4] в пирамидальной форме, а в декодере использовался стек из обычных LSTM-моделей [5]. Кроме того, на этапе декодирования применялась ЯМ. На корпусе английской речи Google Voice Search была получена оценка WER = 10,3 %.

В статье [6] была предложена модель нейронной сети под названием «Transformer» для задачи машинного перевода текста. Данная модель основана исключительно на механизме внимания и полностью избегает операций повторения и свертки. Эксперименты показывают, что модель Transformer позволяет достичь высокой точности. При этом данная модель обладает высокой степенью распараллеливания вычислений и требует значительно меньшего времени для обучения. Кроме того, было показано, что она подходит и для других задач, например распознавания речи.

Более полный обзор моделей для распознавания речи, в том числе интегральных, может быть найден в работах [7, 8]. Проведенный анализ показал, что интегральные модели могут хорошо работать как с ЯМ, так и без нее для языков со строгим

грамматическим порядком слов (например, английским). Заметим, что русский язык характеризуется высокой степенью грамматической свободы и сложным механизмом словообразования. Таким образом, следует использовать внешние ЯМ для повышения точности. В любом случае, для русского языка не найдено других исследований с применением интегральных моделей распознавания речи.

Модель кодер-декодер с механизмом внимания

Кодер-декодер-модели подходят для задач, где длины входной и выходной последовательностей являются переменными [9]. Кодер — это нейронная сеть, которая трансформирует входные данные в некоторое промежуточное представление и выделяет признаки. Декодер — это, как правило, рекуррентная искусственная нейронная сеть (РИНС) [10], которая получает на вход это промежуточное представление для генерации выходных последовательностей.

В работе [9] в качестве декодера было предложено использовать рекуррентный генератор последовательностей (РГП), основанный на механизме внимания. В качестве реализации механизма внимания применялся многослойный перцептрон (MLP) [11]. РГП — это РИНС, которая генерирует случайную выходную последовательность $y = (y_1, \dots, y_L)$ по входу h длины L . РГП состоит из РИНС и подсети, называемой механизмом внимания (attention-mechanism). Механизм внимания выбирает некоторую часть входной последовательности, которая затем применяется для обновления скрытых состояний РИНС и для предсказания следующего выходного значения. На i -м шаге РГП генерирует выход y_i , фокусируясь на определенных элементах h :

$$\alpha_i = \text{Attend}(s_{i-1}, \alpha_{i-1}, h);$$

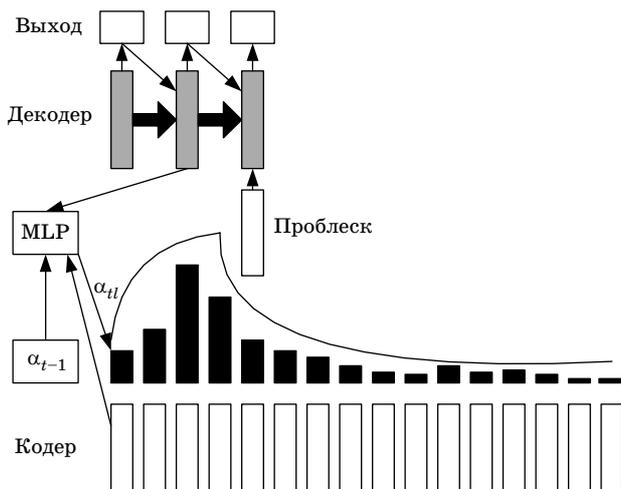
$$g_i = \sum_{j=1}^L \alpha_{i,j} h_j;$$

$$y_i = \text{Generate}(s_{i-1}, g_i),$$

где s_{i-1} — $(i-1)$ -е состояние РИНС, которое называется генератором (Generator), α_{i-1} — вектор весов внимания (attention weights), который также часто называется выравниванием [9]. В работе [12] g_i было названо проблеском (glimpse). Шаг завершается вычислением нового состояния генератора

$$s_i = \text{Recurrency}(s_{i-1}, g_i, y_i).$$

Recurrency обычно представляет из себя LSTM-модули.



■ **Рис. 1.** Интегральная модель, основанная на механизме внимания
 ■ **Fig. 1.** End-to-end encoder-decoder model with an attention mechanism

Схема архитектуры интегральной модели кодер-декодер, представленная на рис. 1, основана на механизме внимания.

Типы механизмов внимания

В работе [12] выделено три типа механизма внимания. Если функция Attend не зависит от α_{i-1} , т. е. $\alpha_i = \text{Attend}(s_{i-1}, \mathbf{h})$, то это — механизм внимания по содержанию [13] (МВ-С). Attend можно представить как нормализованную сумму метрик каждого элемента \mathbf{h} :

$$e_{i,j} = \text{Score}(s_{i-1}, h_j);$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{\exp(e_{i,j})}{\sum_{j=1}^L \exp(e_{i,j})},$$

где Score — некоторая метрика.

Главное ограничение такой схемы в том, что одинаковые или очень похожие элементы \mathbf{h} считаются одинаково, несмотря на их позиции в последовательности, что в распознавании речи имеет большое значение. Так, механизм внимания по расположению (МВ-Р) [10] учитывает историю выравнивания при вычислении выравнивания на текущем временном шаге. Механизм внимания по расположению вычисляет выравнивание с помощью состояния генератора и предыдущего выравнивания, т. е. $\alpha_i = \text{Attend}(s_{i-1}, \alpha_{i-1})$.

Гибридный механизм внимания (МВ-Г) использует предыдущее выравнивание α_{i-1} , чтобы выбрать короткую часть \mathbf{h} , по которой механизм внимания по содержанию выберет наиболее реле-

вантные элементы без проблемы похожих фрагментов речи.

В работе [9] предложена модель с механизмом внимания по содержанию, в которой Score вычисляется следующим образом:

$$e_{i,j} = \mathbf{w}^T \tanh(\mathbf{W}s_{i-1} + \mathbf{V}h_j + \mathbf{b}),$$

где $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^m$ и $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ — настраиваемые векторы; $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ и $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times 2n}$ — матрицы весов, а n и m — число скрытых узлов в сети кодера и в сети декодера соответственно.

В работе [12] предложено обобщение этой модели до гибридной. Сначала выделяются k векторов $\mathbf{f}_{i,j} \in \mathbb{R}^k$ (сверточные признаки) для каждой позиции j предыдущего выравнивания α_{i-1} с помощью свертки с матрицей $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{k \times r}$:

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{F} * \alpha_{i-1}.$$

Затем выполняется операция Score

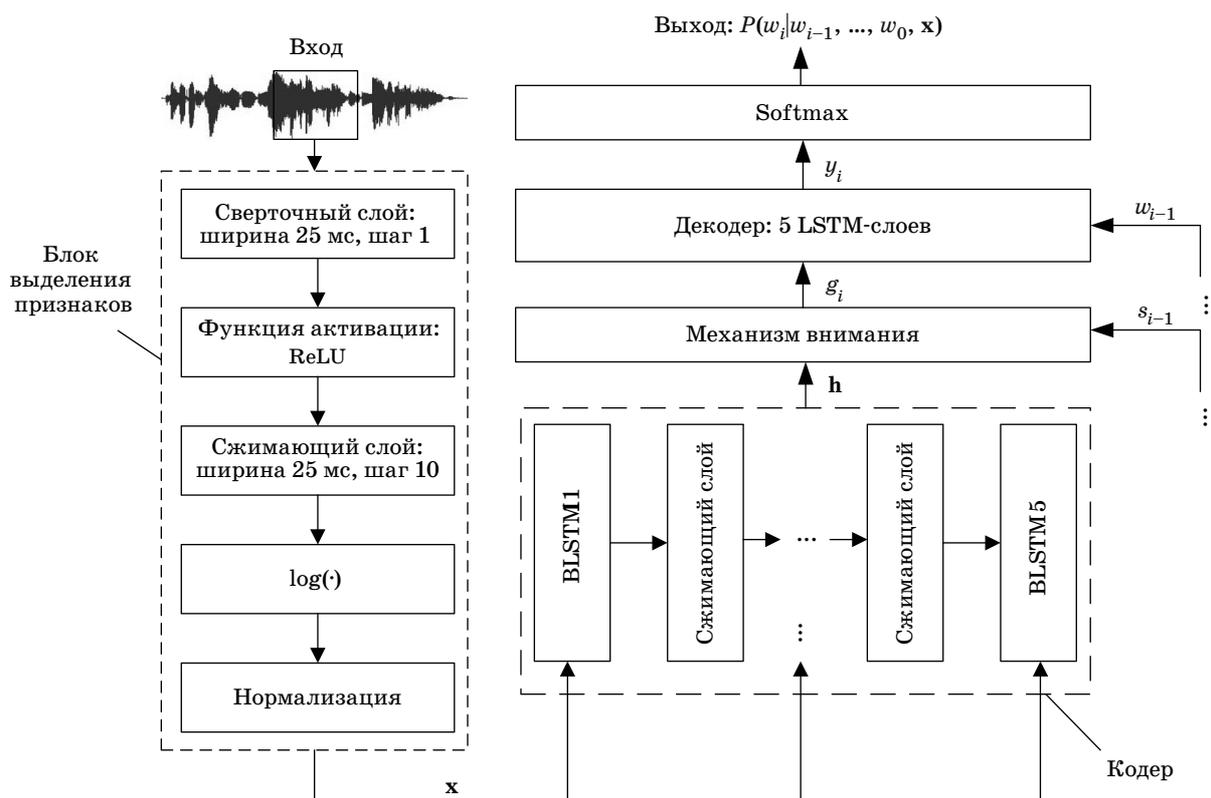
$$e_{ij} = \mathbf{w}^T \tanh(\mathbf{W}s_{i-1} + \mathbf{V}h_j + \mathbf{U}\mathbf{f}_{ij} + \mathbf{b}),$$

где $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times r}$ — матрица весов.

Построение модели кодер-декодер с использованием механизма внимания для распознавания русской речи

В данной работе получена модель для распознавания слитной русской речи, обученная на не обработанных звуковых данных. Для эмуляции стандартных звуковых признаков использовался сверточный слой с окном длиной 25 мс (для соответствия стандартному размеру окна, применяемому в мел-частотных кепстральных коэффициентах) [13]. Данный слой применял операцию свертки с шагом 1. После сверточного слоя применялась функция активации ReLU (Rectified Linear Unit). В итоге был получен выход с 40 каналами для каждой записи. После этого добавлялся сжимающий слой (max-pooling) шириной 25 мс с шагом 10 мс. Этот слой выполнял функцию фильтрации нижних частот. Наконец, была применена функция логарифма для компрессии полученных признаков. Также, после слоев выделения признаков, была выполнена нормализация. Добавлен слой нормализации по средней дисперсии, который применялся к каждому из 40 каналов независимо для каждой последовательности.

Декодер представлял собой обычную LSTM-сеть, а в качестве кодера использовалась двунаправленная LSTM-сеть. Также после каждого слоя в кодере добавлялся слой сжатия (maxpooling) вдоль оси времени для уменьшения



■ Рис. 2. Схема полученной модели
 ■ Fig. 2. A scheme of proposed recognition model

длины сети кодера. Нейросеть кодера содержала пять BLSTM-слоев с 1024 ячейками в каждом. Сеть декодера содержала LSTM-слои такой же конфигурации.

Были проведены эксперименты со всеми тремя типами механизмов внимания для распознавания русской речи.

Схема полученной модели показана на рис. 2.

Размер пакетов при обучении модели был равен 4096. В качестве алгоритма оптимизации выбран алгоритм оптимизации Адама [14] с $\beta_1 = 0,85$, $\beta_2 = 0,997$ и $\varepsilon = 10^{-6}$. Инициализация весов сети производилась случайно из равномерного распределения из отрезка $[-1; 1]$ без нормирования.

Применение различных техник улучшения качества моделей

Построение модели на частях слов

Обычно в качестве элементов выходной последовательности выделяют буквы или графемы, но в работе [15] было показано, что использование частей слов в качестве таких элементов может дать наилучший результат. Поэтому в данной работе в экспериментах применялся метод кодирования

байтовой пары [16]. Этот метод позволяет выбирать части слов, которые являются выходными узлами сети декодера. Выходная последовательность декодировалась алгоритмом лучевого поиска (beam search), который перебирает выходные части слов и выбирает лучший результат. В конце декодирования подстроки слов объединяются в слова, чтобы получить наилучший результат на уровне слов. В итоге был получен словарь из частей слов размером 4803.

Предварительное обучение модели

В экспериментах применена техника предварительного обучения (предобучение) нейронной сети. В работе [3] показано, что глубокие LSTM-модели могут давать лучше результаты, если использовать многоуровневое предобучение, начиная с одного или двух слоев, постепенно увеличивая количество слоев. Поэтому многоуровневое предобучение проводилось в течение 20 эпох (циклов обучения). Также в течение первых пяти эпох предобучения была отключена регуляризация параметров модели.

Было применено послойное предобучение сети кодера. Сначала были предобучены первые два слоя кодера и один промежуточный слой с коэффициентом сжатия 32. Затем были добавлены

еще один LSTM-слой и промежуточный сжимающий слой. При этом коэффициент сжатия первого промежуточного слоя стал равным 16, но новый промежуточный слой имел множитель коэффициента сжатия, равный двум. Таким образом, общий коэффициент сжатия по временной оси в сети кодера всегда был равен 32.

Стабилизация обучения модели

Для стабилизации процесса обучения использовано несколько методов.

Во-первых, была выбрана стратегия настройки коэффициента скорости обучения под названием NewBob [17]. Во время обучения коэффициент скорости обучения уменьшался в момент, когда функция потерь на контрольной выборке переставала уменьшаться. Начальный коэффициент скорости обучения был равен 0,002, коэффициент уменьшения — 0,9.

Во-вторых, была использована техника разогрева обучения (learning warm up) [18] с коэффициентом скорости обучения, равным 0,0002, в течение первых двух эпох. Данный метод позволяет избежать быстрого изменения весов модели на начальных шагах обучения, что может привести к переобучению.

В-третьих, поскольку слишком большие значения норм градиента могут привести к переобучению модели, был применен метод отслеживания норм градиента [19], для чего в процессе обучения модели хранилось распределение норм градиентов. После того, как норма некоторых градиентов попадала в конец распределения, они обрезались. Но иногда в процессе обучения нормы градиента все равно оказывались большими, поэтому был установлен порог нормы, и этот метод был объединен с методом отслеживания норм градиента. Для отслеживания нормы градиента использовалось скользящее среднее со скоростью затухания 0,95. Для определения области, где нормы градиентов нужно обрезать, был выбран коэффициент стандартного отклонения 2,0. Нормы из таких областей заменялись на их средние значения. Если значение нормы превышало пороговое значение, равное 5,0, то градиент также игнорировался.

Также для предотвращения переобучения модели была проведена регуляризация модели с помощью метода под названием «сглаживание меток» [20]. Данный метод не позволяет модели выдавать вероятности, близкие к 1, и сглаживает распределение правильных меток с помощью равномерного распределения по всем меткам [20].

Расширенный речевой корпус для обучения

В данной работе обучение интегральной системы распознавания речи производилось по обучающему речевому корпусу, собранному в СПИИРАН

[21]. Корпус состоит из трех частей, составленных из записей 105 дикторов — носителей русского языка разного пола, и аудиоданных из аудиовизуального корпуса HAVRUS [22]. Общая продолжительность аудиозаписей, входящих в корпус, — более 30 часов.

В работе применялись два метода расширения речевых данных для обучения: изменение скорости и темпа звуковых данных.

Для изменения темпа использовалась функция tempo, реализованная на основе метода WSOLA [23], инструмента Sox [24]. Для каждого элемента обучающего речевого корпуса было применено изменение темпа на 90 и 110 % от исходного значения. Чтобы изменить скорость сигнала, выполнена повторная дискретизация сигнала, для чего также была применена функция из инструмента Sox. Для каждого элемента тренировочного корпуса применено изменение темпа на 90 и 110 % от исходного значения.

Расширенные данные добавлялись только на этапе обучения и не применялись во время шага предварительного обучения для ускорения. В итоге суммарная длительность данных для обучения оказалась равна приблизительно 150 часам.

Результаты экспериментов по автоматическому распознаванию слитной русской речи

Для сравнения результатов получено несколько базовых моделей распознавания речи. Первым базовым решением являлась гибридная модель, объединяющая скрытые марковские модели и глубокие нейронные сети, которая была реализована с помощью инструментариев Kaldi [25] и CNTK [26] и описана в работе [27]. При декодировании использовалась двухграммная ЯМ со сглаживанием Кнесера — Нея [28]. Языковая модель была обучена на данных российских новостных сайтов. Обучающий корпус состоял из примерно 300 млн словоупотреблений. Словарь системы содержал более 150 000 словоформ русского языка. ЯМ применялись при построении базовых моделей. Наилучшие результаты получены в экспериментах с нейросетью топологии ResNet [27] и рекуррентной сверточной сети (RCNN) [29].

Вторым базовым решением являлись модель на основе механизма внимания и BLSTM, а также модель на основе Transformer-сети, реализованные с помощью библиотеки Tensor2Tensor [30]. Эта библиотека предоставляет общий подход к построению моделей для работы с последовательностями, и, в частности, для задачи по распознаванию речи. Результаты экспериментов по распознаванию речи с применением базовых моделей представлены в табл. 1.

■ **Таблица 1.** Результаты экспериментов с базовыми моделями

■ **Table 1.** Experiments results of a baseline models

Модель	WER, %	Скорость декодирования (реальное время)	Скорость обучения, признаков в секунду
RCNN + CMM + 2-граммная ЯМ [27]	22,17	0,205	121,4
BLSTM + механизм внимания [31]	27,83	0,285	401,8
Transformer [31]	26,64	0,203	427,2

Для тестирования системы использовался речевой корпус из 500 фраз, произнесенных пятью дикторами. Фразы для произнесения были взяты из материалов российской онлайн-газеты «Fontanka.ru».

Также из речевого обучающего корпуса были удалены слишком длинные последовательности, так как кодер-декодер тяжело обучать на длинных входных последовательностях.

В экспериментах, результаты которых представлены в табл. 2, обучающая выборка данных

■ **Таблица 2.** Результаты экспериментов с полученными моделями

■ **Table 2.** Experiments results with a proposed models

Модель	WER, %	Скорость декодирования (реальное время)	Скорость обучения, признаков в секунду
Модель с символами на выходе сети + МВ-С	25,76	0,325	454,7
СО + МВ-С	24,98	0,321	461,3
СО + ПС + МВ-С	24,76	0,317	458,6
СО + ПС + МВ-Р	24,97	0,312	498,3
СО + ПС + МВ-Г	24,46	0,298	484,5
СО + ПС + МВ-Г + РД	24,17	0,301	487,6

СО — использование стабилизации обучения; ПС — использование частей слов в качестве выхода сети; РД — использование расширенных данных при обучении.

была объединена с тестовой выборкой, что, очевидно, снизило значение WER. Лучший результат был получен при одновременном использовании гибридного механизма внимания, расширенного речевого корпуса, модели на частях слов и стабилизации обучения: 24,17 % — наименьшая ошибка распознавания слов; 0,3 реального времени — скорость декодирования, что на 6 % быстрее базовой интегральной модели и на 46 % быстрее базовой гибридной модели.

Было проведено сравнение точности распознавания в зависимости от параметра лучевого поиска при декодировании речи. Перебирались параметры со значениями 4, 8, 12, 16, 32. Во всех случаях погрешность распознавания отличалась не более чем на 1 %. Таким образом, можно сделать вывод, что погрешность, полученная при распознавании, зависит от модели, а не от алгоритма декодирования.

Заключение

В данной работе исследована интегральная модель для распознавания слитной русской речи без выделения признаков и языковой модели. В качестве элементов выходной последовательности были выбраны части слов обучающей выборки. Полученная модель не смогла превзойти базовые гибридные, однако превзошла остальные базовые интегральные модели по точности распознавания слов речи и по скорости декодирования речи и обучения модели, что может быть полезно в реальных системах распознавания речи. Также показано, что интегральные модели могут работать и без языковых моделей для русского языка, демонстрируя при этом среднюю скорость декодирования выше, чем у гибридных моделей. Полученная модель была обучена на данных без выделения каких-либо признаков, что позволило достичь большей точности распознавания русской речи. В результате экспериментов обнаружено, что для русской речи гибридный тип механизма внимания дает наилучший результат по сравнению с механизмами внимания по расположению и по содержанию.

В будущем планируется проведение экспериментов по объединению языковых моделей и моделей с механизмом внимания. Предполагается применение методов передачи знаний и объединения нескольких моделей распознавания речи.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проекты № 18-07-01216 и 18-07-01407) и бюджетной темы № 0073-2019-0005.

Литература

1. Bahdanau D., Chorowski J., Serdyuk D., Brakel P., Bengio Y. End-to-end attention-based large vocabulary speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 4945–4949. doi:10.1109/ICASSP.2016.7472618
2. Allauzen C., Riley M., Schalkwyk J., Skut W., Mohri M. OpenFst: A general and efficient weighted finite-state transducer library. *Implementation and Application of Automata*, 2007, pp. 11–23. doi:10.1007/978-3-540-76336-9_3
3. Chan W., Jaitly N., Le Q., Vinyals O. Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 4960–4964. doi:10.1109/ICASSP.2016.7472621
4. Graves Jaitly N., Mohamed A.-r. Hybrid speech recognition with deep bidirectional LSTM. *Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU)*, 2013 IEEE Workshop, pp. 273–278. doi:10.1109/ASRU.2013.6707742
5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, no. 9, pp. 1735–1780. doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735
6. Vaswani A., et al. Attention is all you need. *arXiv*, 2017. <http://arxiv.org/abs/1706.03762> (дата обращения: 27.02.2019).
7. Besacier L., Barnard E., Karpov A., Schultz T. Automatic speech recognition for under-resourced languages: A survey. *Speech Communication*, 2014, pp. 85–100. doi:10.1016/j.specom.2013.07.008
8. Марковников Н. М., Кипяткова И. С. Аналитический обзор интегральных систем распознавания речи. *Тр. СПИИРАН*, 2018, № 58, с. 77–110. doi:10.15622/sp.58.4
9. Sutskever Vinyals O., Le Q. V. Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 3104–3112.
10. Robinson T., Hochberg M., Renals S. The use of recurrent neural networks in continuous speech recognition. *Automatic Speech and Speaker Recognition*, Springer, 1996, pp. 233–258.
11. Chorowski J. K., Bahdanau D., Serdyuk D., Cho K., Bengio Y. Attention-based models for speech recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015, pp. 577–585.
12. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. *arXiv*, 2014. <http://arxiv.org/abs/1409.0473> (дата обращения: 27.02.2019).
13. Ganchev T., Fakotakis N., Kokkinakis G. Comparative evaluation of various MFCC implementations on the speaker verification task. *Proc. of the SPECOM*, 2005, pp. 191–194.
14. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv*, 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения: 27.02.2019).
15. Zeyer A., Doetsch P., Voigtlaender P., Schluter R., Ney H. A comprehensive study of deep bidirectional LSTM RNNs for acoustic modeling in speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017, pp. 2462–2466. doi:10.1109/ICASSP.2017.7952599
16. Sennrich R., Haddow B., Birch A. Neural machine translation of rare words with subword units. *ACL*, 2016, pp. 1715–1725. doi:10.18653/v1/P16-1162
17. Simon Wiesler A. R., Schlüter R., Ney H. Mean-normalized stochastic gradient for large-scale deep learning. *IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2014, pp. 180–184. doi:10.1109/ICASSP.2014.6853582
18. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778. doi:10.1109/CVPR.2016.90
19. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 2818–2826. doi:10.1109/CVPR.2016.308
20. Chiu C. C., et al. State-of-the-art speech recognition with sequence-to-sequence models. *IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018, pp. 4774–4778. doi:10.1109/ICASSP.2018.8462105
21. Kipyatkova I., Karpov A. DNN-based acoustic modeling for Russian speech recognition using Kaldi. *Intern. Conf. on Speech and Computer (SPECOM)*, 2016, pp. 246–253. doi:10.1007/978-3-319-43958-7_29
22. Verkhodanova V., Ronzhin A., Kipyatkova I. Havrus corpus: high-speed recordings of audio-visual Russian speech. *Intern. Conf. on Speech and Computer (SPECOM)*, 2016, pp. 338–345. doi:10.1007/978-3-319-43958-7_40
23. Verhelst W., Roelands M. An overlap-add technique based on waveform similarity (wsola) for high quality time-scale modification of speech. *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 1993, pp. 554–557. doi:10.1109/ICASSP.1993.319366
24. Инструмент обработки звука Sox. <http://sox.sourceforge.net/sox.html> (дата обращения: 27.02.2019).
25. Povey D., et al. The Kaldi speech recognition toolkit. *IEEE 2011 Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding*, 2011. <https://infoscience.epfl.ch/record/192584/> (дата обращения: 27.02.2019).
26. *The Microsoft Cognitive Toolkit*. <https://docs.microsoft.com/ru-ru/cognitive-toolkit/> (дата обращения: 27.02.2019).
27. Markovnikov N., Kipyatkova I., Karpov A., Filchenkov A. Deep neural networks in Russian speech recognition. *Conf. on Artificial Intelligence and Natural Language (AINL)*, 2017, pp. 54–67. doi:10.1007/978-3-319-71746-3_5
28. Chen S. F., Goodman J. An empirical study of smoothing techniques for language modeling. *Computer*

Speech & Language, 1999, pp. 359–394. doi:10.1006/csla.1999.0128

29. Liang M., Hu X. Recurrent convolutional neural network for object recognition. *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 3367–3375. doi:10.1109/CVPR.2015.7298958

30. *Инструментарий Tensor2Tensor*. <https://github.com/tensorflow/tensor2tensor> (дата обращения: 27.02.2019).

31. Markovnikov N., Kipyatkova I., Lyakso E. End-to-end speech recognition in Russian. *SPECOM-2018*, 2018, pp. 377–386. doi:10.1007/978-3-319-99579-3

UDC 004.522

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-45-53

Encoder-decoder models for recognition of Russian speech

N. M. Markovnikov^a, Programmer, orcid.org/0000-0002-2352-4195, niklemark@gmail.com

I. S. Kipyatkova^{a,b}, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-1264-4458

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

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

Problem: Classical systems of automatic speech recognition are traditionally built using an acoustic model based on hidden Markov models and a statistical language model. Such systems demonstrate high recognition accuracy, but consist of several independent complex parts, which can cause problems when building models. Recently, an end-to-end recognition method has been spread, using deep artificial neural networks. This approach makes it easy to implement models using just one neural network. End-to-end models often demonstrate better performance in terms of speed and accuracy of speech recognition. **Purpose:** Implementation of end-to-end models for the recognition of continuous Russian speech, their adjustment and comparison with hybrid base models in terms of recognition accuracy and computational characteristics, such as the speed of learning and decoding. **Methods:** Creating an encoder-decoder model of speech recognition using an attention mechanism; applying techniques of stabilization and regularization of neural networks; augmentation of data for training; using parts of words as an output of a neural network. **Results:** An encoder-decoder model was obtained using an attention mechanism for recognizing continuous Russian speech without extracting features or using a language model. As elements of the output sequence, we used parts of words from the training set. The resulting model could not surpass the basic hybrid models, but surpassed the other baseline end-to-end models, both in recognition accuracy and in decoding/learning speed. The word recognition error was 24.17% and the decoding speed was 0.3 of the real time, which is 6% faster than the baseline end-to-end model and 46% faster than the basic hybrid model. We showed that end-to-end models could work without language models for the Russian language, while demonstrating a higher decoding speed than hybrid models. The resulting model was trained on raw data without extracting any features. We found that for the Russian language the hybrid type of an attention mechanism gives the best result compared to location-based or context-based attention mechanisms. **Practical relevance:** The resulting models require less memory and less speech decoding time than the traditional hybrid models. That fact can allow them to be used locally on mobile devices without using calculations on remote servers.

Keywords — speech recognition, neural networks, end-to-end models, machine learning, attention mechanism, encoder-decoder models.

For citation: Markovnikov N. M., Kipyatkova I. S. Encoder-decoder models for recognition of Russian speech. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 45–53 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-45-53

References

- Bahdanau D., Chorowski J., Serdyuk D., Brakel P., Bengio Y. End-to-end attention-based large vocabulary speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 4945–4949. doi:10.1109/ICASSP.2016.7472618
- Allauzen C., Riley M., Schalkwyk J., Skut W., Mohri M. OpenFst: A general and efficient weighted finite-state transducer library. *Implementation and Application of Automata*, 2007, pp. 11–23. doi:10.1007/978-3-540-76336-9_3
- Chan W., Jaitly N., Le Q., Vinyals O. Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 4960–4964. doi:10.1109/ICASSP.2016.7472621
- Graves Jaitly N., Mohamed A.-r. Hybrid speech recognition with deep bidirectional LSTM. *Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU)*, IEEE Workshop on, IEEE, 2013, pp. 273–278. doi:10.1109/ASRU.2013.6707742
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, no. 9, pp. 1735–1780. doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735
- Vaswani A., et. al. Attention is all you need. *arXiv*, 2017. Available at: <http://arxiv.org/abs/1706.03762> (accessed 27 February 2019).
- Besacier L., Barnard E., Karpov A., Schultz T. Automatic speech recognition for under-resourced languages: A survey. *Speech Communication*, 2014, pp. 85–100. doi:10.1016/j.specom.2013.07.008
- Markovnikov N., Kipyatkova I. A survey of end-to-end speech recognition systems. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2018, vol. 58, pp. 77–110 (In Russian). doi:10.15622/sp.58.4
- Sutskever Vinyals O., Le Q. V. Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 3104–3112.
- Robinson T., Hochberg M., Renals S. The use of recurrent neural networks in continuous speech recognition. *Automatic Speech and Speaker Recognition*, Springer, 1996, pp. 233–258.
- Chorowski J. K., Bahdanau D., Serdyuk D., Cho K., Bengio Y. Attention-based models for speech recognition. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015, pp. 577–585.
- Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. *arXiv*, 2014. Available at: <http://arxiv.org/abs/1409.0473> (accessed 27 February 2019).

13. Ganchev T., Fakotakis N., Kokkinakis G. Comparative evaluation of various MFCC implementations on the speaker verification task. *Proc. of the SPECOM*, 2005, pp. 191–194.
14. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv*, 2014. Available at: <http://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 27 February 2019).
15. Zeyer A., Doetsch P., Voigtlaender P., Schluter R., and Ney H. A comprehensive study of deep bidirectional LSTM RNNs for acoustic modeling in speech recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017, pp. 2462–2466. doi:10.1109/ICASSP.2017.7952599
16. Sennrich R., Haddow B., and Birch A. Neural machine translation of rare words with subword units. *ACL*, 2016, pp. 1715–1725. doi:10.18653/v1/P16-1162
17. Simon Wiesler A. R., Schlüter R., Ney H. Mean-normalized stochastic gradient for large-scale deep learning. *IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2014, pp. 180–184. doi:10.1109/ICASSP.2014.6853582
18. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778. doi:10.1109/CVPR.2016.90
19. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 2818–2826. doi:10.1109/CVPR.2016.308
20. Chiu C. C., et. al. State-of-the-art speech recognition with sequence-to-sequence models. *IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018, pp. 4774–4778. doi:10.1109/ICASSP.2018.8462105
21. Kipyatkova I., Karpov A. DNN-based acoustic modeling for Russian speech recognition using Kaldi. *Intern. Conf. on Speech and Computer (SPECOM)*, 2016, pp. 246–253. doi:10.1007/978-3-319-43958-7_29
22. Verkhodanova V., Ronzhin A., Kipyatkova I. Havrus corpus: high-speed recordings of audio-visual Russian speech. *Intern. Conf. on Speech and Computer (SPECOM)*, 2016, pp. 338–345. doi:10.1007/978-3-319-43958-7_40
23. Verhelst W., Roelands M. An overlap-add technique based on waveform similarity (wsola) for high quality time-scale modification of speech. *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 1993, pp. 554–557. doi:10.1109/ICASSP.1993.319366
24. *Instrument obrabotki zvuka Sox* [Sound Processing Tool Sox]. Available at: <http://sox.sourceforge.net/sox.html> (accessed 27 February 2019).
25. Povey D., et. al. The Kaldi speech recognition toolkit. *IEEE 2011 Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding*, 2011. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/192584/> (accessed 27 February 2019).
26. *The Microsoft Cognitive Toolkit*. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/cognitive-toolkit/> (accessed 27 February 2019).
27. Markovnikov N., Kipyatkova I., Karpov A., Filchenkov A. Deep neural networks in Russian speech recognition. *Conf. on Artificial Intelligence and Natural Language (AINL)*, 2017, pp. 54–67. doi:10.1007/978-3-319-71746-3_5
28. Chen S. F., Goodman J. An empirical study of smoothing techniques for language modeling. *Computer Speech & Language*, 1999, pp. 359–394. doi:10.1006/csla.1999.0128
29. Liang M., Hu X. Recurrent convolutional neural network for object recognition. *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 3367–3375. doi:10.1109/CVPR.2015.7298958
30. *Instrumentarij Tensor2Tensor* [Tensor2Tensor Toolkit]. Available at: <https://github.com/tensorflow/tensor2tensor> (accessed 27 February 2019).
31. Markovnikov N., Kipyatkova I., Lyakso E. End-to-end speech recognition in Russian. *SPECOM-2018*, 2018, pp. 377–386. doi:10.1007/978-3-319-99579-3

УДК 537.86

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-54-61

Оценка конфиденциальности системы передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием и переключаемым временем задержки

В. И. Пономаренко^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-1579-6465

Е. В. Навроцкая^б, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-1649-440X

Д. Д. Кульминский^{а, б}, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-3936-2813

М. Д. Прохоров^а, доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, orcid.org/0000-0003-4069-9410, mdprokhorov@yandex.ru

^аСаратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Зеленая ул., 38, Саратов, 410019, РФ

^бСаратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Астраханская ул., 83, Саратов, 410012, РФ

Введение: системы связи, основанные на использовании динамического хаоса, имеют ряд положительных свойств. Динамический хаос обладает свойствами случайных процессов, что дает возможность системам на его основе обеспечить конфиденциальность передаваемой информации. Однако количественная оценка степени скрытности таких систем связи является сложной задачей, поскольку методы оценки криптографической стойкости хорошо разработаны лишь для классических алгоритмов шифрования. **Цель:** разработка метода количественной оценки конфиденциальности передачи скрытого бинарного сигнала в системе связи, основанной на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки. **Результаты:** предложен метод оценки конфиденциальности передачи бинарного информационного сигнала в системе связи, использующей в качестве передатчика хаотический генератор с запаздыванием с переключаемым временем задержки. Метод основан на оценке мощности ключевого пространства для исследуемой хаотической системы передачи информации. Рассмотрены случаи, при которых часть параметров передатчика известна, и наиболее общий случай, при котором все параметры передатчика являются неизвестными. Показано, что система передачи информации, основанная на динамическом хаосе, может обладать значительно более высокой конфиденциальностью, чем классический криптографический алгоритм, использующий шифр с длиной ключа 56 бит, но существенно уступает по криптографической стойкости шифру с длиной ключа 128 бит. **Практическая значимость:** предложенная методика позволяет получить количественную оценку конфиденциальности систем передачи информации, основанных на динамическом хаосе, и сравнить ее с известной стойкостью классических алгоритмов криптографии.

Ключевые слова – система передачи информации, динамический хаос, криптография, системы с запаздыванием.

Для цитирования: Пономаренко В. И., Навроцкая Е. В., Кульминский Д. Д., Прохоров М. Д. Оценка конфиденциальности системы передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием и переключаемым временем задержки. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 54–61. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-54-61

For citation: Ponomarenko V. I., Navrotskaya E. V., Kul'minskii D. D., Prokhorov M. D. Estimation of confidentiality of a communication system based on chaotic time-delay generator with switchable delay time. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 54–61 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-54-61

Введение

Вторая половина прошлого века ознаменовалась широким изучением явления динамического хаоса и поиском его приложений к теории искусственного интеллекта, биологии, экономике и другим отраслям науки. Одним из направлений применения динамических систем, демонстрирующих хаотическое поведение, стало их использование для скрытой передачи информации. Было предложено множество способов скрытой передачи информации с использованием динамического хаоса [1–12]. Однако количественную оценку криптографической стойкости таких систем связи провести довольно сложно из-за существенного отличия принципов построения математических

алгоритмов криптографии [13] и систем скрытой связи на динамическом хаосе [1, 2]. В то же время такая оценка важна для количественного сравнения стандартных криптографических алгоритмов и хаотических систем связи [14, 15].

В общем случае для дешифровки скрытого сообщения необходимо с высокой точностью восстановить структуру и параметры передатчика, а также алгоритм хаотической модуляции, после чего построить копию передатчика в приемнике. Таким образом, если о передающей системе почти ничего неизвестно, задача дешифровки сообщения сильно усложняется. Мы рассматриваем более простую ситуацию, предполагая, что структура передатчика и алгоритм модуляции заранее известны, а неизвестными являются только параметры передатчика.

В качестве примера системы связи, основанной на использовании динамического хаоса, рассмотрена система передачи информации на базе хаотического генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки. Для этой системы предложен метод количественной оценки конфиденциальности передачи скрытого бинарного сигнала. Метод основан на оценке мощности ключевого пространства для случая, когда значения всех параметров передатчика (времена запаздывания, параметры фильтра, вид нелинейной функции и ее параметры) неизвестны.

Исследуемая система передачи информации

Рассмотрим систему скрытой передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием [4]. Блок-схема исследуемой системы связи показана на рис. 1.

Поясним кратко принцип ее работы. В зависимости от величины бинарного информационного сигнала $m(t)$ (0 или 1) время запаздывания в передатчике переключается с помощью ключа K между τ_1 и $\tau_1 + \tau_2$, где τ_1 и τ_2 — времена запаздывания линий задержки ЛЗ-1 и ЛЗ-2 соответственно. Передатчик описывается уравнением

$$\varepsilon_1 \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - (\tau_1 + m(t)\tau_2))), \quad (1)$$

где $\varepsilon_1 = RC$ — параметр низкочастотного RC -фильтра первого порядка, определяющий инерционные свойства системы; $x(t)$ — сигнал на выходе фильтра Φ , передаваемый в канал связи; $f(x)$ — нелинейная функция, описывающая передаточную характеристику усилителя, играющего роль нелинейного элемента НЭ. Приемник состоит из двух ведомых систем с задержкой, динамика которых описывается уравнениями

$$\varepsilon_2 \dot{y}(t) = -y(t) + f(x(t - \tau_3)); \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 \dot{z}(t) = -z(t) + f(x(t - \tau_4)), \quad (3)$$

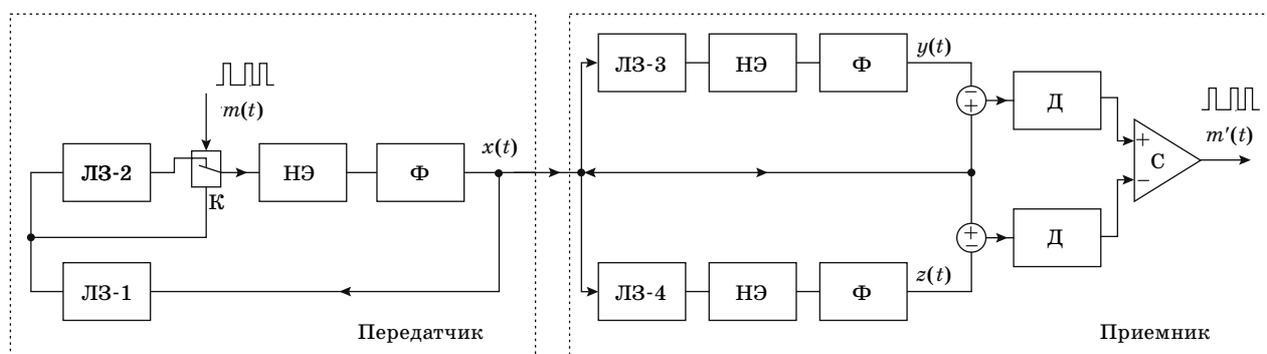
где τ_3 и τ_4 — времена запаздывания линий задержки ЛЗ-3 и ЛЗ-4 соответственно, а ε_2 и ε_3 — параметры фильтров Φ в первой и во второй ведомой системе приемника соответственно.

Для расшифровки сигнала $m(t)$ параметры фильтров Φ и нелинейных элементов НЭ приемника необходимо выбрать идентичными соответствующим параметрам передатчика, а времена запаздывания линий задержек выбрать следующим образом: $\tau_3 = \tau_1$ и $\tau_4 = \tau_1 + \tau_2$. Если $m(t) = 0$, то в результате синхронизации сигналов $x(t)$ и $y(t)$ имеем $y(t) = x(t)$ при отсутствии шума в канале связи, а $z(t) \neq x(t)$. Если $m(t) = 1$, то $z(t) = x(t)$, а $y(t) \neq x(t)$. Присутствие шумов препятствует полной синхронизации приемника с передатчиком.

Для борьбы с шумами схема содержит детекторы D , которые оценивают дисперсии $\sigma_y^2(t)$ и $\sigma_z^2(t)$ разностных сигналов $x(t) - y(t)$ и $x(t) - z(t)$ соответственно на длине ряда, соответствующей длине передаваемого информационного бита. Компаратор C вычисляет разность дисперсий $r(t) = \sigma_y^2(t) - \sigma_z^2(t)$ и формирует восстановленный информационный сигнал $m'(t)$. Если $r(t) \leq 0$, то $m'(t) = 0$, а если $r(t) > 0$, то $m'(t) = 1$. Более подробное описание принципа работы схемы представлено в работах [4, 7]. Такая система передачи информации обладает высокой помехоустойчивостью, однако оценка ее конфиденциальности до настоящего времени не проводилась.

Оценка конфиденциальности системы связи

Для количественной оценки конфиденциальности системы передачи информации, представленной на рис. 1, введем ряд предположений. Будем считать, что неавторизованному пользователю известна структура передатчика и его модельное уравнение, известен алгоритм хаоти-



■ **Рис. 1.** Блок-схема системы передачи информации на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки
 ■ **Fig. 1.** Block diagram of a communication system based on a chaotic time-delay generator with a switched delay time

ческой модуляции и длительность передачи одного бита информации. Параметры передатчика τ_1 , τ_2 , ε_1 и нелинейную функцию $f(x)$ будем считать неизвестными для стороннего наблюдателя. Неизвестные параметры передатчика являются аналогом секретного ключа, который требуется найти, имея в распоряжении лишь временной ряд хаотического сигнала $x(t)$, передаваемого в канале связи. При этом для простоты полагаем, что шумы в канале связи отсутствуют.

Для нахождения ключа будем использовать метод полного перебора. Выбор границ перебора параметров, определяющих мощность ключевого пространства, подробно обсудим в следующем разделе. В качестве критерия удовлетворительного качества дешифровки скрытого сообщения будем использовать величину BER (Bit-Error-Rate), равную нулю. Мощность ключевого пространства хаотической системы передачи информации, описываемой уравнением (1), будем сравнивать с мощностью ключевого пространства классических криптографических алгоритмов DES (Data Encryption Standard) и AES (Advanced Encryption Standard), представляющих собой шифр с длиной ключа 56 и 128 бит соответственно [16, 17].

На первом этапе будем полагать, что передаточная функция для нелинейного усилителя передатчика известна, и требуется провести подбор времен запаздывания линий задержки и время инерционности фильтра в передатчике. На втором этапе оценим, какие параметры и с каким шагом нужно перебирать для того, чтобы подобрать передаточную функцию нелинейного усилителя. Будем аппроксимировать ее степенным полиномом и перебирать коэффициенты полинома. На третьем этапе оценим, сколько вариантов набора параметров необходимо перебрать, если никакие параметры передатчика неизвестны.

Следует отметить, что исследуемая система передачи информации обладает в некоторой мере стеганографическими свойствами, т. е. она скрывает и сам факт передачи информационного сигнала. Если сторонний наблюдатель не знает, передается сообщение или нет, он сможет определить факт передачи информации только по косвенным признакам, например, по увеличению мощности принимаемого сигнала в некоторой полосе. В то же время обычная передача цифрового сигнала дает информацию не только о факте передачи, но и о скорости передачи данных.

Результаты

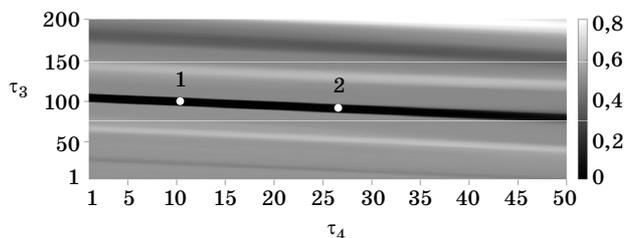
Предположим сначала, что нам известна в явном виде нелинейная функция $f(x)$ и параметр ε_1 передатчика, а времена запаздывания τ_1 и τ_2 неизвестны. Пусть $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$, а длительность

передачи одного бита информации составляет 200 единиц дискретного времени. Установим параметры фильтров и нелинейных функций приемника такими же, как в передатчике, а для определения τ_1 и τ_2 будем перебирать в приемнике значения τ_3 в диапазоне [1, 200], а τ_4 — в диапазоне [1, 50] с шагом 1. Такой выбор обусловлен длиной бита в рассматриваемой системе передачи информации. Для каждой пары значений τ_3 и τ_4 проведем численное моделирование, попытаюсь извлечь передаваемый информационный сигнал и вычисляя BER для оценки качества его приема. На рис. 2 оттенками серого цвета показаны значения BER при различных значениях τ_3 и τ_4 при передаче 2000 бит информационного сигнала.

В точке 1 на рис. 2 $\tau_3 = \tau_1$, $\tau_4 = \tau_2$ и BER = 0. Из рисунка видно, что даже при существенном отличии времен запаздывания в приемнике от времен запаздывания в передатчике можно найти такую пару значений (τ_3, τ_4) , при которой величина BER будет достаточно малой. Область с малыми значениями BER находится на рис. 2 внутри темной полосы. Если через середину этой полосы провести прямую линию, то лежащие на ней точки описываются эмпирическим уравнением

$$\tau_3 + 0,5\tau_4 = 105. \tag{4}$$

Качество выделения информационного сигнала в приемнике падает при больших значениях τ_4 , лежащих на линии (4), например, BER = 0,001 при $\tau_3 = 92$ и $\tau_4 = 26$ (точка 2). При $\tau_4 = \text{const}$ ширина полосы на рис. 2, внутри которой BER = 0, составляет 5 единиц дискретного времени по τ_3 . Это означает, что, выбрав τ_4 , лежащим на линии (4), мы получим BER = 0 в интервале $[\tau_3 - 2, \tau_3 + 2]$, где $\tau_3 = 105 - 0,5\tau_4$ при условии, что $\tau_4 \leq 25$. При $\tau_3 = \text{const}$ ширина полосы, внутри которой BER = 0, составляет 7 единиц дискретного времени по τ_4 . Это означает, что, выбрав τ_3 , лежащим на линии (4), мы получим BER = 0 в интервале $[\tau_4 - 3, \tau_4 + 3]$, где $\tau_4 = 2(105 - \tau_3)$ при условии, что $\tau_4 \leq 25$.



■ **Рис. 2.** Значения BER при различных значениях τ_3 и τ_4 при передаче 2000 бит информационного сигнала при $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$

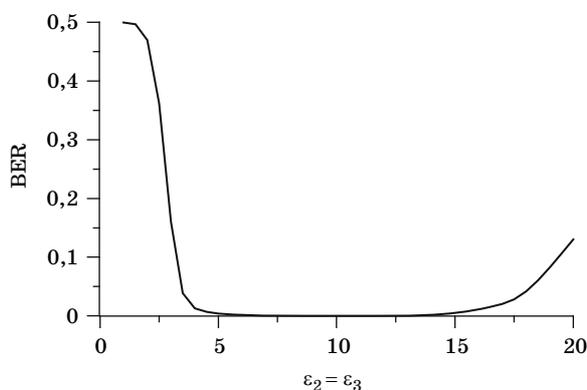
■ **Fig. 2.** BER values for different values of τ_3 and τ_4 at a transmission of 2000 bits of the information signal for $\tau_1 = 100$, $\tau_2 = 10$

Таким образом, для того чтобы на рис. 2 гарантированно попасть в область, внутри которой $BER = 0$, достаточно перебирать τ_3 с шагом 5 и τ_4 с шагом 7. Вместо полного перебора $200 \times 50 = 10\,000$ всевозможных пар значений τ_3 и τ_4 в диапазонах $[1, 200]$ и $[1, 50]$ соответственно для выделения скрытого информационного сигнала с качеством дешифровки $BER = 0$ достаточно перебрать в приемнике $40 \times 8 = 320$ пар значений τ_3 и τ_4 .

Исследуем теперь зависимость качества дешифровки скрытого информационного сигнала от вариации параметров инерционности фильтров в приемнике. При фиксированных параметрах $\tau_3 = \tau_1 = 100$, $\tau_4 = \tau_2 = 10$ и $\varepsilon_1 = 10$ будем изменять в приемнике величину параметров $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ в диапазоне $[1, 20]$ и вычислять BER. Полученные результаты представлены на рис. 3.

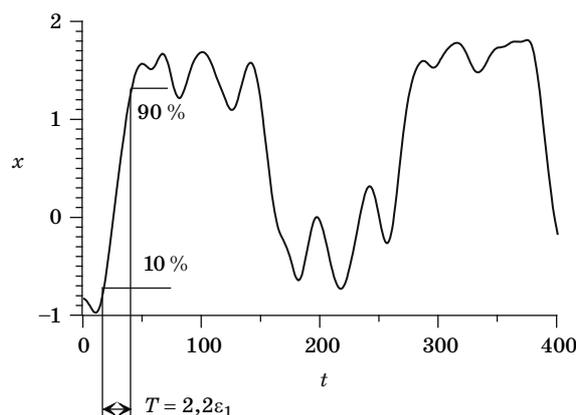
При $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_1$ и отсутствии шумов в канале связи информационный сигнал выделяется в приемнике без ошибок и $BER = 0$. Однако даже при больших отличиях значений ε_2 и ε_3 от $\varepsilon_1 = 10$ величина BER увеличивается несущественно. При $8 \leq \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \leq 12$ имеем $BER = 0$, а за пределами этой области в приемнике начинают появляться единичные ошибки при выделении информационного сигнала. Например, при $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 15$ получаем $BER = 0,005$ (см. рис. 3). Следовательно, точность оценки параметра инерционности ε_1 не является критической для удовлетворительного качества выделения сообщения в приемнике. Оценить величину ε_1 можно по временному ряду сигнала передатчика и не подбирать ее. В дальнейших расчетах мы устанавливали $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_1 = 10$.

Примерно оценить время инерционности фильтра в передатчике можно по временному ряду передаваемого в канал связи хаотического сигнала $x(t)$ (рис. 4), поскольку длительность T



■ **Рис. 3.** Зависимость BER от величины параметров $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ при передаче 2000 бит информационного сигнала при $\varepsilon_1 = 10$

■ **Fig. 3.** Dependence of BER on the parameter values $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ at a transmission of 2000 bits of the information signal for $\varepsilon_1 = 10$



■ **Рис. 4.** Оценка параметра инерционности ε_1 по временному ряду сигнала передатчика

■ **Fig. 4.** Estimation of the parameter of inertia ε_1 from time series of the transmitter signal

фронта сигнала по уровню от 10 до 90 % на выходе фильтра первого порядка [18] примерно равна $T = 2,2\varepsilon_1$. На рис. 4 представлены 10- и 90-процентные уровни между соседними минимумом и максимумом, расстояние между которыми составляет в дискретном времени $T = 23$. Откуда получаем оценку $\varepsilon_1 = 10,45$, которая близка к истинному значению $\varepsilon_1 = 10$.

Далее рассмотрим случай, когда времена запаздывания линий задержек и параметр инерционности фильтра в передатчике известны, а неизвестной является только нелинейная функция передатчика. Один из способов аппроксимировать нелинейную функцию — это представить ее в виде степенного полинома. При этом для аппроксимации простых нелинейных функций (квадратичной, кубической и др.) достаточно небольшого числа коэффициентов полинома. Такие нелинейные функции легко реконструировать, и их использование снижает конфиденциальность хаотических систем передачи информации.

В данной работе в качестве нелинейной функции передатчика выбрано нелинейное преобразование «сдвиг Бернулли»

$$f(x) = \{2x\}, \quad (5)$$

где фигурные скобки обозначают дробную часть числа. Аппроксимация такого преобразования требует большего числа коэффициентов, чем аппроксимация простых функций, и, следовательно, эти коэффициенты сложнее подобрать.

Для аппроксимации функции (5) используем в приемнике степенной полином 7-го порядка

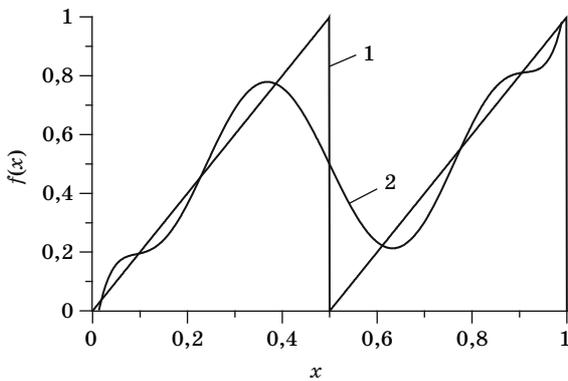
$$f(x) = p_7x^7 + p_6x^6 + p_5x^5 + p_4x^4 + p_3x^3 + p_2x^2 + p_1x + p_0. \quad (6)$$

Выбор такого порядка полинома обусловлен тем, что при меньших порядках не удастся обеспечить прием информационного сигнала без ошибок. С помощью метода наименьших квадратов мы получили при аппроксимации функции (5) следующие коэффициенты полинома (6):

$$p_7 = 948; p_6 = -3330; p_5 = 4538; p_4 = -3003; \\ p_3 = 989; p_2 = -152; p_1 = 11; p_0 = -0,12. \quad (7)$$

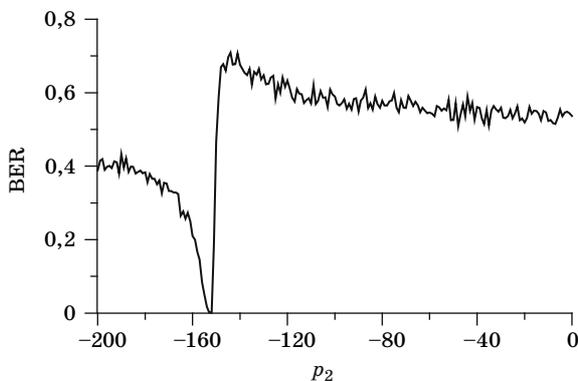
Нелинейная функция (5) в передатчике и ее аппроксимация полиномом (6) с коэффициентами (7) приведена на рис. 5. Следует отметить, что даже при такой грубой аппроксимации нелинейной функции передаваемое сообщение выделяется в приемнике без ошибок.

Исследуем зависимость BER при приеме информационного сигнала от значений коэффициентов полинома (6). На рис. 6 построена зависи-



■ **Рис. 5.** Нелинейная функция в виде сдвига Бернулли (линия 1) и ее аппроксимация степенным полиномом 7-го порядка (линия 2)

■ **Fig. 5.** Nonlinear function in the form of Bernoulli shift (line 1) and its approximation by a power polynomial of the 7th order (line 2)



■ **Рис. 6.** Зависимость BER от величины коэффициента p_2 при передаче 2000 бит информационного сигнала

■ **Fig. 6.** Dependence of BER on the value of coefficient p_2 at a transmission of 2000 bits of the information signal

мость BER от коэффициента p_2 при вариации его значений в диапазоне $[-200, 0]$ и постоянных значениях остальных коэффициентов, взятых из (7). Из рисунка видно, что $BER = 0$ при $p_2 = -152$, равном оптимальному значению p_2 в (7), а при отклонении от этого значения BER быстро растет. Для того чтобы попасть в минимум зависимости BER от p_2 , значения коэффициента p_2 следует перебирать с шагом 1.

Качественно похожий вид имеет зависимость BER от коэффициентов p_1, p_3, \dots, p_7 . Величина коэффициента p_0 не влияет на величину BER, поскольку этот коэффициент отвечает за линейное вертикальное смещение графика полинома.

Для другой нелинейной функции, имеющей вид непрерывного «отображения палатки»:

$$f(x) = \begin{cases} 2x, & 0 < x < \frac{1}{2} \\ 2(1-x), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases}, \quad (8)$$

коэффициенты аппроксимирующего полинома 7-го порядка будут следующими: $p_7 = 1,3 \times 10^{-10}$; $p_6 = -93,381$; $p_5 = 280,14$; $p_4 = -305,2$; $p_3 = 143,49$; $p_2 = -29,289$; $p_1 = 4,2365$; $p_0 = -0,037984$.

Таким образом, если мы заранее не знаем нелинейную функцию, но знаем времена запаздывания и параметр инерционности, то для восстановления коэффициентов полинома, аппроксимирующего нелинейную функцию передатчика, необходимо перебрать достаточно большое количество коэффициентов в многомерном пространстве. Для того чтобы метод перебора коэффициентов позволил восстановить различные возможные нелинейные функции с количеством экстремумов не более трех, необходимо перебирать коэффициенты полинома 7-го порядка в достаточно широком диапазоне. При расчетах мы перебирали коэффициенты в следующих интервалах: $p_7 \in [-1000, 1000]$, $p_6 \in [-5000, 5000]$, $p_5 \in [-5000, 5000]$, $p_4 \in [-5000, 5000]$, $p_3 \in [-1000, 1000]$, $p_2 \in [-200, 200]$, $p_1 \in [-10, 10]$. Для нахождения оптимального набора коэффициентов (7) полинома (6) методом прямого перебора всех перечисленных коэффициентов с шагом 1 потребуется перебрать примерно $3,2 \times 10^{22}$ комбинаций. Для аппроксимации нелинейных функций передатчика с числом экстремумов более трех потребуются полиномы более высокого порядка, и количество перебираемых комбинаций при восстановлении их коэффициентов увеличится.

Наконец, рассмотрим случай, когда неизвестны все параметры передатчика. Для нахождения параметров, обеспечивающих выделение скрытого информационного сигнала с качеством дешифровки $BER = 0$, потребуется перебрать в при-

емнике $320 \times (3,2 \times 10^{22})$ различных комбинаций параметров. При этом параметр инерционности можно оценить по временному ряду. Общее количество вариантов примерно равно $10^{25} \approx 2^{80}$.

Таким образом, система передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки имеет мощность ключевого пространства примерно 2^{80} и, следовательно, обладает значительно более высокой конфиденциальностью, чем классический криптографический алгоритм DES, имеющий мощность ключевого пространства 2^{56} , но существенно уступает по криптографической стойкости алгоритму AES, имеющему мощность ключевого пространства 2^{128} .

Заключение

Итак, нами предложен метод, позволяющий получить количественную оценку конфиденциальности передачи скрытого бинарного сигнала в системе связи, основанной на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки. Оценка криптографических свойств рассмотренной хаотической системы передачи информации получена при условии, что известна структура передающей системы, принцип модуляции ее управляющих параметров и длительность передачи одного бита информации.

Полученная оценка криптографической стойкости системы связи, основанной на использова-

нии динамического хаоса, свидетельствует о недостаточной стойкости рассмотренной системы передачи информации согласно современным криптографическим стандартам. Криптографическая стойкость этой системы связи может быть увеличена, если увеличить число неизвестных параметров передатчика. Использование нелинейной функции более сложного вида также повысит мощность ключевого пространства.

Стойкость рассмотренной системы связи будет выше, если длительность передачи одного бита информации будет неизвестна для стороннего наблюдателя. В этом случае в дополнение к остальным параметрам необходимо также подбирать и длину бита, что увеличивает количество перебираемых вариантов. Кроме того, наличие шума в канале связи также может приводить к повышению конфиденциальности системы передачи информации, поскольку присутствие шума мешает восстановлению истинных параметров передатчика.

С другой стороны, использование априорных знаний и разумных предположений о параметрах передающей системы может существенно сократить количество перебираемых вариантов и уменьшить время восстановления параметров передатчика.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-00205.

Литература

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. *Динамический хаос: новые носители информации для систем связи*. М., Физматлит, 2002. 252 с.
2. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации. *Успехи физических наук*, 2009, т. 179, № 12, с. 1281–1310. doi:10.3367/UFNr.0179.200912c.1281
3. Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Система цифровой передачи информации, маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 4, с. 30–35.
4. Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д. Система связи, основанная на синхронизации систем с задержкой с переключением хаотических режимов. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 3, с. 85–91. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85
5. Ren H.-P., Bai C., Liu J., Baptista M. S., Grebogi C. Experimental validation of wireless communication with chaos. *Chaos*, 2016, vol. 26, 083117. doi:10.1063/1.4960787
6. Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П. Система передачи информации, основанная на обобщенной хаотической синхронизации. *Информационно-управляющие системы*, 2016. № 2. с. 42–47. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.42
7. Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д. Устойчивая к шумам система скрытой передачи информации на хаотическом генераторе с запаздыванием с переключаемым временем задержки. *Журнал технической физики*, 2016, т. 86, вып. 5, с. 1–8.
8. Yao J.-L., Li C., Ren H.-P., Grebogi C. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, 032226. doi:10.1103/PhysRevE.96.032226
9. Carroll T. L. Chaos for low probability of detection communications. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, vol. 103, pp. 238–245. doi:10.1016/j.chaos.2017.06.011
10. Oden J., Lavrov R., Chembo Y. K., Larger L. Multi-Gbit/s optical phase chaos communications using a

- time-delayed optoelectronic oscillator with a three-wave interferometer nonlinearity. *Chaos*, 2017, vol. 27, 114311. doi:10.1063/1.5007867
11. Дмитриев А. С., Герасимов М. Ю., Ицков В. В., Лазарев В. А., Попов М. Г., Рыжов А. И. Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов. *Радиотехника и электроника*, 2017, т. 62, № 4, с. 354–363.
 12. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра-Теран К. М. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов. *Радиотехника и электроника*, 2018, т. 63, № 10, с. 1074–1082.
 13. Smart N. *Cryptography: An Introduction*. McGraw-Hill, 2002. 417 p.
 14. Kocarev L., Lian S. *Chaos-Based Cryptography. Theory, Algorithms and Applications*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011. 397 p.
 15. Владимиров С. Н., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. *Нелинейно-динамическая криптология. Радиофизические и оптические системы*. М., Физматлит, 2009. 2018 с.
 16. Bauer F. *Decrypted Secrets. Methods and Maxims of Cryptology*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 555 p.
 17. Schneier B. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. New York, Wiley, 1996. 662 p.
 18. Tietze U., Schenk Ch. *Electronic Circuits. Handbook for Design and Application*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 1544 p.

UDC 537.86

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-54-61

Estimation of confidentiality of a communication system based on chaotic time-delay generator with switchable delay time

V. I. Ponomarenko^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-1579-6465E. V. Navrotskaya^b, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-1649-440XD. D. Kul'minskii^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Research Fellow, orcid.org/0000-0002-3936-2813M. D. Prokhorov^a, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor of RAS, orcid.org/0000-0003-4069-9410, mdprokhorov@yandex.ru^aSaratov Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, 38, Zelyonaya St., 410019, Saratov, Russian Federation^bSaratov State University named after N. G. Chernyshevsky, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation

Introduction: Communication systems based on the use of dynamical chaos have a number of positive features. Dynamical chaos has the properties of random processes, which allows systems based on it to ensure the information transmission confidentiality. However, a quantitative security assessment of such systems is a complicated problem, since the methods for evaluating cryptographic strength are well developed only for the classical encryption algorithms. **Purpose:** Development of a method for quantitative estimation of confidentiality of a binary signal hidden transmission in a communication system based on a chaotic time-delay oscillator with switchable delay time. **Results:** A method is proposed for estimating the confidentiality of a binary information signal transmission in a communication system using a chaotic time-delay oscillator with switchable delay time as a transmitter. The method is based on estimating the power of the key space for the chaotic communication system under study. We have considered the cases when some transmitter parameters are known, and the most general case when all the transmitter parameters are unknown. A communication system based on dynamical chaos may have a much higher confidentiality than the classical cryptographic algorithm using a cipher with a key length of 56 bits, but is significantly inferior in terms of cryptographic strength to a cipher with a key length of 128 bits. **Practical relevance:** The proposed method allows us to obtain a quantitative estimation of confidentiality of communication systems based on dynamical chaos, and compare it with the known strength of classical cryptographic algorithms.

Keywords — communication system, dynamical chaos, cryptography, time-delay systems.

For citation: Ponomarenko V. I., Navrotskaya E. V., Kul'minskii D. D., Prokhorov M. D. Estimation of confidentiality of a communication system based on chaotic time-delay generator with switchable delay time. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 54–61 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-54-61

References

1. Dmitriev A. S., Panas A. I. *Dinamicheskii khaos: novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi* [Dynamical Chaos: New Information Carriers for Communication Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 252 p. (In Russian).
2. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. On the use of chaotic synchronization for secure communication. *Physics — Uspekhi*, 2009, vol. 179, no. 12, pp. 1281–1310 (In Russian). doi:10.3367/UFNe.0179.200912c.1281
3. Karavaev A. S., Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. System of digital transmission of information masked by chaotic signal of time-delay system. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4, pp. 30–35 (In Russian).
4. Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Communication system based on synchronization of time-delay systems with switching of chaotic regimes. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 85–91 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.85
5. Ren H.-P., Bai C., Liu J., Baptista M. S., Grebogi C. Experimental validation of wireless communication with chaos. *Chaos*, 2016, vol. 26, 083117. doi:10.1063/1.4960787
6. Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Bezruchko B. P. Communication system based on generalized chaotic synchronization. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2,

- pp. 42–47 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.42
7. Kul'minskii D. D., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Noise-resistant system of concealed information transfer on a chaotic delayed feedback oscillator with switchable delay time. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 639–647. doi:10.1134/S1063784216050121
 8. Yao J.-L., Li C., Ren H.-P., Grebogi C. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, 032226. doi:10.1103/PhysRevE.96.032226
 9. Carroll T. L. Chaos for low probability of detection communications. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, vol. 103, pp. 238–245. doi:10.1016/j.chaos.2017.06.011
 10. Oden J., Lavrov R., Chembo Y. K., Larger L. Multi-Gbit/s optical phase chaos communications using a time-delayed optoelectronic oscillator with a three-wave interferometer nonlinearity. *Chaos*, 2017, vol. 27, 114311. doi:10.1063/1.5007867
 11. Dmitriev A. S., Gerasimov M. Y., Itskov V. V., Lazarev V. A., Popov M. G., Ryzhov A. I. Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 380–388. doi:10.1134/S1064226917040052
 12. Dmitriev A. S., Mokhsenit T. I., Sierra-Terant C. M. Differentially coherent communication scheme based on chaotic radio pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 10, pp. 1183–1190. doi:10.1134/S1064226918100078
 13. Smart N. *Cryptography: An Introduction*. McGraw-Hill, 2002, 417 p.
 14. Kocarev L., Lian S. *Chaos-Based Cryptography. Theory, Algorithms and Applications*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011. 397 p.
 15. Vladimirov S. N., Izmaylov I. V., Poyzner B. N. *Nelineynno-dinamicheskaya kriptologiya. Radiofizicheskiye i opticheskiye sistemy* [Nonlinear Dynamic Cryptology. Radiophysical and Optical Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 2018 p. (In Russian).
 16. Bauer F. *Decrypted Secrets. Methods and Maxims of Cryptology*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 555 p.
 17. Schneier B. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. New York, Wiley, 1996. 662 p.
 18. Tietze U., Schenk Ch. *Electronic Circuits. Handbook for Design and Application*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 1544 p.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

УДК 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты

С. В. Дворников^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-4889-0001

С. С. Дворников^а, канд. техн. наук, начальник отделения управления информационным ресурсом, orcid.org/0000-0001-7426-6475

А. В. Пшеничников^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-5063-3314, siracooz77@mail.ru

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

Введение: в условиях современной загрузки радиочастотного диапазона особую актуальность приобретают решения задач обеспечения показателей эффективности функционирования радиосистем в различных условиях сигнальной и помеховой обстановки. Одним из эффективных направлений исследований данной предметной области является управление радиочастотным ресурсом. **Цель исследования:** разработка системы обоснований по выбору частотного ресурса для работы радиотехнических систем в режиме с псевдослучайной перестройкой рабочих частот. **Результаты:** на базе разработанного аналитического аппарата определены условия для предварительного тестирования рабочих частот в режиме прямого ответа в радиоканалах с псевдослучайной перестройкой рабочих частот. Обоснованы практические условия достижения требуемых показателей эффективности временного выигрыша от параметров процесса предварительного тестирования рабочих частот. Доказано положение, улучшающее показатели своевременности передачи сообщений в радиолинии с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты от увеличения массива выделенных частот и скорости программной перестройки. Особенностью разработанных теоретических подходов является формализация показателей эффективности функционирования радиосистем на основе отношения времени без учета процессов предварительного тестирования ко времени, необходимому для реализации режима тестирования при фиксированном объеме информационного сообщения. Критерием выбора группы частот определен допустимый уровень ошибок в принимаемой тестовой последовательности, по результатам оценки которого формируется группа непригодных частот. На основе проведенного моделирования выявлены соотношения между количеством непригодных частот и обеспечиваемым выигрышем по своевременности передачи информации в зависимости от показателей процессов тестирования рабочих частот. **Практическая значимость:** разработанные решения в своей совокупности обеспечивают повышение показателей своевременности передачи сообщений в радиотехнических системах в режиме программной перестройки рабочих частот.

Ключевые слова — анализ частотного ресурса, предварительное тестирование рабочих частот, многоканальные радиотехнические системы, режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

Для цитирования: Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 62–68. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

For citation: Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Analysis of frequency resource for FHSS mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 62–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Введение

В настоящее время режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (Frequency-Hopping Spread Spectrum — FHSS) находит широкое применение в радиотехнических системах (РТС) различного назначения. Теоретические подходы к формализации свойств FHSS активно разрабатываются и отражены в достаточно большом количестве научной литературы, в частности, в [1–5], а также в практических исследованиях алгоритмов технической реализации РТС [6–9].

Вместе с тем одним из сдерживающих факторов дальнейшего продвижения в инфотелекоммуникационном пространстве РТС с программной (псевдослучайной) перестройкой рабочих

частот (ППРЧ) является их низкая эффективность в условиях наличия пораженных каналов в выделенном для работы частотном ресурсе.

В интересах решения данной проблемы используются различные способы активного зондирования частотных каналов [1, 10–12]. Однако такой подход ведет к увеличению времени передачи, что не всегда допустимо ввиду различных практических особенностей реализации РТС.

В настоящей статье представлены результаты, обосновывающие условия, при которых использование режима предварительного тестирования дает выигрыш в оперативности передачи информации. Авторами разработан соответствующий научно-методический аппарат, позволяющий получить количественную оценку временного выигрыша.

Анализ условий зондирования частотных каналов

В общем случае режим зондирования предполагает выполнение следующих технологических процедур.

Формируется тестовое сообщение S_T длительностью Δt , которое последовательно передается на каждой из N рабочих частот из группы $\{F\}_N$, выделенных для очередного сеанса связи.

На приемном конце линии радиосвязи сообщение S_T последовательно принимают на каждой частоте из заданной группы $\{F\}_N$, демодулируют и из демодулированной комбинации символов формируют ответное сообщение \hat{S}_T , которое также последовательно передают в обратном направлении на каждой из N рабочих частот (рис. 1), здесь n и i — текущие значения нумерации частот в группе $\{F\}_N$.

Окончательно формируют группу рабочих частот $\{\hat{F}\}_M = \{f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m, \dots, f_M\}$, включающую только те M -частоты, на которых демодулированные ответные сообщения \hat{S}_T соответствовали первоначальным S_T .

Критерием выбора окончательной группы из M -частот может выступать допустимый уровень ошибок в принятой тестовой последовательности \hat{S}_T , по результатам оценки которого формируют группу непригодных частот $\{\hat{F}\}_L$. Таким образом, повышают вероятность того, что оставшиеся частоты $\{F\}_N - \{\hat{F}\}_L = \{\hat{F}\}_M$ будут соответствовать требованиям для связи и информационные пакеты $S_{ин}$ будут передаваться на рабочих частотах из группы $\{F\}_M$ без ошибок.

В режиме без предварительного тестирования каналов информационные пакеты $S_{ин}$ передают непосредственно на частотах предварительно выбранной группы $\{F\}_M$. Затем передается запрос на передающую сторону о повторной передаче пакетов, принятых с ошибками.

В дальнейшем для оценки эффективности разработанного подхода будем полагать, что скорость передачи информации в РТС постоянна и не зависит от режима ее работы.

Анализ условий обеспечения выигрыша от режима предварительного тестирования выделенных для работы частот

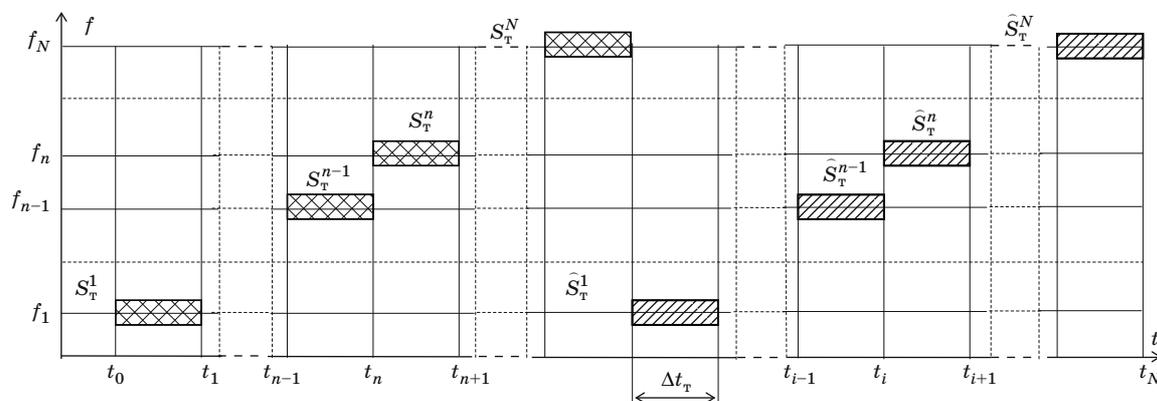
Исходя из реализации процедур предварительного тестирования можно предположить, что выигрыш в быстродействии по сравнению с режимом непосредственного использования выделенных частотных каналов обеспечивается не во всех случаях.

Для исследования данного аспекта и получения численных значений введем показатель эффективности $\gamma_{эф}$ как отношение времени без процедур предварительного тестирования $T_{бт}$, затрачиваемого на передачу K информационных пакетов длительностью $\Delta t_{ин}$ каждый (с учетом постоянства скорости передачи), ко времени $T_{ст}$, необходимому для реализации режима тестирования, аналогичный предложенному в работе [11]:

$$\gamma_{в} = T_{бт} / T_{ст}. \quad (1)$$

В целях получения аналитической зависимости показателя эффективности (1) формализуем значения $T_{бт}$ и $T_{ст}$ с позиций особенностей реализации указанных режимов. Для этого рассмотрим порядок использования выделенной группы частот $\{F\}_N$ при условии наличия в ней пораженных частот, т. е. частотных каналов, не отвечающих требованиям.

В общем случае формирование частотной группы $\{F\}_M$ происходит по результатам тестирования первоначального массива $\{F\}_N$ путем передачи на каждой из N частот тестовой последова-



■ **Рис. 1.** Частотно-временное представление реализации режима тестирования частот

■ **Fig. 1.** Frequency-time representation of the implementation of the test mode frequencies

тельности S_T длительностью Δt_T . Следовательно, затраченное время с учетом обратной передачи тестовой последовательности \hat{S}_T составит $T_T = 2N\Delta t$ при условии $S_T = \hat{S}_T$.

После формирования частотной группы $\{\hat{F}\}_M$ полезная информация, состоящая из K информационных пакетов длительностью $\Delta t_{и}$ каждый, будет передана за временной интервал $T_{и} = K\Delta t_{и}$.

В результате значение $T_{ст}$ составит

$$T_{ст} = K\Delta t_{и} + 2N\Delta t_T. \quad (2)$$

Очевидно, что с позиций борьбы за повышение быстродействия передача тестовой последовательности S_T является избыточной операцией.

Теперь рассмотрим особенности реализации режима ППРЧ без предварительного тестирования частот.

Так, значение

$$T_{6T} = K\Delta t_{и} \quad (3)$$

будет обеспечено только при условии

$$\{\hat{F}\}_M = \{F\}_N, \quad (4)$$

которое, как правило, на практике не достижимо. Поэтому при наличии ошибок в канале используют режим повторной передачи сообщений, принятых с ошибкой, аналогично используемому в системах АЛОНА [13, 14].

В этом случае процесс передачи полезной информации можно представить совокупностью следующих этапов. На первом этапе непосредственно передают само информационное сообщение. На втором этапе с приемного конца на передающий конец линии радиосвязи пересылаются данные о группе $\{F\}_L$, состоящей из L -частот, на которых информационные пакеты были приняты с ошибками. Если при этом допустить, что данные о каждой непригодной частоте из массива $\{F\}_L$ передают посредством сообщения, длительность которого совпадает с тестовым, то общее время, необходимое для передачи сведений о непригодных частотах, составит $\Delta t_T L$. На третьем этапе по оставшимся $\{F\}_M$ пригодным частотам передают информационные пакеты, принятые с ошибками в ходе первого этапа.

Заметим, что каждая из L -частот может неоднократно назначаться в режиме ППРЧ для передачи информации. В частности, при равномерном выборе каждой из N частот первичного массива $\{F\}_N$ при исходном объеме информационных пакетов, равном K , таких назначений будет K/N .

В результате общее время передачи информационных пакетов при их повторной передаче составит

$$T_{6T} = K\Delta t_{и} + \Delta t_T L + \Delta t_{и} \frac{K}{N} L. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что время T_{6T} будет возрастать с увеличением значения массива L . В частности, на рис. 2 показаны графики зависимости потребного времени $T_{6T}(L)$ как функции L при следующих постоянных значениях $K = 100\,000$, $N = 100$, $\Delta t_T = 0,001$ с и переменной $\Delta t_{и}$.

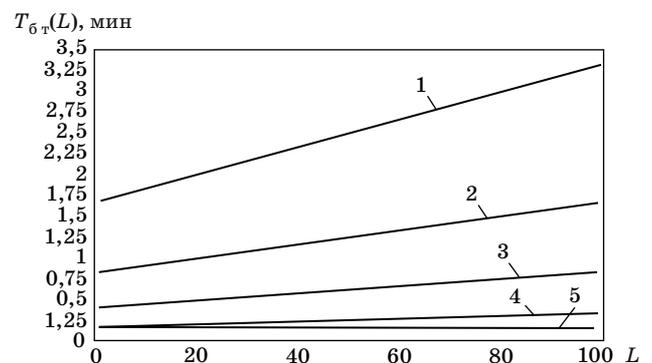
Анализ представленных результатов показывает, что увеличение массива $\{F\}_L$ (т. е. при $L \rightarrow N$) приводит к почти двухкратному возрастанию времени T_{6T} независимо от начального значения $\Delta t_{и}$. При этом наибольшее абсолютное возрастание T_{6T} происходит только в случае, когда $\Delta t_T \approx \Delta t_{и}$ (на рис. 2 линия 1). Результирующее значение T_{6T} достаточно слабо зависит от изменения параметра Δt_T . Так, даже десятикратное увеличение (уменьшение) Δt_T не приводит к видимым изменениям функции $T_{6T}(\Delta t_T)$.

Таким образом, при фиксированных значениях $\{F\}_L$ и N в качестве основных мер повышения оперативности передачи информации в режиме с ППРЧ следует рассматривать увеличение исходного массива выделенных частот $\{F\}_N$, повышение скорости ППРЧ.

В интересах дальнейшего исследования преобразуем выражение (5) к следующему виду:

$$T_{6T} = \Delta t_{и} K + \Delta t_T L + \Delta t_{и} L \frac{K}{N} = \Delta t_{и} K \left[1 + \frac{\Delta t_T L}{\Delta t_{и} K} + \frac{L}{N} \right]. \quad (6)$$

Представление (6) позволяет оценить факторы, влияющие на снижение оперативности из-за наличия непригодных частот в первоначально выделенной группе $\{F\}_N$ как некоторого коэффи-



■ **Рис. 2.** Зависимость потребного времени от числа непригодных частот: 1 — $\Delta t_{и1} = 0,001$; 2 — $\Delta t_{и2} = 0,0005$; 3 — $\Delta t_{и3} = 0,00025$; 4 — $\Delta t_{и4} = 0,0001$; 5 — $T = K\Delta t_{и4}$

■ **Fig. 2.** The dependence of the time required from the number of unsuitable frequencies: 1 — $\Delta t_{и1} = 0,001$; 2 — $\Delta t_{и2} = 0,0005$; 3 — $\Delta t_{и3} = 0,00025$; 4 — $\Delta t_{и4} = 0,0001$; 5 — $T = K\Delta t_{и4}$

циента $\beta = \left[1 + \frac{\Delta t_{\text{T}} L}{\Delta t_{\text{и}} K} + \frac{L}{N} \right]$, определяющего возрастание времени, обусловленное наличием непригодных каналов.

Анализ условий, при которых обеспечивается выигрыш от предварительного тестирования выделенного частотного ресурса

Согласно формуле (2), режим предварительного тестирования однозначно приводит к увеличению времени, затрачиваемого на передачу полезной информации, на величину $\chi = 2N\Delta t_{\text{T}}$.

Для получения количественной оценки $T_{\text{с.т.}}(\chi)$ изначально сделаем предположение, что $K\Delta t_{\text{и}} > 2N\Delta t_{\text{T}}$, и введем понятие коэффициента реакции радиолинии как отношение

$$n = \frac{K\Delta t_{\text{и}}}{N\Delta t_{\text{T}}} \tag{7}$$

Кроме того, введем понятие безразмерного коэффициента пригодности используемых частот, характеризующего изначально выделенную группу $\{\tilde{F}\}_N$:

$$m = \frac{N-L}{N} \tag{8}$$

Согласно (7), $m = 1$, если $L = 0$, т. е. в выделенной группе $\{\tilde{F}\}_N$ все частоты непригодны, и наоборот, $m = 0$, если $L = 1$, т. е. в группе $\{\tilde{F}\}_N$ нет пригодных частот.

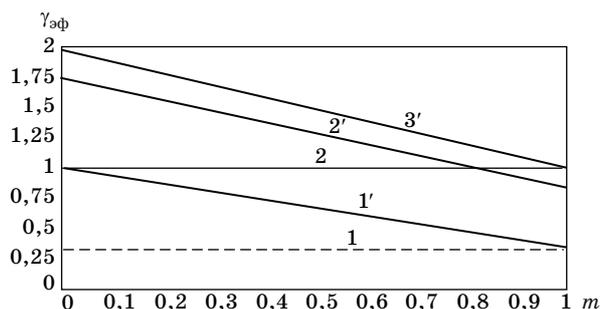
Тогда с учетом сделанных допущений получим

$$\gamma_{\text{эф}}(m, n) = \frac{T_{\text{б.т.}}}{T_{\text{с.т.}}} = \frac{K\Delta t_{\text{и}} + L\Delta t_{\text{T}} + L\Delta t_{\text{и}} \frac{K}{N}}{K\Delta t_{\text{и}} + 2N\Delta t_{\text{T}}} = \frac{K\Delta t_{\text{и}}(2-m) + (1-m)N\Delta t_{\text{T}}}{K\Delta t_{\text{и}} + 2N\Delta t_{\text{T}}} = \frac{(2-m)n + (1-m)}{n+2} \tag{9}$$

В соответствии с (9) представленный показатель эффективности $\gamma_{\text{эф}}(m, n)$ является функцией от двух безразмерных параметров m : коэффициента пригодности частот и n , который, согласно (7), можно интерпретировать как коэффициент оперативности выявления пригодных частот, так как показывает, во сколько раз меньше требуется времени для тестирования частот по отношению к интервалу времени, необходимому для передачи информационного сообщения.

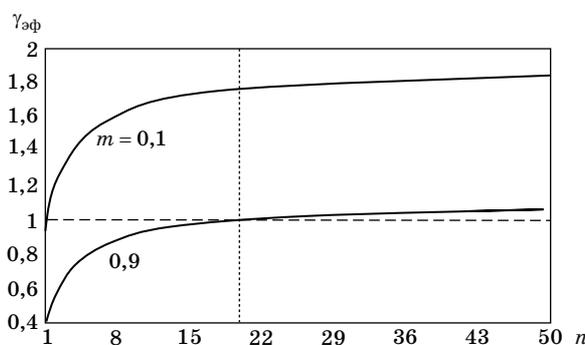
На рис. 3 показана зависимость $\gamma_{\text{эф}}(m)$ при $n = 1, n = 10$ и $n = 100$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. При $n = 1$, т. е.



■ **Рис. 3.** Зависимость показателя эффективности метода от коэффициента пригодности частот: 1 — $n = 1$, 1' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 2 — $n = 10$, 2' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 3' — $n = 100$, $\gamma_{\text{эф}}(m)$

■ **Fig. 3.** The dependence of the indicator of the effectiveness of the method frequency tolerance ratio: 1 — $n = 1$, 1' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 2 — $n = 10$, 2' — $\gamma_{\text{эф}}(1)$; 3' — $n = 100$, $\gamma_{\text{эф}}(m)$



■ **Рис. 4.** Зависимость показателя эффективности метода от коэффициента оперативности выявления пригодных частот

■ **Fig. 4.** Dependence of the method efficiency indicator from the coefficient of operability to identify suitable frequencies

$K\Delta t_{\text{и}} = 2N\Delta t_{\text{T}}$, режим с предварительным тестированием будет проигрывать обычному режиму. Причем максимальный проигрыш, равный $\gamma_{\text{эф}} = 0,33$, будет обеспечен при $M = 0$, т. е. при условии пригодности всех выделенных для работы частот.

В то же время при $n = 10$ максимальный выигрыш достигнет величины $\gamma_{\text{эф}} = 1,75$ и асимптотически будет стремиться к $\gamma_{\text{в}} = 2$ с ростом n . При этом выбор значения $n > 100$ нецелесообразен, поскольку существенного увеличения $\gamma_{\text{эф}}$ не происходит.

В подтверждение сделанного заключения на рис. 4 представлены графики зависимости величины $\gamma_{\text{в}}$ от коэффициента n при различных m , в соответствии с которыми при наличии 10 % непригодных частот выигрыш по своевременности передачи информации будет обеспечен уже при коэффициенте оперативности выявления пригодных частот, равном $n = 18$, т. е. при условии, что объем тестовых сообщений в 18 раз будет меньше объема информационного сообщения.

Заключение

Применение режима предварительного тестирования выделенного частотного ресурса обеспечивает временной выигрыш при условии, что время тестирования не превысит 10 % от времени, необходимого для передачи информационного сообщения. И это при условии, что не менее 18 % частот будут непригодными для передачи сообщений.

В то же время при временном интервале тестирования порядка 5,5 % указанный выигрыш будет обеспечен при 10 % непригодных частот, который будет асимптотически стремиться к $\gamma_B = 2$ с ростом числа непригодных частот.

Следует отметить, что дополнительные усилия по снижению длительности тестового сообщения до уровня не более 1 % от информационного не приведет к существенному выигрышу.

Таким образом, практическое применение режима предварительного тестирования становится целесообразным при условии, что в линиях радиосвязи будет не менее 10 % пораженных частот, а длительность тестового сообщения не превысит 4 % от информационного.

Представленные решения получены в области ограничений разработанного теоретического аппарата по анализу алгоритмов синхронизации в РТС, реализации сетевых решений и условий деструктивных воздействий [15–17]. Кроме того, разработанные подходы не учитывают повышение достоверности передачи сообщений на каждой из рабочих частот, используемых для организации режима ППРЧ, за счет улучшения энергетических характеристик сигналов [18, 19] и гибридного использования режимов на основе ППРЧ [20]. Данные направления выведены авторами в область дальнейших исследований.

Литература

1. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. *Помехозащищенность систем радиосвязи расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты*. М., РадиоСофт, 2008. 512 с.
2. Дворников С. В., Домбровский Я. А., Семисошенко М. А., Гулидов А. А., Иванов Р. В. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. *Информация и космос*, 2016, № 4, с. 11–14.
3. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. *Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты*. СПб., Своё издательство, 2013. 166 с.
4. Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/ECMSM.2017.7945892
5. Motlagh N. H. Frequency hopping spread spectrum: an effective way to improve wireless communication performance. *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011, pp. 188–202. doi:10.5772/15482
6. Пат. 2520401 РФ, МПК Н 01 Q 19/00, Н 04 В 1/00. Способ повышения скрытности радиоизлучающего средства в радиолинии с ППРЧ, В. А. Цимбал (РФ), С. Н. Шиманов (РФ), В. П. Пашинцев (РФ), С. О. Бурлаков (РФ), Д. А. Журавлёв (РФ), В. В. Митаки (РФ), Д. А. Потягов (РФ), Е. В. Грибанов (РФ), С. А. Коваль (РФ), И. А. Якимова (РФ). № 2012142151/08; заявл. 04.10.12; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18. 2 с.
7. Пат. 2506702 РФ, МПК Н 04 L 1/00, Н 04 L 7/00. Устройство синхронизации в системе радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, Е. В. Лебединский (РФ), Е. А. Каплин (РФ), А. А. Катанович (РФ), М. Б. Клионский (РФ), А. В. Яковлев (РФ), П. Д. Погарев (РФ). № 2011154279/08; заявл. 28.12.11; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. 2 с.
8. Maussang F., Ollivier B., Garello R. On the use of a FHSS modulated signal in multi-users underwater detection context. *Oceans 2017 — Aberdeen*, 2017, pp. 1–4. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084967
9. Бизюков П. Е., Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В. Исследование рангового алгоритма обнаружения сигнала с ППРЧ. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2017, № 5, с. 75–79.
10. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and applications*. Prentice Hall, 2001. 1079 p.
11. Дворников С. В., Устинов А. А., Гордейчук А. Ю. Адаптивный выбор частот в многоканальных системах передачи видео. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, 2018, № 4, с. 68–74.
12. Пат. 2447579 РФ, МПК Н 04 В 3/46. Способ активного контроля рабочих частот, В. В. Егоров (РФ), А. А. Катанович (РФ), С. А. Лобов (РФ), А. Н. Мингалев (РФ), А. Е. Тимофеев (РФ), В. П. Чемиренко (РФ). № 2010101884/08; заявл. 21.01.10; опубл. 10.04.12, Бюл. № 10. 2 с.
13. Сергиенко А. Б. *Цифровая связь*. СПб., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 164 с.
14. Chiani M. Coded slotted ALOHA: A graph-based method for uncoordinated multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, vol. 61, no. 12, pp. 6815–6832.
15. Борисов В. И., Лимарев А. Е., Лепендин А. В., Маркин В. Г., Шестопалов В. И., Чаркин Д. Ю. Вероятность ошибки на бит при множественном доступе в сетях с ППРЧ. *Теория и техника радиосвязи*, 2015, № 4, с. 36–46.
16. Евтеев А. А., Мальцев Г. Н. Помехоустойчивость радиотехнических систем в режиме поиска и обна-

ружения по задержке сигналов с расширением спектра. *Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского*, СПб., 2016, № 652, с. 65–71.

17. Каунов А. Е., Поддубный В. Н. Воздействие различных видов заградительных помех на линию радиосвязи с ППРЧ. *Радиотехника*, 2006, № 6, с. 58–63.

18. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А., Дворников А. С. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями.

Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения, 2014, № 2, с. 51–56.

19. Дворников С. В., Дворников С. С., Спиринов А. М. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций. *Информационные технологии*, 2013, № 12, с. 52–55.
20. Чаркин Д. Ю., Алехин С. Ю., Григорьев Е. В., Лимарев А. Е., Прохоров В. Е. Оценка помехоустойчивости гибридных ППРЧ-ППС систем радиосвязи. *Теория и техника радиосвязи*, 2018, № 4, с. 85–91.

UDC 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

Analysis of frequency resource for FHSS modeS. V. Dvornikov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-4889-0001S. S. Dvornikov^a, PhD, Tech., Head of Information Resource Management, orcid.org/0000-0001-7426-6475A. V. Pshenichnikov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-5063-3314, siracooz77@mail.ru^aS. M. Budenny Military Academy of Communication, 3, Tikhoretskii Pr., 190064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When the radio frequency spectrum is as busy as it is today, it is especially important to ensure effective functioning of radio systems under various signal and interfering conditions. One of the research fields is radio frequency resource management. **Purpose:** Developing a system of proposals for choosing a frequency resource for radio system operation in the mode of frequency-hopping spread spectrum (FHSS). **Results:** On the basis of the developed analytical apparatus, we have specified the conditions for preliminary testing of working frequencies in the direct response mode in FHSS radio channels. Practical conditions are substantiated for achieving the required performance indicators from the parameters of the preliminary frequency testing process. A statement is proved that determines how the improvement of timely message delivery in a radio link with a pseudo-random adjustment of the operating frequency depends on the growth of the array of allocated frequencies and on the speed of the program adjustment. A feature of the newly developed theoretical approaches is the formalization of radio system performance indicators based on the ratio of the time without taking into account the preliminary testing processes to the time required to implement the test mode with a fixed amount of an information message. The chosen criterion for selecting a frequency group is the permissible level of errors in the received test sequence whose evaluation determines the group of specified unsuitable frequencies. On the basis of the conducted simulation, we have revealed the relationships between the number of unsuitable frequencies and the gains provided by the timeliness of information transfer, depending on the performance indicators found during the testing of the working frequencies. **Practical relevance:** The developed solutions, in their entirety, provide a better timeliness of message delivery in radio systems in FHSS mode.

Keywords — frequency resource analysis, preliminary testing of working frequencies, multi-channel radio systems, frequency-hopping spread spectrum.

For citation: Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Pshenichnikov A. V. Analysis of frequency resource for FHSS mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 62–68 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-62-68

References

1. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. *Pomekhozashchishchennost' system radiosvyazi rasshireniyem spectra signalov metodom pseudosluchaynoy perestroyki rabochey chastoty* [Interference immunity of radio communication systems by extending the spectrum of signals using the pseudo-random tuning of the operating frequency]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008. 512 p. (In Russian).
2. Dvornikov S. V., Dombrovsky Ya. A., Semisoshenko M. A., Gulidov A. A., Ivanov R. V. Evaluation of radiocommunication lines interference with slow software switching of the running frequency. *Informatsiya i kosmos*, 2016, no. 4, pp. 11–14 (In Russian).
3. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' system svyazi s pseudosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty* [Interference immunity of communication systems with pseudo-random tuning of the operating frequency]. Saint-Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2013. 166 p. (In Russian).
4. Jakubik T., Jenicek J. Asymmetric low-power FHSS algorithm. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, 2017, pp. 1–6. doi:10.1109/ECMSM.2017.7945892
5. Motlagh N. H. Frequency hopping spread spectrum: An effective way to improve wireless communication performance. *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011, pp. 188–202. doi:10.5772/15482
6. Tsimbal V. A., Shimanov S. N., Pashintsev V. P., Burlakov S. O., Zhuravlev D. A., Mitaki V. V., Potjagov D. A., Gribanov E. V., Koval' S. A., Jakimova I. A., et al. *Sposob povysheniya skrytnosti radioizluchayushchego sredstva v radiolinii s PPRCH* [Method of increasing stealthiness of radio-frequency radiating means in pseudorandom operational frequency readjustment radio link]. Patent RF, no. 2520401, 2014.
7. Lebedinskij E. V., Kaplin E. A., Katanovich A. A., Klionskij M. B., Jakovlev A. V., Pogarev P. D., et al. *Ustroystvo sinkhronizatsii v sisteme radiosvyazi s pseudosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty* [Device for synchronisation in radio communication system with pseudorandom operational frequency readjustment]. Patent RF, no. 2506702, 2014.
8. Maussang F., Ollivier B., Garellero R. On the use of a FHSS modulated signal in multi-users underwater detection context. *Oceans 2017 — Aberdeen*, 2017, pp. 1–4. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084967
9. Bizyukov P. E., Litvinenko V. P., Litvinenko Yu. V. Investigation of the rank-algorithm of fhss detection. *Vestnik Voro-*

- nezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, no. 5, pp. 75–79 (In Russian).
10. Sklar B. *Digital communications. Fundamentals and applications*. Prentice Hall, 2001. 1079 p.
 11. Dvornikov S. V., Ustinov A. A., Gordeychuk A. Yu. Adaptive frequency selection in MULTI-channel video transmission systems. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2018, no. 4, pp. 68–74 (In Russian).
 12. Egorov V. V., Katanovich A. A., Lobov S. A., Mingalev A. N., Timofeev A. E., Chemirenko V. P., et al. *Sposob aktivnogo kontrolya rabochikh chastot* [Method of in-process control of operating frequencies]. Patent RF, no. 2447579, 2012.
 13. Sergienko A. B. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communication]. Saint-Petersburg, SPbGETU "LETI" Publ., 2012. 164 p. (In Russian).
 14. Chiani M. Coded slotted ALOHA: A graph-based method for uncoordinated multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, vol. 61, no. 12, pp. 6815–6832.
 15. Borisov V. I., Limarev A. E., Lependin A. V., Markin V. G., Shestopalov V. I., Charkin D. Yu. Bit error rate probability in FHSS networks with multiple access. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2015, no. 4, pp. 36–46 (In Russian).
 16. Yevteyev A. A., Mal'tsev G. N. *Pomekhoustoychivost' radiotekhnicheskikh sistem v rezhime poiska i obnaruzheniya po zaderzhke signalov s rasshireniyem spektra*. In: *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy], Saint-Petersburg, 2016, no. 652, pp. 65–71 (In Russian).
 17. Kaunov A. E., Poddubny V. N. Influence of jams upon the line of radio communication with frequency hopping. *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 58–63 (In Russian).
 18. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Rusin A. A., Dvornikov A. S. Increased noise immunity signal 16-QAM constellation with transformed. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2014, no. 2, pp. 51–56 (In Russian).
 19. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Spirin A. M. Syntheses of manipulated signals on the base wavelet-functions. *Informatsionnyye tekhnologii*, 2013, no. 12, pp. 52–55 (In Russian).
 20. Charkin D. Yu., Alekhin S. Yu., Grigoriev E. V., Limarev A. E., Prokhorov V. E. Estimation of noise immunity of hybrid frequency hopping broadband radio communication systems. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2018, no. 4, pp. 85–91 (In Russian).

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

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 20%, таможенные и почтовые расходы.

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

«Пресса России»: № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

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

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

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

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

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

«Деловая пресса»

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

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

«Коммерсант-Курьер»

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

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

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

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

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

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

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

ИВИС: <http://www.ivis.ru>; Некс-Медиа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=news&id=11196>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2017 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-upravlyayuschie-sistemy>).

УДК 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-69-81

Эффективные стратегии обслуживания пользователей в многопользовательской системе MIMO

А. В. Горбунова^а, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель, orcid.org/0000-0001-7073-7022

Е. Г. Медведева^{а, б}, ассистент, orcid.org/0000-0001-9104-708X, medvedeva-eg@rudn.ru

Ю. В. Гайдамака^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-2655-4805

В. С. Шоргин^б, канд. техн. наук, старший научный сотрудник., orcid.org/0000-0002-1090-544X

К. Е. Самуйлов^{а, б}, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-6368-9680, samuylov-ke@rudn.ru

^аРоссийский университет дружбы народов, Миклухо-Маклая ул., 6, Москва, 117198, РФ

^бИнститут проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Вавилова ул., 44-2, Москва, 119333, РФ

Постановка проблемы: одно из основных преимуществ технологии многоантенных систем, функционирующих в многопользовательском режиме, заключается в возможности передачи информации нескольким пользователям одновременно благодаря формированию нескольких параллельных потоков данных, что позволяет значительно повысить пропускную способность системы. Тем не менее спектральная эффективность может быть дополнительно увеличена за счет применения различных динамических стратегий обслуживания пользователей, учитывающих текущее состояние системы. Для оценки эффективности таких стратегий необходимы адекватные математические модели. **Цель:** разработка математических моделей многопользовательской системы MIMO, позволяющих оценить один из важных показателей качества восприятия пользователем — среднее время получения услуги, в данном случае — среднее время загрузки запрошенного пользователем файла. **Результаты:** представлены математические модели системы MIMO в виде систем массового обслуживания в дискретном и непрерывном времени для трех известных стратегий обслуживания пользователей. Предложены в замкнутой форме формулы для оценки среднего времени загрузки файла пользователем, позволяющие сделать вывод о наилучшей стратегии обслуживания без обязательности проведения численного эксперимента и, кроме того, имеющие меньшую вычислительную сложность по сравнению с уже существующими оценками, полученными с помощью математических моделей в непрерывном времени. Еще одним преимуществом построенных моделей является очевидная перспектива проведения дальнейших исследований по изучению влияния различных функций распределений длины файла на среднее время загрузки файла пользователем. Сделанные выводы об эффективности каждой из стратегий согласуются с более ранними работами, что подтверждается численным примером. **Практическая значимость:** разработанные модели многопользовательской системы MIMO могут быть использованы при выборе параметров функционирования реальной многопользовательской беспроводной системы MIMO.

Ключевые слова — многоантенные системы, многопользовательская беспроводная система MIMO, математическая модель системы MIMO, пропускная способность системы MIMO, время загрузки файла.

Для цитирования: Горбунова А. В., Медведева Е. Г., Гайдамака Ю. В., Шоргин В. С., Самуйлов К. Е. Эффективные стратегии обслуживания пользователей в многопользовательской системе MIMO. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 69–81. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-69-81

For citation: Gorbunova A. V., Medvedeva E. G., Gaidamaka Yu. V., Shorgin V. S., Samouylov K. E. Effective user service strategies in a multi-user MIMO system. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 69–81 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-69-81

Введение

В настоящее время остается актуальной задача увеличения пропускной способности современных систем сотовой связи, поскольку число пользователей постоянно растет и увеличиваются объемы передаваемой информации. В отличие от экстенсивного подхода увеличения числа базовых станций (БС), что не всегда выгодно с экономической и, возможно, технической точек зрения, одним из эффективных подходов является применение технологии многоантенной передачи (Multiple Input Multiple Output — MIMO) [1]. Основное отличие данной технологии от классической заключается в использовании нескольких антенн как на передающей, так и на приемной стороне [2]. Более подробное описание особенностей функциониро-

вания этой системы будет приведено ниже. Тем не менее, несмотря на повышение скорости передачи данных, обеспечиваемой применением самой технологии MIMO, можно добиться лучшей пропускной способности пользователей в таких системах за счет использования эффективных стратегий обслуживания [3–6]. В частности, в статье [6] было предложено несколько вариантов стратегий планировщика распределения радиоресурсов как в однопользовательском, так и в многопользовательском режимах. Авторами была построена математическая модель системы MIMO в виде системы массового обслуживания (СМО) в непрерывном времени в условиях каждой из предлагаемых стратегий, сделаны выводы и даны рекомендации относительно результативности той или иной стратегии на основе численных экспериментов.

В настоящей работе исследуется система ММО в условиях тех же стратегий, однако предложены математические модели в виде СМО в дискретном времени, что по своей сути ближе к цифровым системам, кроме того, в замкнутой форме получены формулы для оценки среднего времени загрузки файла пользователем, которые позволяют сделать выводы об эффективности каждой из стратегий, не прибегая к численным экспериментам.

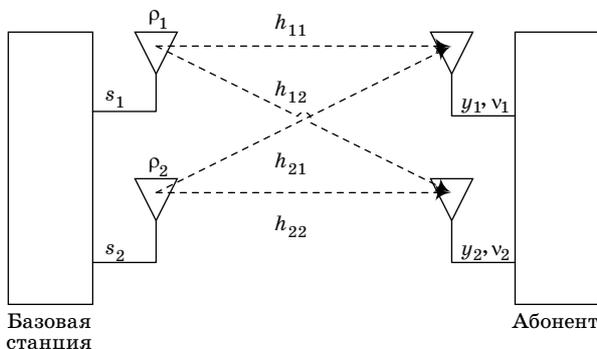
Параметры и показатели эффективности системы ММО

Рассмотрим многопользовательскую систему ММО, в которой несколько абонентских станций пользователей с M_R приемными антеннами каждая одновременно работают в определенной полосе частот с одной БС с M_T передающими антеннами. Пользователи системы ММО, находящиеся в зоне покрытия БС, подключаются к ней для того, чтобы получить файл конечного объема, после чего отключаются от системы.

Рассматривается модель с передачей данных по нисходящему каналу (downlink), т. е. от БС к пользователю (рис. 1), при этом важной характеристикой радиоканала является мощность сигнала на приемной стороне, которая зависит от местоположения пользователя. Мощность сигнала, принятого i -м пользователем, определяется следующим выражением:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{s} + \mathbf{v}_i,$$

где \mathbf{y}_i — вектор сигналов, принятых i -м пользователем, размерности $M_R \times 1$; \mathbf{s} — передаваемый вектор комплексных информационных символов размерности $M_T \times 1$; \mathbf{H}_i — прямоугольная комплексная матрица каналов связи для i -го пользователя размерности $M_R \times M_T$; \mathbf{v}_i — комплексный



■ **Рис. 1.** Схема передачи сигнала в системе ММО, $M_T = M_R = 2$, с одним пользователем

■ **Fig. 1.** MIMO system for single-user transmission, $M_T = M_R = 2$

случайный гауссов вектор размерности $M_R \times 1$ независимых одинаково распределенных шумов одинаковой мощности N , дБм, на каждой ветви разнесения. При этом каждая компонента вектора \mathbf{v}_i имеет комплексное нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , равной $N_0/2$, т. е. матрица ковариации шумов равна $(N_0/2)\mathbf{I}_{M_R}$, где \mathbf{I}_{M_R} — единичная матрица размерности $M_R \times M_R$, а N_0 — спектральная плотность мощности шума. Также предполагается, что мощность сигнала, передаваемого БС, ограничена величиной P_T [дБм].

Метрикой качества передачи данных в радиоканале является отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума, или среднее отношение сигнал/шум (Signal to Noise Ratio — SNR), т. е. $SNR = P_T/N$. Обычно отношение сигнал/шум измеряется в децибелах [дБ], поэтому для получения данной характеристики используется формула

$$SNR_{[дБ]} = P_{T[дБм]} - N_{[дБм]}.$$

Одним из основных показателей эффективности систем связи, в том числе системы с технологией ММО, является пропускная способность системы, т. е. максимально возможная (или достижимая) скорость безошибочной передачи данных (achievable rate) [2]. Прежде чем переходить непосредственно к анализу системы, приведем некоторые формулы, известные из теории информации, которые будут использоваться в дальнейшем. В предположении о том, что матрица \mathbf{H} каналов связи (далее — канальная матрица) известна на приемной стороне, в случае однопользовательской системы ММО пропускная способность, оптимизирующая распределение мощности каналов связи, вычисляется с помощью формулы [2, 7, 8]

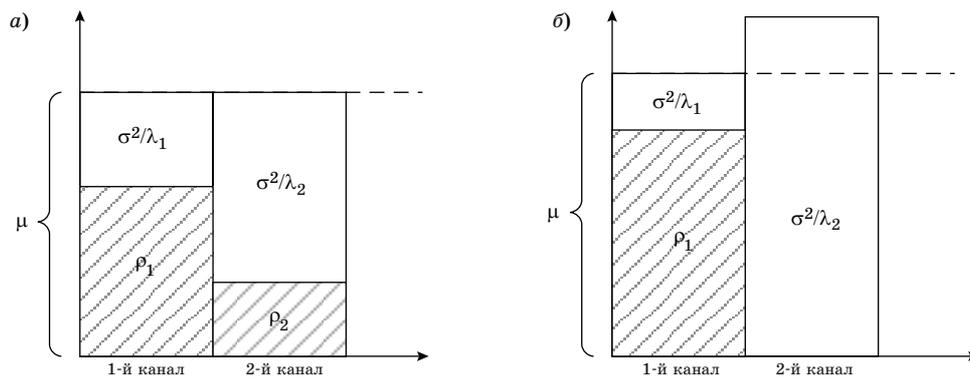
$$C(\mathbf{H}) = \sum_{k=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k}{\sigma^2} \lambda_k \right), \quad (1)$$

где $m = \min(M_T, M_R)$; λ_k — собственные числа матрицы \mathbf{H} ; ρ_k — мощность передачи в k -м пространственном радиоканале:

$$\rho_k = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{\lambda_k} \right)^+.$$

Здесь $(x)^+ = \max(0, x)$; μ — так называемый «уровень заполнения водой» (water filling level), т. е. константа, которая выбирается исходя из условия нормировки (рис. 2):

$$\sum_{k=1}^m \rho_k = P_T.$$



■ **Рис. 2.** Пример применения «водоналивного алгоритма» для системы MIMO 2×2 : а — $\rho_1 + \rho_2 = P_T$; б — $\rho_1 = P_T$, $\rho_2 = 0$

■ **Fig. 2.** Example of water filling principle for MIMO system configuration 2×2

Идея «алгоритма заполнения водой», или «водоналивного алгоритма» (water filling principle) [7], заключается в неравномерном распределении мощности между передающими антеннами для того, чтобы максимизировать пропускную способность системы MIMO (рис. 2, а). При этом пропускная способность отдельных пространственных радиоканалов ρ_k , $k = 1, m$, может быть уменьшена до нуля (рис. 2, б) в зависимости от характеристик спектральной эффективности каждого подканала.

В случае многопользовательского режима передачи сигнал можно передавать нескольким пользователям одновременно. При этом, в отличие от однопользовательского режима, на скорость получения данных пользователем на приемной стороне оказывает влияние интерференция, т. е. деструктивное взаимное влияние радиосигналов, передаваемых на той же или близких частотах. Поэтому скорость получения данных на приемной стороне существенно зависит от набора пользователей, которым в многопользовательском режиме одновременно передаются данные. Таким образом, суммарная пропускная способность получается путем нахождения набора матриц ковариации передачи, которые ее максимизируют:

$$C_{SumRate}(\mathbf{H}_k) = \max_{\Sigma_k > 0, \sum_k T_r(\Sigma_k) \leq P_T} \times \sum_{k=1}^m \log_2 \left| \mathbf{I} + \sum_k \mathbf{H}_k \Sigma_k \mathbf{H}_k' \right|, k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Выражение $\Sigma_k > 0$ означает, что матрицы ковариации передачи положительно определены. Аргументы, которые максимизируют $C_{SumRate}$, определяют оптимальное подмножество пользователей и соответствующие матрицы ковариации передачи Σ_k [6].

Важным показателем качества восприятия пользователя (QoE) является среднее время получения услуги, в случае рассмотренной многопользовательской системы MIMO — среднее время загрузки запрошенного пользователем файла конечного объема. Для описанной технической системы время T загрузки файла соответствует интервалу от момента подключения пользователя к системе до момента отправки запроса на получение файла на БС до момента поступления последнего бита запрошенного файла в оборудование пользователя и отключения пользователя от системы. В статье этот показатель исследуется для трех стратегий обслуживания пользователей в системе MIMO: в однопользовательском (стратегии 1 и 2) и в многопользовательском (стратегия 3) режимах передачи данных, — предложенных в работе [6]. Работа планировщика распределения радиоресурсов на БС при применении каждой стратегии описана в следующих разделах. Построены математические модели в дискретном и непрерывном времени для сравнения эффективности исследованных стратегий.

Моделирование системы MIMO в дискретном времени

Для моделирования функционирования системы MIMO в дискретном времени разделим временную ось на интервалы (такты) постоянной длины Δt и сделаем следующие предположения.

1. Все запросы пользователей на загрузку файла, отправленные в течение текущего такта, поступают на БС одновременно в начале следующего такта.

2. Пользователи меняют свое местоположение в момент сразу после начала такта. В течение такта пользователи не перемещаются, так что для каждого пользователя скорость получения данных, зависящая от соответствующей его место-

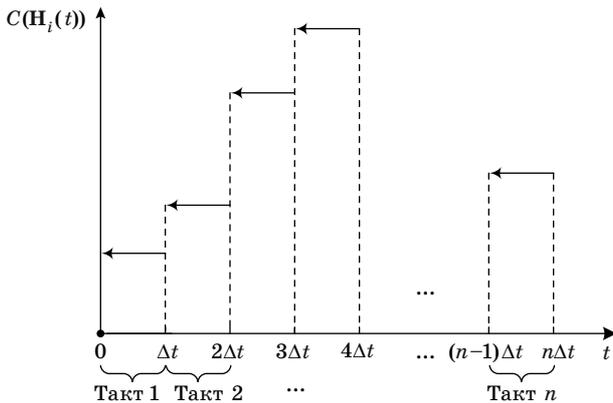
положению канальной матрицы \mathbf{H} , определяется в начале такта и не меняется до окончания такта.

3. Пользователи, завершившие загрузку файла в течение текущего такта, покидают систему одновременно в момент непосредственно перед началом следующего такта.

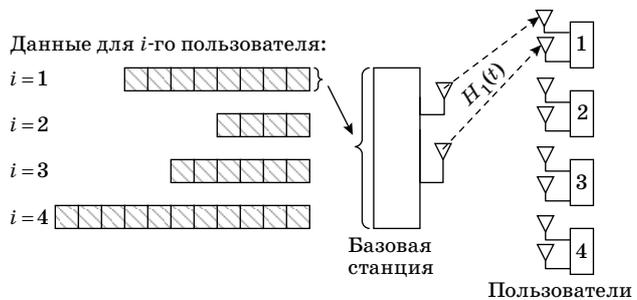
В этих предположениях определенные выше величины на каждом такте будут принимать различные, но неизменные в течение такта значения. При этом будем считать, что значения величин $y_i(t)$, $\mathbf{H}_i(t)$, $s(t)$, $v_i(t)$, $C(\mathbf{H}_i(t))$ для i -го пользователя и значение величины $C_{SumRate}(\mathbf{H}_k(t), k = 1, 2, \dots)$ для подмножества пользователей в момент $t \in ((n-1)\Delta t, n\Delta t]$ на такте с номером n — это значения, принимаемые непосредственно после начала i -го такта, например (рис. 3):

$$C(\mathbf{H}_i(t)) = C(\mathbf{H}_i((n-1)\Delta t + 0)), \\ t \in ((n-1)\Delta t, n\Delta t], n = 1, 2, \dots$$

На рис. 4 представлена схема модели многопользовательской системы MIMO с $M_T = 2$ передающими антеннами, обслуживающей четырех



■ **Рис. 3.** Пропускная способность канала i -го пользователя в системе MIMO в дискретном времени
 ■ **Fig. 3.** The capacity of the i -user in the MIMO system with a discrete time



■ **Рис. 4.** Модель многопользовательской системы MIMO 2×2 , обслуживающей четырех пользователей
 ■ **Fig. 4.** The model of multi-user 2×2 MIMO system serving four users

пользователей, каждый из которых имеет $M_R = 2$ приемные антенны. Здесь же схематически изображены файлы случайной длины, находящиеся в очереди на передачу на БС.

Предположим, что при наличии подключенных к системе MIMO пользователей БС непрерывно осуществляет передачу данных, что соответствует обслуживанию пользователей в соответствии с некоторой стратегией, в зависимости от которой передаваемый БС вектор комплексных информационных символов $s(t)$ будет предназначаться одному или нескольким пользователям одновременно. В статье рассмотрены три стратегии [6], согласно которым на n -м такте, $n \geq 1$, на обслуживание выбирается пользователь, который провел в системе больше всего времени (стратегия 1 обслуживания в порядке поступления пользователей в систему); пользователь, радиоканал которого обеспечивает максимальную пропускную способность на приемной стороне (стратегия 2 обслуживания пользователя с наилучшей пропускной способностью канала); подмножество пользователей с максимальной суммарной пропускной способностью (стратегия 3 обслуживания подмножества пользователей с наилучшей суммарной пропускной способностью).

Обслуживание пользователей системы MIMO можно описать случайным процессом в дискретном времени $X_n = (\xi_n, \mathbf{F}_n, \mathbf{A}_n)$, где случайная величина ξ_n — число заявок в системе; $\mathbf{F}_n = (F_{1n}, F_{2n}, \dots, F_{\xi_n n})$ — вектор остаточных длин заявок, находящихся в системе; $\mathbf{A}_n = (A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{\xi_n n})$ — вектор времен пребывания заявок, находящихся в системе, на n -м такте, $n \geq 1$. Заявка соответствует пользователю системы MIMO, а под остаточной длиной заявки подразумевается случайный объем данных, предназначенный конкретному пользователю, выраженный в каких-либо условных единицах, т. е. размер запрошенного пользователем файла (в момент поступления заявки) или оставшаяся для передачи часть файла (на последующих тактах).

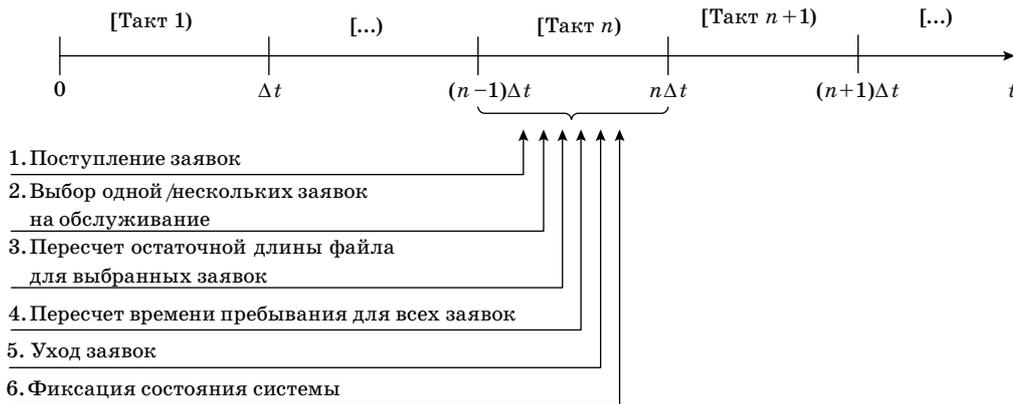
Будем считать, что согласно протоколу передачи данных в многопользовательской системе MIMO на интервале $[(n-1)\Delta t, n\Delta t]$, соответствующем n -му такту, $n \geq 1$, в системе последовательно совершаются действия, показанные на рис. 5.

В введенных обозначениях три рассмотренные стратегии обслуживания пользователей [6] принимают следующий вид. В описанной выше последовательности событий на n -м такте, $n \geq 1$, выбирается:

— согласно стратегии 1 — пользователь $i(n)$, который провел в системе больше всего времени:

$$i(n) = \arg \max_{1 \leq i \leq \xi_n} A_{in},$$

при этом пропускная способность системы $C(\mathbf{H})$ определяется по формуле (1):



■ **Рис. 5.** Временная диаграмма последовательности событий в СМО в дискретном времени
 ■ **Fig. 5.** Event sequence diagram of discrete time queuing system

$$C(\mathbf{H}_{i(n)}(n)) = \sum_{k=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\rho_k}{\sigma^2} \lambda_k \right);$$

— согласно стратегии 2 — пользователь $i(n)$, канал которого обладает максимальной пропускной способностью:

$$i(n) = \arg \max_{1 \leq i \leq \xi_n} C(\mathbf{H}_i(n)),$$

при этом $C(\mathbf{H})$ по-прежнему задается формулой (1);
 — согласно стратегии 3 — подмножество пользователей $N^\infty(n)$ с максимальной суммарной пропускной способностью:

$$N^\infty(n) = \arg \max_{P\{1,2,\dots,\xi_n\}} C_{SumRate}(\mathbf{H}_k(n), k=1, \dots, \xi_n),$$

при этом пропускная способность системы $C(\mathbf{H})$ определяется формулой (2):

$$C_{SumRate}(\mathbf{H}_k(n), k=1, \dots, \xi_n) = \max_{\sum_j(n) > 0, \sum_j(n) Tr(\sum_j(n)) \leq P_T} \log_2 \left| \mathbf{I} + \sum_j \mathbf{H}_j(n) \Sigma_j(n) \mathbf{H}_j'(n) \right|.$$

В обозначениях построенного случайного процесса последовательность событий на n -м такте принимает следующий вид.

1. Поступление в систему новой заявки/группы заявок в соответствии с геометрическим распределением с параметром a , где a — вероятность поступления заявки, $0 < a < 1$. При поступлении на n -м такте новой заявки число заявок/групп заявок в системе увеличивается на единицу: $\xi_n = \xi_{n-1} + 1$. Генерация случайной остаточной длины $F_{\xi_n n}$ для поступившей заявки/группы заявок. Время пребывания поступившей заявки/группы заявок в системе $A_{\xi_n n} = 1$. Генерация случайных элементов канальной матрицы $\mathbf{H}_{\xi_n}(n)$ для поступившей заявки/группы заявок.

2. Генерация случайных элементов канальной матрицы $\mathbf{H}_i(n)$ для каждой из уже обслуживавшихся заявок/групп заявок в системе, $1 \leq i \leq \xi_{n-1}$.

3. Расчет функции $C(\mathbf{H})$ для каждой заявки (стратегии 1 и 2) или для всех подмножеств заявок в системе (стратегия 3).

4. Выбор заявки $i(n)$ или подмножества заявок $N^\infty(n)$ на обслуживание в соответствии с одной из трех стратегий.

5. Пересчет остаточной длины $F_{i(n) n}$ для выбранной заявки

$$F_{i(n) n} = F_{i(n) n-1} - C(\mathbf{H}_{i(n)}(n))\Delta t$$

или остаточных длин $F_{k n}$ для каждой заявки из подмножества $N^\infty(n)$

$$F_{k n} = F_{k n-1} - C(\mathbf{H}_k(n))\Delta t, k \in N^\infty(n).$$

6. Пересчет времен пребывания всех заявок в системе — каждая компонента вектора \mathbf{A}_n увеличивается на единицу: $\mathbf{A}_n = \mathbf{A}_{n-1} + \mathbf{1}$.

7. Сбор статистики — скорость передачи данных на приемной стороне $C(\mathbf{H})$; время загрузки файла пользователем $T = A_{i n}$, если $\max(0, F_{i n}) = 0$.

8. Окончание обслуживания и уход из системы заявок, для которых $\max(0, F_{i n}) = 0$.

9. Фиксация состояния системы.

Построенный случайный процесс в дискретном времени $X_n = (\xi_n, \mathbf{F}_n, \mathbf{A}_n)$ может быть исследован с помощью аппарата цепей Маркова, при этом могут быть получены стационарные характеристики процесса. Далее для трех исследованных стратегий обслуживания пользователей проведено моделирование системы ММО с помощью известных моделей СМО в дискретном времени с групповым поступлением и ординарным обслуживанием $Geo^{[X]}|Geo|1$, а также с помощью моделей СМО в непрерывном времени $M|G|1$, которое

позволило получить в замкнутой форме формулы для оценки среднего времени загрузки файла пользователем и провести сравнение исследуемых стратегий обслуживания пользователей системы ММО.

Стратегия 1 обслуживания в порядке поступления пользователей в систему

Модель 1: $Geo_{\lambda\Delta t}^{[X]}|Geo_{EC(N)\Delta t}|1|_{\infty.e}$ Предположим, что на каждом такте с вероятностью $a = \lambda\Delta t$, $0 < a < 1$, на БС системы ММО поступает запрос пользователя, которому необходимо передать файл случайного объема. При этом в каждом файле содержится i ($i \geq 1$) бит (или целое положительное число других условных единиц количества информации) с вероятностью c_i . Считаем, что файл передается БС побитово в соответствии с геометрическим распределением времени обслуживания с параметром $b = \mu\Delta t$, $0 < b \leq 1$. Величины $\lambda > 0$ и $\mu > 0$ введены для того, чтобы в дальнейшем перейти к рассмотрению аналогичной системы в непрерывном случае, в которой эти параметры будут иметь смысл интенсивностей поступления и обслуживания соответственно.

Таким образом, систему ММО можем смоделировать СМО $Geo^{[X]}|Geo|1$, в которую поступает группа заявок (файл), а заявки обслуживаются прибором по одной (побитово). Функционирование СМО можно описать цепью Маркова, образованной числом заявок в системе непосредственно после окончания тактов $\{N(t), t \geq 0\}$, причем, как известно [9], стационарные вероятности $p_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P(N(t) = i)$, $i > 0$, выражаются рекуррентно, а вероятность p_0 , как и некоторые вероятностно-временные характеристики системы, можно выразить с помощью производящих функций. Введем следующие обозначения для производящих функций распределения числа заявок в группе и стационарного распределения вероятностей p_i :

$$C(z) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i z^i,$$

$$P(z) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i z^i, \beta(z) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i z^i = \sum_{i=1}^{\infty} b(\bar{b})^{i-1} z^i = \frac{bz}{1-\bar{b}z},$$

где $\bar{b} = 1 - b$, а также среднего числа заявок в группе:

$$\hat{c} = \sum_{i=0}^{\infty} i c_i.$$

Тогда решение системы уравнений равновесия с помощью производящих функций примет вид [8]

$$P(z) = b(\bar{a} + aC(z)) \left(b\bar{a} - \frac{a(z - (\bar{b}z + b)C(z))}{1-z} \right)^{-1} p_0,$$

откуда, пользуясь тем, что $P(1) = 1$, получаем $p_0 = 1 - a\hat{c}/b$, $a\hat{c}/b = \rho$ — загрузка системы ($\rho < 1$ — необходимое и достаточное условие стационарности системы). Стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания первой заявки из группы или, что эквивалентно, времени ожидания начала обслуживания группы заявок имеет производящую функцию следующего вида [9]:

$$w(z) = \frac{1}{\beta(z)} (b(\beta(z) - 1)p_0 + (\bar{b}\beta(z) + b)P(\beta(z))).$$

Тогда среднее время ожидания начала обслуживания группы заявок

$$w = w'(1) = 1 - \rho + \frac{1}{b}(N + \bar{b} - 1),$$

где среднее число заявок в системе

$$N = P'(1) = \frac{a \hat{c}(1 - a\hat{c}) + C''(1)}{b \cdot 2(1 - \rho)},$$

а среднее время пребывания группы заявок в системе, соответствующее времени загрузки файла, определяется выражением $E[T] = w + \hat{c}\hat{b}$, т. е.

$$E[T] = 1 - \rho + \frac{1}{b}(N + \bar{b} - 1) + \hat{c}\hat{b}. \quad (3)$$

Заметим, что в данном случае

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{1}{E[C(\mathbf{H})]\Delta t}, \quad (4)$$

причем величина $C(\mathbf{H})$ должна быть выражена в соответствующих целых условных единицах, например, битах в секунду [бит/с].

Если допустить, что число заявок в группе имеет геометрическое распределение с параметром c , $\bar{c} = 1 - c$, то

$$\hat{c} = \frac{1}{c}, \quad C''(1) = \frac{2\bar{c}}{c^2}.$$

Отметим, что выбор СМО $Geo^{[X]}|Geo|1|_{\infty}$ в качестве модели ММО дает некоторое преимущество в части возможности анализа различных функций распределений длины группы заявок (размера файла) и влияния этих вариаций на такие важные характеристики функционирования системы, как среднее время пребывания заявки в системе и средняя длина очереди [11]. Анализ

чувствительности этих параметров к виду функции распределения длины сообщения может стать предметом дальнейших исследований.

Модель 2: $Geo_{\lambda\Delta t} | G_{E[C(H)\Delta t/E[F]]} | 1 | \infty$. Предположим, что поток поступающих в систему ММО запросов пользователей является геометрическим с вероятностью поступления запроса на такте n , равной $0 < a < 1$, и с дискретной функцией распределения $B(t)$ времени обслуживания запроса с средним значением \hat{b} .

Тогда систему ММО, функционирующую в дискретном времени с условием обслуживания пользователей в порядке поступления, можем смоделировать с помощью дискретной СМО $Geo|G|1|\infty$. В этом случае среднее время пребывания заявки в системе описывается выражением [9, 10]

$$E[T] = \hat{b} + \frac{ab^{(2)} - \rho}{2(1-\rho)}, \quad (5)$$

где $\rho = a\hat{b} < 1$ — загрузка системы; $b^{(2)}$ — второй момент времени обслуживания заявки. Поскольку время обслуживания каждого пользователя зависит от размера передаваемой информации и скорости ее передачи, указанные характеристики можем оценить следующим образом:

$$\hat{b} = \frac{E[F]}{E[C(H)\Delta t}; \quad b^{(2)} = \frac{E[F]^2}{E[C(H)]^2 \Delta t^2},$$

где F — случайная величина объема информации, передаваемой пользователю.

Кроме того, можем оценить среднее число пользователей, находящихся в системе, по моментам окончания обслуживания:

$$N = \rho + \frac{a^2(b^{(2)} - \bar{b})}{2(1-\rho)}.$$

Заметим, что фактически величины $E[F]$ и \hat{c} являются тождественными, так как характеризуют средний объем передаваемой информации. Однако в силу того, что в СМО $Geo^{[X]}|Geo|1|\infty$ ($M^{[X]}|M|1|\infty$ — в непрерывном случае) величина \hat{c} определяет среднее число заявок в поступающей группе, в соответствующих моделях на случайную величину размера файла накладывается очевидное требование дискретности и целочисленности ее значений. Данное ограничение объясняет выбор «бита» в качестве единицы измерения объема передаваемой информации в описанных моделях, но при этом не исключает возможности выбора других единиц информации с соблюдением указанных требований. Что касается величины F , то на нее подобные ограничения не распространяются, поэтому она может быть и непрерывной.

Стратегия 2 обслуживания пользователя с наилучшей пропускной способностью канала

В случае выбора на обслуживание на каждом такте пользователя с максимальной пропускной способностью логично предположить, что системе ММО возможно смоделировать с помощью СМО $Geo^{[X]}|Geo|1|\infty$ с случайным выбором заявки из очереди (Random Order of Service — ROS [12], или Service in Random Order — SIRO [13]), т. е. заявка, находящаяся в очереди, может быть выбрана для обслуживания на приборе с вероятностью $1/i$, зависящей только от числа заявок в очереди.

Рассмотрим модели, в которых обслуживание не может прерываться на каждом такте, т. е. выбранная заявка находится на приборе до тех пор, пока ее обслуживание не будет завершено. Заметим, что допущение об отсутствии прерывания обслуживания должно давать хорошее приближение в случае, если среднее время обслуживания заявки (одного бита или одной условной единицы количества информации) будет равно длительности такта.

Модель 1: $Geo_{\lambda\Delta t}^{[X]} | Geo_{E[\max C(H)\Delta t]} | 1 | \infty$ с случайным выбором заявки из очереди. Стационарное распределение числа заявок в системе в случае дисциплины случайного выбора из очереди не отличается от стационарного распределения в случае стандартной дисциплины обслуживания заявок — в порядке поступления, хотя стационарные распределения времен пребывания заявок в системе будут отличаться [9, 12, 13]. Тем не менее средние времена ожидания начала обслуживания и пребывания заявки так же, как и группы заявок, в системе будут принимать одинаковые значения в обоих случаях в силу формулы Литтла. Поэтому выражение для среднего времени пребывания заявки в системе сохранит вид (3) за исключением того, что среднее время обслуживания одной заявки в силу условия максимальной пропускной способности будет равно

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{1}{E[\max C(H)\Delta t]}. \quad (6)$$

Таким образом, в среднем скорость обслуживания группы заявок в случае выбора на обслуживание пользователя с максимальной пропускной способностью будет выше, а соответственно, и время пребывания заявки в системе будет лучше (меньше), чем в случае обслуживания пользователей в порядке их поступления.

Модель 2: $Geo_{\lambda\Delta t} | G_{E[\max C(H)\Delta t/E[F]]} | 1 | \infty$ с случайным выбором заявки из очереди. В случае СМО $Geo|G|1|\infty$ с случайным выбором заявки из очереди ситуация будет аналогична описанной для модели 1, т. е. стационарные вероятности числа заявок в системе будут совпадать с стационарными вероятностями в стандартной СМО $Geo|G|1|\infty$, так

же как и среднее время пребывания заявки в системе. Таким образом, для времени пребывания заявки в системе будет справедлива формула (4), где \hat{b} и $b^{(2)}$ можно оценить следующим образом:

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{E[F]}{E[\max C(\mathbf{H})]\Delta t}; \quad b^{(2)} = \frac{E[F]^2}{E[\max C(\mathbf{H})]^2 \Delta t^2}.$$

Стратегия 3 обслуживания подмножества пользователей с наилучшей суммарной пропускной способностью

Модель 1: $Geo_{\lambda \Delta t}^{[X]} | Geo_{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]\Delta t} | 1 | \infty$ с случайным выбором заявки из очереди. В качестве модели ММО с заявленной стратегией естественно выбрать СМО типа $Geo^{[X]} | Geo | m | \infty$ с случайным выбором на обслуживание, поскольку в данном случае подразумевается, что обслуживаться могут уже не один, а несколько пользователей одновременно. Тем не менее здесь возникает серьезный вопрос о подборе основных параметров упомянутой СМО, в частности — числа приборов и интенсивностей обслуживания на них. Так, для оценки числа приборов СМО можно выбрать среднее число пользователей, которые могут обслуживаться одновременно в системе ММО, причем их количество не должно превышать M_T , а в качестве интенсивности обслуживания на каждом из приборов — величину, равную отношению $E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]\Delta t$ к выбранному числу приборов, либо средние индивидуальные интенсивности обслуживания из работы [14]. Данная аппроксимация представляется допустимой в силу естественного предположения о том, что частота события $\{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})] \geq E[\max C(\mathbf{H})]\}$ будет гораздо выше частоты противоположного ему события. Однако к решению проблемы можно подойти существенно эффективнее и ограничиться выбором СМО с $m = 1$ прибором, среднее время обслуживания на котором

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{1}{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]\Delta t}. \quad (7)$$

Таким образом, за счет увеличения интенсивности обслуживания на одном приборе будет моделироваться ситуация параллельного обслуживания пользователей с гораздо меньшей интенсивностью на каждом из них. В результате оценка среднего времени пребывания заявки в системе будет иметь знакомый вид (3).

В силу того, что рассматриваемая стратегия подразумевает выполнение условия $E[C_{SumRate}(\mathbf{H})] \geq E[\max C(\mathbf{H})]$, очевидно, что стратегия выбора на обслуживание подмножества пользователей с наибольшей суммарной пропускной способностью будет наилучшей среди трех вышеупомянутых стратегий с точки зрения оценки среднего времени пребывания заявки в системе.

Модель 2: $Geo_{\lambda \Delta t} | G_{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]\Delta t / E[F]} | 1 | \infty$ с случайным выбором заявки из очереди. В случае СМО $Geo | G | 1 | \infty$ с случайным выбором заявки из очереди ситуация будет аналогична описанной выше, т. е. стационарные вероятности числа заявок в системе будут совпадать с стационарными вероятностями в стандартной СМО $Geo | G | 1 | \infty$, так же как и среднее время пребывания заявки в системе. Таким образом, для времени пребывания заявки в системе справедлива формула (4), где \hat{b} и $b^{(2)}$ вычисляются как

$$\hat{b} = \frac{1}{b} = \frac{E[F]}{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]\Delta t}; \quad b^{(2)} = \frac{E[F]^2}{E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]^2 \Delta t^2}.$$

Моделирование системы ММО в непрерывном времени

Предположим, что система ММО функционирует в непрерывном времени, тогда все определенные выше величины $y_i(t)$, $\mathbf{H}_i(t)$, $\mathbf{s}(t)$, $\mathbf{v}_i(t)$, $C(\mathbf{H}_i(t))$, $C_{SumRate}(\mathbf{H}_k(t), k = 1, 2, \dots)$ изменяют значения в произвольный момент t ($t \geq 0$).

Стратегия 1 обслуживания в порядке поступления пользователей в систему

Модель 3: $M_{\lambda}^{[X]} | M_{E[C(\mathbf{H})]} | 1 | \infty$. Рассмотрим непрерывный аналог СМО $Geo^{[X]} | Geo | 1 | \infty$ — $M^{[X]} | M | 1 | \infty$. Для этой системы среднее время пребывания заявки в системе, т. е. сумма времени ожидания начала обслуживания первой заявки из группы и времени обслуживания всей группы заявок, вычисляется по формуле

$$E[T] = \frac{\hat{c} + c^{(2)} \lambda}{2(1-\rho) \mu^2} + \frac{\hat{c}}{\mu}, \quad (8)$$

где λ — интенсивность входящего потока групп заявок; μ — интенсивность обслуживания одной заявки, которая характеризуется формулой

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{E[C(\mathbf{H})]};$$

$\rho = \hat{c}\lambda/\mu < 1$ — загрузка системы; \hat{c} — среднее число заявок в группе; $c^{(2)}$ — второй момент числа заявок в группе. В случае геометрического распределения числа заявок в группе величины \hat{c} и $c^{(2)}$ определяются следующим образом:

$$\hat{c} = \frac{1}{c}, \quad c^{(2)} = \frac{2-c}{c^2}.$$

Модель 4: $M_{\lambda} | G_{E[F]/E[C(\mathbf{H})]} | 1 | \infty$. Поведение системы ММО в случае обслуживания в порядке поступления пользователей можем смоделировать СМО $M | G | 1 | \infty$, в которой среднее время пребы-

вания заявки в системе описывается известной формулой

$$E[T] = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda m^{(2)}}{2(1-\rho)}, \quad (9)$$

где $\rho = \lambda\mu^{-1} < 1$ — загрузка системы, среднее время обслуживания μ^{-1} можно оценить следующим образом:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{E[F]}{E[C(H)]} = \frac{\int_0^{\infty} sf(s)ds}{E[C(H)]},$$

а второй момент случайной величины времени обслуживания

$$m^{(2)} = \frac{E[F]^2}{E[C(H)]^2} = \frac{\int_0^{\infty} s^2 f(s)ds}{E[C(H)]^2},$$

F — непрерывная случайная величина объема данных, передаваемых пользователю, с плотностью распределения $f(\cdot)$.

Стратегия 2 обслуживания пользователя с наилучшей пропускной способностью канала

Модель 3: $M_{\lambda}^{[X]}|M_{E[\max C(H)]}|1|_{\infty}$ с случайным выбором заявки из очереди. Для СМО $M^{[X]}|M|1|_{\infty}$ с случайным выбором заявки из очереди среднее время пребывания заявки в системе определяется формулой (8), где среднее время обслуживания одной заявки определяется выражением

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{E[\max C(H)]}.$$

Модель 4: $M_{\lambda}|G_{E[F]/E[\max C(H)]}|1|_{\infty}$ с случайным выбором заявки из очереди. Среднее время пребывания заявки в системе $M|G|1|_{\infty}$ с случайным выбором заявки из очереди будет принимать такое же значение, как и в условиях классической СМО $M|G|1|_{\infty}$ в силу формулы Литтла. Поэтому выражение для среднего времени пребывания заявки в системе сохранит вид (9) за исключением того, что в силу условия максимальной пропускной способности для μ^{-1} будет справедливо

$$\frac{1}{\mu} = \frac{E[F]}{E[\max C(H)]}, \quad (10)$$

а для второго момента времени обслуживания

$$m^{(2)} = \frac{E[F]^2}{E[\max C(H)]^2} = \frac{\int_0^{\infty} s^2 f(s)ds}{E[\max C(H)]^2},$$

т. е. в среднем скорость обслуживания будет выше, а соответственно, и время пребывания заявки в системе будет меньше.

Модель 5: $M_{\lambda}|G_{E[F]/E[\max C(H)]}|1|_{\infty}$ с разделением процессора. Непрерывным аналогом дискретной СМО с выбором на каждом такте пользователя с максимальной пропускной способностью может стать СМО $M|G|1$ — EPS, т. е. СМО с справедливым разделением процессора. Такой выбор может быть обусловлен тем, что предельным вариантом циклической дисциплины кругового доступа (round-robin) является дисциплина обслуживания, известная как справедливое разделение процессора [15–17]. Кроме того, заметим, что в определенных условиях можно говорить о равенстве времен пребывания пользователей в СМО с разделением процессора и с случайным выбором заявки из очереди [18, 19].

Таким образом, пользуясь известной формулой для среднего времени пребывания в системе $M|G|1$ — EPS заявки с средней длиной $E[F]$, получим простое выражение для интересующей нас оценки среднего времени пребывания заявки в системе, соответствующего времени получения услуги пользователем системы ММО:

$$E[T] = \frac{E[F]}{1-\rho}, \quad (11)$$

где $\rho = \lambda/\mu < 1$, а среднее время обслуживания μ^{-1} , в свою очередь, можем оценить с помощью выражения (10).

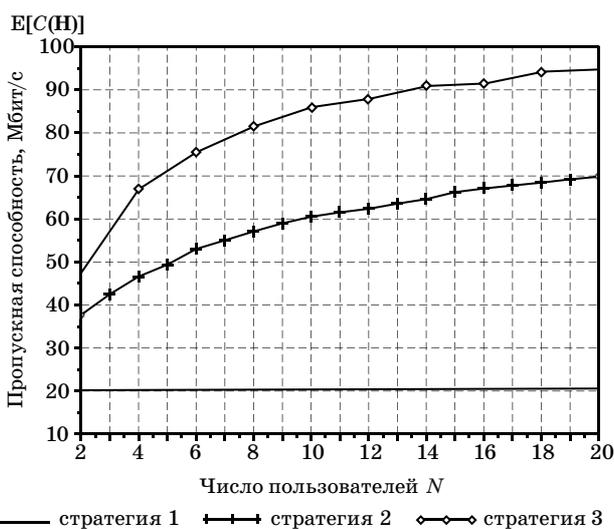
Стратегия 3 обслуживания подмножества пользователей с наилучшей пропускной способностью

Ситуацию выбора для обслуживания подмножества пользователей с наилучшей пропускной способностью можно смоделировать с помощью трех СМО, построенных в предыдущем подразделе для стратегии 2 обслуживания пользователя с наилучшей пропускной способностью канала. Для времени пребывания заявки в каждой из систем будут справедливы соответствующие формулы (8), (9) и (11), в которых при определении величин μ^{-1} и $m^{(2)}$ будет использоваться величина $E[C_{SumRate}(H)]$ вместо $E[\max C(H)]$ или $E[C(H)]$. Поскольку ожидаемо, что $E[C_{SumRate}(H)] \geq E[\max C(H)]$, то среднее время пребывания заявки в системе будет наилучшим (наименьшим) среди всех трех стратегий.

Прежде чем переходить к численному моделированию и сравнению с аналитическими результатами, необходимо отметить, что при большой нагрузке, а точнее перегрузке ($E[F] > E[T]$), моделирование системы ММО с помощью СМО с разделением процессора или случайным выбором на обслуживание уже не будет являться объективным, т. е. фактически не будет применимо [15, 16], поэтому при большом числе пользователей в системе более адекватной моделью станет СМО $M|G|_{\infty}$ ($Geo|G|_{\infty}$ — в дискретном случае).

Численный эксперимент

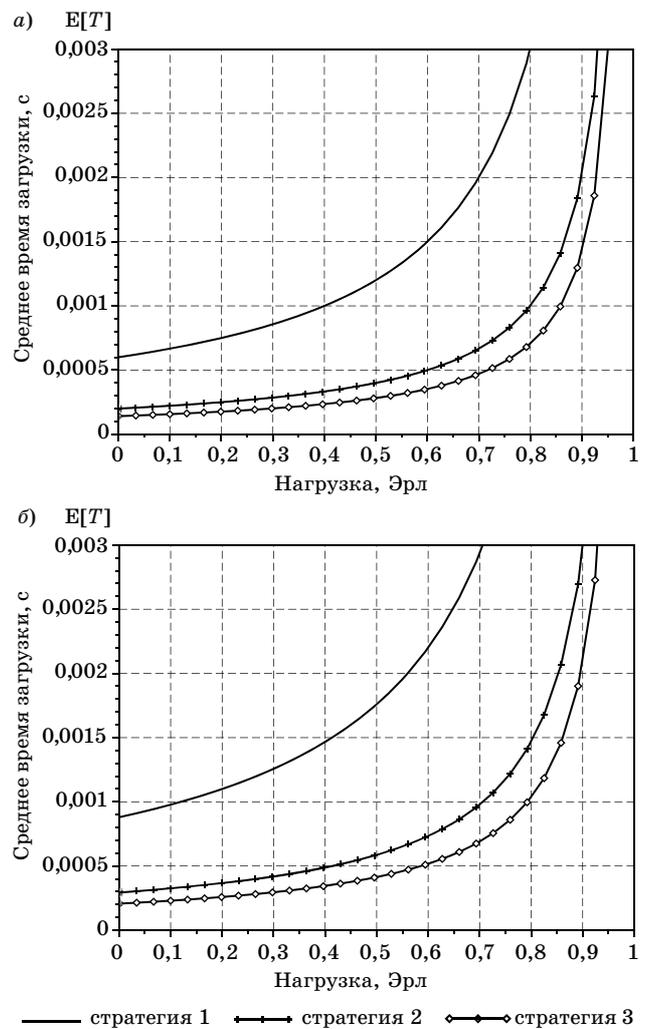
Организация численного эксперимента базируется на характеристиках многопользовательской передачи MIMO стандарта 802.11 WLANs [20] со спецификацией построения сетей высокой и сверхвысокой пропускной способности (High Throughput, Very High Throughput) в частотных диапазонах 2,4 и 5 ГГц, достигающих максимальной скорости передачи данных до 7 Гбит/с. Одно из важнейших отличий стандарта IEEE 802.11 — это возможность объединения нескольких MAC-пакетов в один пакет физического уровня A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit), причём один пакет A-MPDU может агрегировать несколько пакетов MSDU (MAC Service Data Unit), принадлежащих различным приложениям и обладающих различными требованиями к качеству предоставления услуг (QoS). При разработке исходных данных для численного эксперимента по выбору стратегии загрузки файлов для наилучшей пропускной способности системы в случае обслуживания одного или нескольких пользователей с помощью формул (1), (2) при заданной средней пропускной способности $E[C(\mathbf{H})] = 20$ Мбит/с для ширины полосы 20 МГц были получены средние значения пропускной способности $E[\max C(\mathbf{H})]$ для стратегии 2 и $E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]$ для стратегии 3 в зависимости от числа пользователей системы MIMO (рис. 6). При этом для моделирования перемещения пользователей системы MIMO на каждом такте разыгрывалось случайное приращение элементов канальной матрицы \mathbf{H} , имеющее комплексное нормальное распределение CN(0, 1) [21].



■ Рис. 6. Средняя пропускная способность в зависимости от числа заявок в системе

■ Fig. 6. Ergodic capacity depending on the number of requests in the queuing system

На рис. 7, а и б приведены графики зависимости среднего времени пребывания заявки в системе, полученные с помощью формулы (3), на примере трафика UDP с негарантированным типом услуги Best Effort [22]. При $N = 10$ для заданной средней пропускной способности $E[C(\mathbf{H})] = 20$ Мбит/с и найденных средних $E[\max C(\mathbf{H})] = 60$ Мбит/с и $E[C_{SumRate}(\mathbf{H})] = 85$ Мбит/с при длине одного такта $\Delta t = 10^{-8}$ с параметр b_1 геометрического распределения для стратегии 1 обслуживания в порядке поступления по формуле (4) равен $b_1 = 0,2$. Параметры $b_2 = 0,6$ и $b_3 = 0,85$ определяются для стратегии 2 по формуле (6) и для стратегии 3 по формуле (7) аналогично. Из условия стационарности следует, что при $\rho \in (0; 1)$ вероятность $a \in \left[0; \frac{b_{1,2,3}}{\hat{c}}\right)$. Для численного эксперимента



■ Рис. 7. Сравнение среднего времени загрузки файла для трех стратегий при $\hat{c} = 1,5$ КБ (а) и $\hat{c} = 2,2$ КБ (б)

■ Fig. 7. Comparison of the average file transfer delay for three strategies for $\hat{c} = 1,5$ КБ (а) и $\hat{c} = 2,2$ КБ (б)

та используем значения средней длины заявки \hat{c} , равные 1,5 и 2,2 КБ [22–24].

Напомним, что в соответствии с анализом построенных аналитических моделей в виде СМО наилучшей стратегией с точки зрения наименьшего времени пребывания заявки в системе является стратегия с выбором на обслуживание подмножества пользователей с максимальной пропускной способностью, что подтверждается графиками на рис. 7.

Однако, как ни парадоксально, обслуживание пользователей в порядке поступления в некоторых ситуациях может оказаться выгоднее обслуживания пользователей с наилучшей пропускной способностью канала с точки зрения снижения стоимости обслуживания и уменьшения времени пребывания в системе. Прийти к такому выводу можно, если продолжать проводить аналогию между системой ММО (в условиях стратегии 2 обслуживания) и СМО с случайным выбором на обслуживание [12, 25] при не слишком большой разнице между значениями $E[C(\mathbf{H})]$ и $E[\max C(\mathbf{H})]$, а, возможно, даже наблюдая близость значений $E[C(\mathbf{H})]$ и $E[C_{SumRate}(\mathbf{H})]$ в условиях малого числа антенн у БС. В этих случаях естественно предположить, что чем больше времени пользователь пребывает в системе, тем меньше для него становится вероятность попасть на обслуживание при том, что вероятность поступления очередного пользователя становится выше. Таким образом, разброс реального времени пребывания для конкретного пользователя в системе довольно велик. То есть речь идет о том, что, помимо значения среднего времени пребывания заявки в системе, важен еще и второй момент этой случайной величины, который, как известно, для стратегии обслуживания пользователей в порядке их поступления будет меньше, чем, в частности, для СМО с обслуживанием в случайном порядке [12, 25] $E[T_{FCFS}]^2 \leq E[T_{SIRO}]^2$. Поскольку возможность такой ситуации не исключена и сделанное предположение имеет под собой довольно веские

основания, дальнейшие исследования в этом направлении представляют интерес для получения более точных рекомендаций для выбора параметров функционирования реальной физической системы ММО.

Заключение

В работе проанализированы три стратегии обслуживания пользователей с помощью математических моделей в виде СМО в дискретном и непрерывном времени. Применение теории дискретных систем обслуживания к моделированию процесса планирования [26] способствовало построению симулятора для приближенного анализа методом Монте-Карло, а также упростило задачу получения аналитических результатов с помощью предложенных формул в замкнутой форме. Построенные модели дают возможность оценить среднее время пребывания заявки в системе, характеризующее один из важнейших показателей качества обслуживания многопользовательской системы ММО — время получения услуги пользователем. Полученные характеристики позволяют сделать вывод об эффективности каждой из исследованных стратегий. В дальнейшем предполагается построить математические модели, учитывающие возможность прерывания обслуживания на каждом такте, для получения более точных оценок, проанализировать второй момент времени пребывания заявки в системе, а также исследовать влияние различных распределений длины группы заявок (размера передаваемых файлов) на время пребывания заявки в системе.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.3397.2017/4.6.

Литература

1. Solomitckii D., Petrov V., Nikopour H., Akdeniz M., Orhan O., Himayat N., Talwar S., Andreev S., Koucheryavy Y. Ray-based evaluation of dual-polarized MIMO in (Ultra)-dense millimeter-wave urban deployments. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2018, pp. 1–7. doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417788
2. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. *Технология ММО: принципы и алгоритмы*. М., Горячая линия-Телеком, 2014. 244 с.
3. Borst S. User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks. *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint*

Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2003, vol. 1, pp. 321–331. doi:10.1109/INFCOM.2003.1208684

4. Bellalta B., Oliver M. A space-time batch-service queueing model for multi-user MIMO communication systems. *Proceedings of the 12th International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Tenerife, 2009, pp. 357–364. doi:10.1145/1641804.1641866
5. Bellalta B., Daza V., Miquel O. An approximate queueing model for multi-rate multi-user MIMO systems. *IEEE Communications Letters*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 392–394. doi:10.1109/LCOMM.2011.020311.102434

6. Airy M., Shakkattai S., Heath R. W. Spatially greedy scheduling in multi-user MIMO wireless systems. *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems Computers*, 2003, vol. 1, pp. 982–986. doi:10.1109/ACSSC.2003.1292064
7. Jankiraman M. *Space-Time Codes and MIMO Systems*. Artech House, 2004. 327 p.
8. Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, vol. 10, pp. 585–595. <https://doi.org/10.1002/ett.4460100604>
9. Печинкин А. В., Разумчик Р. В. *Системы массового обслуживания в дискретном времени*. М., Физматлит, 2018. 432 с.
10. Alfa Attahiru S. *Applied Discrete-Time Queues*. Springer-Verlag, New York, 2016. 383 p.
11. Гайдамака Ю. В., Зарипова Э. Р., Орлов Ю. Н. К анализу эффектов группового поступления сигнальных сообщений на время ожидания начала обслуживания. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2015, № 3, с. 74–80.
12. Norikazu K., Takagi H., Yutaka T., Hong S.-J., Toshiharu H. Waiting time analysis for $M^{[X]}|G|1$ queues with/without vacations under random order of service discipline. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 2000, vol. 43, no. 4, pp. 455–468. doi:10.15807/jorsj.43.455
13. Takagi H. A note on the response time in $M|G|1$ queues with service in random order and bernoulli feedback. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 1996, vol. 39, no. 4, pp. 486–500. doi:10.15807/jorsj.39.486
14. Gesbert D., Kountouris M., Heath R., Chae C.-B., Sälzer T. From single user to multiuser communications: shifting the MIMO paradigm. *IEEE Signal Process*, 2007, vol. 24, pp. 36–46.
15. Yashkov S. F. Processor-sharing queues: Some progress in analysis. *Queueing Systems*, 1987, vol. 2, no. 1, pp. 1–17.
16. Яшков С. Ф. Математические вопросы теории систем обслуживания с разделением процессора. *Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика»*, 1990, т. 29, с. 3–82.
17. Яшков С. Ф., Яшкова А. С. Эгалитарное разделение процессора. *Информационные процессы*, 2006, т. 6, № 4, с. 396–444.
18. Borst S. C., Voxma O. J., Morrison J. A., Núñez Queija R. The equivalence between processor sharing and service in random order. *Operations Research Letters*, 2003, vol. 31, no. 4, pp. 254–262. doi:10.1016/S0167-6377(03)00006-3
19. Yashkov S. F. On random order of service and processor sharing. *Information Processes*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 160–163.
20. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE std 802.11, 2016.
21. Foschini G., Gans M. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, no. 6, p. 311. <https://doi.org/10.1023/A:1008889222784>
22. Daldoul Y., Meddour D., Ksentini A. IEEE 802.11n/ac data rates under power constraints. *IEEE International Conference on Communications*, Kansas City, USA, May 20–24, 2018. doi:10.1109/ICC.2018.8422697
23. Gast M. S. *802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond*. O'Reilly Media, 2013. 154 p.
24. Sharon O., Alpert Y. A new aggregation based scheduling method for rapidly changing IEEE 802.11ac wireless channels. *Wireless Sensor Network*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 145–165. doi:10.4236/wsn.2016.88013
25. Saaty T. L. *Elements of Queuing Theory with Applications*. Dover Publications, 1983. 423 p.
26. Sopin E., Ageev K., Samouylov K. Approximate analysis of the limited resources queuing system with signals. *Proceedings — European Council for Modelling and Simulation ECMS*, 2019, vol. 33, no. 1, pp. 462–465.

UDC 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-69-81

Effective user service strategies in a multi-user MIMO systemGorbunova A. V.^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-7073-7022Medvedeva E. G.^{a,b}, Assistant Professor, orcid.org/0000-0001-9104-708X, medvedeva-eg@rudn.ruGaidamaka Yu. V.^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0003-2655-4805Shorgin V. S.^b, PhD, Tech., Senior Scientist, orcid.org/0000-0002-1090-544XSamouylov K. E.^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-6368-9680, samouylov-ke@rudn.ru^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 13, Miklukho-Maklaya St., 117198, Moscow, Russian Federation^bThe Institute of Informatics Problems of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the RAS, 44–2, Vavilov St., 119333, Moscow, Russian Federation**Introduction:** One of the main advantages of multiple antenna systems is the support of multi-user connections, simultaneously transmitting parallel data streams. This can significantly increase the overall system throughput. However, the spectral efficiency

can be additionally increased through the usage of various dynamic strategies which take into account the current state of the system. Here we propose a method to evaluate the effectiveness of such strategies with the help of appropriate mathematical models. **Purpose:** Development of mathematical models for a multi-user MIMO system which would allow you to evaluate the average delay of a file transfer. **Results:** Mathematical models of the MIMO system are presented in the form of discrete/continuous time queuing systems for three user service strategies. We provide formulas for estimating the average file transfer delay in a closed form, which simplify numerical analysis as compared to the well-known methods using mathematical models in continuous time. This method allows you to find the most effective strategy with less computational complexity. Another advantage of the constructed models is the opportunity of further research on the effect of file length distributions on the file transfer delay. The conclusions we made about the effectiveness of each strategy are consistent with our earlier work, which is confirmed by a numerical example. **Practical relevance:** The developed mathematical models for a multi-user MIMO system can be used to set the operating parameters of a real wireless MIMO system.

Keywords — multiple antenna system, multi-user MIMO, mathematical model of a MIMO system, MIMO capacity, file transfer delay.

For citation: Gorbunova A. V., Medvedeva E. G., Gaidamaka Yu. V., Shorgin V. S., Samouylov K. E. Effective user service strategies in a multi-user MIMO system. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 69–81 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-69-81

References

- Solomitckii D., Petrov V., Nikopour H., Akdeniz M., Orhan O., Himayat N., Talwar S., Andreev S., Koucheryavy Y. Ray-based evaluation of dual-polarized MIMO in (Ultra)-dense millimeter-wave urban deployments. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2018, pp. 1–7. doi:10.1109/VTCSpring.2018.8417788
- Bakulin M. G., Varukina L. A., Kreyndelin V. B. *Tekhnologiya MIMO: principy i algoritmy* [MIMO Technology: Principles and Algorithms]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2014. 244 p. (In Russian).
- Borst S. User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks. *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2003, vol. 1, pp. 321–331. doi:10.1109/INFCOM.2003.1208684
- Bellalta B., Oliver M. A space-time batch-service queueing model for multi-user MIMO communication systems. *Proceedings of the 12th International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Tenerife, 2009, pp. 357–364. doi:10.1145/1641804.1641866
- Bellalta B., Daza V., Miquel O. An approximate queueing model for multi-rate multi-user MIMO systems. *IEEE Communications Letters*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 392–394. doi:10.1109/LCOMM.2011.020311.102434
- Airy M., Shakkattai S., Heath R. W. Spatially greedy scheduling in multi-user MIMO wireless systems. *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems Computers*, 2003, vol. 1, pp. 982–986. doi:10.1109/ACSSC.2003.1292064
- Jankiraman M. *Space-Time Codes and MIMO Systems*. Artech House, 2004. 327 p.
- Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, vol. 10, pp. 585–595. https://doi.org/10.1002/ett.4460100604
- Pechinkin A. V., Razumchik R. V. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya v diskretnom vremeni* [Discrete Time Queuing Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018. 432 p. (In Russian).
- Alfa Attahiru S. *Applied Discrete-Time Queues*. Springer-Verlag, New York, 2016. 383 p.
- Gaidamaka Yu. V., Zaripova E. R., Orlov Y. N. Analyzing effects of SIP-messages batch arrival on queuing time for server processing. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2015, no. 3, pp. 74–80 (In Russian).
- Norikazu K., Takagi H., Yutaka T., Hong S.-J., Toshiharu H. Waiting time analysis for M[X]G1 queues with/without vacations under random order of service discipline. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 2000, vol. 43, no. 4, pp. 455–468. doi:10.15807/jorsj.43.455
- Takagi H. A note on the response time in M/G/1 queues with service in random order and bernoulli feedback. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 1996, vol. 39, no. 4, pp. 486–500. doi:10.15807/jorsj.39.486
- Gesbert D., Kountouris M., Heath R., Chae C.-B., Sälzer T. From single user to multiuser communications: shifting the MIMO paradigm. *IEEE Signal Process*, 2007, vol. 24, pp. 36–46.
- Yashkov S. F. Processor-sharing queues: Some progress in analysis. *Queueing Systems*, 1987, vol. 2, no. 1, pp. 1–17.
- Yashkov S. F. Mathematical problems in the theory of processor-sharing queues. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya "Teoriya veroyatnosti. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika"*, 1990, vol. 29, pp. 3–82 (In Russian).
- Yashkov S. F., Yashkova A. S. Egalitarian processor sharing. *Information Processes*, 2006, vol. 6, no. 4, pp. 396–444 (In Russian).
- Borst S. C., Boxma O. J., Morrison J. A., Núñez Queija R. The equivalence between processor sharing and service in random order. *Operations Research Letters*, 2003, vol. 31, no. 4, pp. 254–262. doi:10.1016/S0167-6377(03)00006-3
- Yashkov S. F. On random order of service and processor sharing. *Information Processes*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 160–163.
- Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE std 802.11, 2016.
- Foschini G., Gans M. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, no. 6, p. 311. https://doi.org/10.1023/A:1008889222784
- Daldoul Y., Meddour D., Ksentini A. IEEE 802.11n/ac data rates under power constraints. *IEEE International Conference on Communications*, Kansas City, USA, May 20–24, 2018. doi:10.1109/ICC.2018.8422697
- Gast M. S. *802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond*. O'Reilly Media, 2013. 154 p.
- Sharon O., Alpert Y. A new aggregation based scheduling method for rapidly changing IEEE 802.11ac wireless channels. *Wireless Sensor Network*, 2016, vol. 8, no. 8, pp. 145–165. doi:10.4236/wsn.2016.88013
- Saaty T. L. *Elements of Queuing Theory with Applications*. Dover Publications, 1983. 423 p.
- Sopin E., Ageev K., Samouylov K. Approximate analysis of the limited resources queuing system with signals. *Proceedings — European Council for Modelling and Simulation ECMS*, 2019, vol. 33, no. 1, pp. 462–465.

**БРИТОВ
Георгий
Семенович**



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение».

В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем.

Эл. адрес: bgs@ibi.metrocom.ru

**ГАЙДАМАКА
Юлия
Васильевна**



Профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов, старший научный сотрудник Института проблем информатики, Москва.

В 1995 году окончила магистратуру Российского университета дружбы народов по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2017 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором свыше 200 научных публикаций и 10 патентов на программы ЭВМ.

Область научных интересов — математическая теория телеграфика мультисервисных сетей, беспроводные сети 5G и др.

Эл. адрес: gaydamaka-yuv@rudn.ru

**ГОРБУНОВА
Анастасия
Владимировна**



Старший преподаватель кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов, Москва.

В 2010 году окончила магистратуру Российского университета дружбы народов по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2017 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических и естественных наук.

Является автором 23 научных публикаций.

Область научных интересов — теория массового обслуживания, математическая теория телеграфика, облачные вычисления, математическое моделирование и анализ производительности сетей.

Эл. адрес: gorbunova-av@rudn.ru

**ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович**



Профессор, заведующий лабораторией интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций и 70 патентов на изобретения.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес: gorodetskiy@mail23.ipme.ru

**ГРУЗЛИКОВ
Александр
Михайлович**



Начальник отдела АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург.

В 1999 году окончил Московский технический университет электронной техники по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций.

Область научных интересов — разработка вычислительных систем реального времени, включая вопросы планирования и диагностирования.

Эл. адрес: agruzlikov@yandex.ru

**ДВОРНИКОВ
Сергей
Викторович**



Профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург, заслуженный изобретатель Российской Федерации.

В 1998 году окончил Военную академию связи им. С. М. Буденного по специальности «Организация применения и эксплуатации радиоэлектронных систем».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 190 научных публикаций и 100 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория связи, помехоустойчивые радиосистемы.

Эл. адрес: practicdsv@yandex.ru

**ДВОРНИКОВ
Сергей
Сергеевич**



Начальник отделения центра обработки информации Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 2015 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Радиотехника и телекоммуникация».

В 2018 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 20 научных публикаций и 10 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория связи, помехоустойчивые радиосистемы.

Эл. адрес:
dvornikov_s_s@mail.ru

**КИПЯТКОВА
Ирина
Сергеевна**



Старший научный сотрудник лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2008 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Роботы и робототехнические системы».

В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 80 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматическое распознавание речи, нейронные сети.

Эл. адрес: kipyatkova@iias.spb.su

**КОЛЕСОВ
Николай
Викторович**



Профессор, главный научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург.

В 1969 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Радиотехника».

В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором около 200 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — разработка вычислительных систем реального времени, включая вопросы планирования и диагностирования.

Эл. адрес: kolesovnv@mail.ru

**КОСТЫГОВ
Дмитрий
Вадимович**



Аспирант АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург.

В 2015 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Электронные вычислительные машины».

Является автором 16 научных публикаций.

Область научных интересов — разработка вычислительных систем на кристалле.

Эл. адрес: dkost92@mail.ru

**КУЛЬМИНСКИЙ
Данил
Дмитриевич**



Научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, доцент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 2014 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Методы и устройства обработки сигналов и данных».

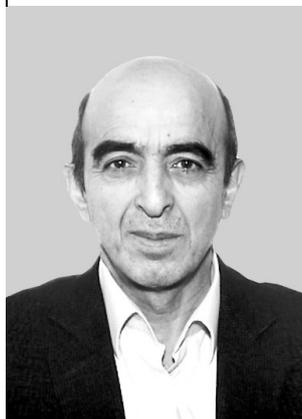
В 2018 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 20 научных публикаций.

Область научных интересов — радиофизика, нелинейная динамика, анализ временных рядов, разработка систем автоматического управления и контроля на базе программируемых микроконтроллеров.

Эл. адрес:
kulminskydd@gmail.com

**КУРБАНОВ
Вугар
Гариб оглы**



Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, доцент кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1976 году окончил Азербайджанский государственный университет им. С. М. Кирова по специальности «Прикладная математика».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.

Является автором более 90 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование процессов управления и др.

Эл. адрес:
vugar_borchali@yahoo.com

МАРКОВНИКОВ
Никита
Михайлович



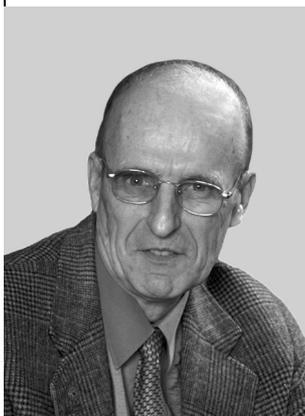
Программист лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, магистрант Университета ИТМО. В 2017 году окончил бакалавриат Университета ИТМО по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — автоматическое распознавание речи, нейронные сети. Эл. адрес: niklemark@gmail.com

МЕДВЕДЕВА
Екатерина
Георгиевна



Ассистент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов, Москва. В 2009 году окончила Российский университет дружбы народов по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором 30 научных публикаций. Область научных интересов — математическая теория телетрафика, теория массового обслуживания, анализ производительности в беспроводных сетях связи. Эл. адрес: medvedeva-eg@rudn.ru

МИРОНОВСКИЙ
Леонид
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Действительный член Академии навигации и управления движением, заслуженный работник высшей школы. В 1962 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Инженер-электрофизик». В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций, соавтором пяти учебников и монографий, автором более 50 изобретений. Область научных интересов — техническая диагностика и компьютерное моделирование динамических систем. Эл. адрес: mir@aanet.ru

НАВРОЦКАЯ
Елена
Владимировна



Доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. В 2005 году окончила Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Биомедицинская инженерия». В 2016 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 15 научных публикаций. Область научных интересов — нелинейные колебания и волны, математическое моделирование, анализ временных рядов, системы передачи информации. Эл. адрес: sidakev@gmail.com

ПОНОМАРЕНКО
Владимир
Иванович



Доцент, ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. В 1982 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Является автором более 300 научных публикаций, пяти патентов на изобретения и авторских свидетельств. Область научных интересов — хаотическое поведение нелинейных систем и др. Эл. адрес: ponomarenkovi@gmail.com

ПРОХОРОВ
Михаил
Дмитриевич



Доцент, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. В 1992 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — нелинейные колебания и волны, математическое моделирование, стохастическая динамика и хаос, анализ временных рядов. Эл. адрес: mdprokhorov@yandex.ru

ПШЕНИЧНИКОВ
Александр
Викторович



Докторант кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 1999 году окончил Санкт-Петербургское высшее военное инженерное училище связи по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 80 научных публикаций, 14 патентов на изобретения и одной полезной модели.

Область научных интересов — теория связи, помехозащищенные радиосистемы.

Эл. адрес: siracooz77@mail.ru

САМУЙЛОВ
Константин
Евгеньевич



Профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики РАН, Москва.

В 1978 году окончил Университет дружбы народов им. П. Лумумбы по специальности «Математик».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 300 научных публикаций и четырех патентов на программы ЭВМ.

Область научных интересов — математическая теория телетрафика, беспроводные сети IoT, анализ качества предоставления услуг в беспроводных сетях IoT и 5G и др.

Эл. адрес: samuylov-ke@rudn.ru

ТАРАСОВА
Ирина
Леонидовна



Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета.

В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления».

В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 60 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

ТОЛМАЧЕВА
Марина
Владимировна



Старший научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»».

В 1987 году окончила Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций, в том числе одной монографии.

Область научных интересов — разработка вычислительных систем реального времени, включая вопросы планирования и диагностики.

Эл. адрес: marina-tolm@yandex.ru

ТСИЛИКА
Кириаки
Димитрос



Ассистент кафедры экономики Университета Фессалии, преподаватель Школы социальных наук Греческого открытого университета, Волос, Греция.

В 1995 году окончила математический факультет Университета Аристотеля в Салониках, Греция. В 1999 году защитила диссертацию на соискание ученой степени (PhD) по прикладной математике.

Является автором 68 научных публикаций.

Область научных интересов — вычислительная математика, символические вычисления, системы компьютерной алгебры, теория и методы оптимизации, невыпуклый негладкий анализ, хими-вариационные неравенства, визуализация данных, теория графов, экономические сети и др. Эл. адрес: ktsilika@teilar.gr

ШИЛОВ
Николай
Германович



Доцент, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1998 году окончил с отличием Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Экономика и управление на машиностроительных предприятиях».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, конфигурирование, профилирование, управление онтологиями, управление контекстом, проактивные рекомендуемые системы.

Эл. адрес: nick@iias.spb.su

**ШОРГИН
Всеволод
Сергеевич**



Старший научный сотрудник Института проблем информатического центра «Информатика и управление» РАН, Москва.

В 2001 году окончил Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского по специальности «Конструирование и технология электронных вычислительных средств».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 19 научных публикаций.

Область научных интересов — информационные технологии, системы массового обслуживания, стохастические системы, аналитическое моделирование.

Эл. адрес: vshorgin@ipiran.ru

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.

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