

ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Темы номера:

- ✓ Многозначная классификация компьютерных атак с использованием искусственных нейронных сетей
- ✓ Вероятностная оценка дальности обнаружения малоразмерных БПЛА
- ✓ Исследования свойств микроизгиба одномодового оптического волокна

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

**ТРУДЫ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ**

Том 9. № 4

Proceedings of Telecommunication Universities

Vol. 9. Iss. 4

Санкт-Петербург

2023

Описание журнала

Научный журнал. Включен 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 (распоряжение Минобрнауки России № 21-р от 12.02.2019), по специальностям (распоряжение № 33-р от 01.02.2022):

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Выпускается с 1960 года. Выходит 6 раз в год. Издается на русском и английском языках.

Редакционный совет

Киричек Р.В. <i>Главный редактор</i>	д.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Владыко А.Г. <i>Зам. Главного редактора</i>	к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Буйневич М.В. <i>Шеф-редактор</i>	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Зеневич А.О.	д.т.н., проф., Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Республика Беларусь
Розанов Н.Н.	д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия
Дукельский К.В.	д.т.н., доцент, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия
Кучерявый Е.	PhD, Технологический университет Тампере, г. Тампере, Финляндия
Гошек И.	PhD, Технологический университет Брно, г. Брно, Чешская республика
Тиамийу О.А.	PhD, Университет Илорина, г. Илорин, Нигерия
Козин И.Д.	д.ф.-м.н., проф., Алматинский университет энергетики и связи, г. Алма-Аты, Казахстан
Самуйлов К.Е.	д.т.н., проф., Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия
Степанов С.Н.	д.т.н., проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Россия
Росляков А.В.	д.т.н., проф., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара, Россия
Кучерявый А.Е.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Канаев А.К.	д.т.н., проф., Петербургский университет путей сообщения имени Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия
Новиков С.Н.	д.т.н., проф., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия
Дворников С.В.	д.т.н., проф., Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (ВАС), г. Санкт-Петербург, Россия
Коржик В.И.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия
Ковалгин Ю.А.	д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Регистрационная информация

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: ПИ № 77-77501 от 17.01.2020 г. (пред. рег. № 77-17986 от 07.04.2004 г.)

Подписной индекс в объединенном каталоге «ПРЕССА РОССИИ»: 59983

Размещение в РИНЦ (elibrary.ru) по договору: № 59-02/2013R от 20.02.2013

Контактная информация

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес: 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

Адрес: 193232, Санкт-Петербург,
редакции: пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2
Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022,
+79643759970
E-mail: tuzs@sut.ru
Web: <http://tuzs.sut.ru>
ВК: <http://vk.com/spbtuzs>

Description

Scientific journal. The journal is included in the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of science and for the degree of doctor of science should be published (order of the Ministry of Education and Science of Russia No 21-r of 12 February 2019) in the field of (order of the Ministry of Education and Science of Russia No 33-r of 01 February 2022):

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs

2.2.6. Optical and optoelectronic devices and complexes

2.2.13. Radio engineering, including television systems and devices

2.2.14. Antennas, microwave devices and its technologies

2.2.15. Systems, networks and telecommunication devices

2.2.16. Radiolocation and radio navigation

2.3.1. System analysis, management and information processing

2.3.6. Methods and systems of information security, cybersecurity

Since 1960. Published 6 times per year. Published in Russian and English.

Editorial Board

R.V. Kirichek <i>Editor-in-chief</i>	DSc, associate prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
A.G. Vladiko <i>Deputy editor-in-chief</i>	PhD, associate prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
M.V. Buinevich <i>Chief editor</i>	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
A.O. Zenevich	DSc, prof., Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus
N.N. Rozanov	DSc, prof., member-corr. RAS, Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI), Saint-Petersburg, Russia
K.V. Dukel'skii	DSc, associate prof., Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI), Saint-Petersburg, Russia
Y. Koucheryav	PhD, Tampere University of Technology, Tampere, Finland
I. Hošek	PhD, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic
O.A. Tiamiyu	PhD, University of Ilorin, Ilorin, Nigeria
I.D. Kozin	DSc, prof., Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan
K.E. Samuilov	DSc, prof., Peoples' Friendship University (RUDN), Moscow, Russia
S.N. Stepanov	DSc, prof., Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia
A.V. Roslyakov	DSc, prof., Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara, Russia
A.E. Koucheryav	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
A.K. Kanaev	DSc, prof., Emperor Alexander I-st Petersburg State Transport University (PSTU), Saint-Petersburg, Russia
S.N. Novikov	DSc, prof., Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia
S.V. Dvornikov	DSc, prof., Military Academy of Telecommunications named after Marshal Union S.M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia
V.I. Korzhik	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
Yu.A. Kovalgin	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

Registration Information

Registered by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media on 17.01.2020: PI No. 77-77501 (prev. reg. on 04.07.2004: No. 77-17986)

Subscription index for joint catalog «PRESSA ROSSII»: 59983

Accommodation in RINC (elibrary.ru) by agreement on 20.02.2013: No. 59-02/2013R

Contact Information

Publisher:	Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications» (SPbSUT)	Post address:	193232, Saint Petersburg, Prospekt Bolshevikov, 22/1
Publisher address:	191186, Saint Petersburg, Moika river embankment, 61-A	Phone:	+7 (812) 326-31-63, local 2022, +79643759970
		E-mail:	tuzs@sut.ru
		Web:	http://tuzs.sut.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

- | | | |
|--|---|---|
| <p>Дворников С.С., Дворников С.В.
Оценка дальности обнаружения малоразмерных БПЛА при заданной вероятности их идентификации</p> | 6 | <p>Dvornikov S.-jr, Dvornikov S.
Detection range estimation of small UAVs at a given probability of their identification</p> |
|--|---|---|

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- | | | |
|--|----|---|
| <p>Гулаков И.Р., Зеневич А.О.,
Матковская Т.А., Новиков Е.В.
Исследования свойств микроизгиба одномодового оптического волокна</p> | 15 | <p>Gulakov I., Zenevich A.,
Matkovskaia T., Novikov E.
Investigations of single-mode optical fiber microbending properties</p> |
| <p>Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А.,
Проскурин Д.К., Фёдоров С.М.
Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования</p> | 21 | <p>Ishchenko E., Pasternak Yu., Pendyurin V.,
Proskurin D., Fedorov S.
Equivalent circuits application of pin-diodes and MEMS-keys in electrodynamic modeling problems</p> |
| <p>Мендельсон М.А., Егоров В.А.,
Копылов Д.А.
Кодирование АФМ-сигналов при передаче дробного числа бит на символ</p> | 34 | <p>Mendelson M., Egorov V.,
Kopylov D.
AFM signals coding when transmitting a fractional number of bits per symbol</p> |
| <p>Фокин Г.А.
Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний</p> | 44 | <p>Fokin G.
Location aware beamforming in millimeter-wave band ultra-dense radio access networks. Part 1. Model of two links</p> |

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- | | | |
|--|-----|--|
| <p>Макаренко С.И., Нестеров А.А.
Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно-технических систем</p> | 65 | <p>Makarenko S., Nesterov A.
Structural and functional model of organizational and technical systems interoperability</p> |
| <p>Марочкина А.В., Парамонов А.И.
Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа</p> | 75 | <p>Marochkina A., Paramonov A.
A method for routing traffic in a three-dimensional high-density IoT network using gray relational analysis</p> |
| <p>Липатников В.А., Задбоев В.А.,
Мелехов К.В., Шевченко А.А.
Метод повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети с учетом использования средств определения геолокации нарушителя</p> | 86 | <p>Lipatnikov V., Zadboev V.,
Melekhov K., Shevchenko A.
A method of improving the security of information and telecommunications network using the means of determining intruder's geolocation</p> |
| <p>Шелухин О.И., Раковский Д.И.
Многозначная классификация компьютерных атак с использованием искусственных нейронных сетей с множественным выходом</p> | 97 | <p>Shelukhin O., Rakovsky D.
Multivalued classification of computer attacks using artificial neural networks with multiple outputs</p> |
| <p>Яковлев В.А., Салман В.Д.
Способ защиты от атаки некорректного заполнения избирательного бюллетеня в системе дистанционного электронного голосования</p> | 114 | <p>Yakovlev V., Salman W.
Defense method against an attack of incorrect ballot filling in a remote electronic voting system</p> |

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-6-13



Detection Range Estimation of Small UAVs at a Given Probability of Their Identification

✉ **Sergei S.-jr Dvornikov**^{1,2}, dvornik.92@mail.ru

✉ **Sergei S. Dvornikov**^{1,2} ✉, practcdsv@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

²Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Abstract: *The results of the development of a scientific and methodological apparatus that provide an assessment of the de-tecton range of small-sized unmanned aerial vehicles are presented. The general problems of radar detection of small objects are considered. A mathematical formulation of the research problem is carried out from the stand-point of detecting radar signals in noise based on a probabilistic approach. Substantiated are the parameters of radar stations, which are of the most significant importance for increasing the reliability of detecting objects with a small effective scattering surface. The functional dependences of the detection range of small unmanned aerial vehicles on the value of the signal-to-noise ratio in the channel and the sensitivity of the receiving devices are given. The dependence of the detection range on the wavelength of radiation from radar stations has been studied. A quantitative assessment of the probabilities of correct detection of small targets and false alarms is presented for various values of the decision threshold. Nomograms have been developed to assess the capabilities of detectors of unmanned aerial vehicles of the Phantom 3 type. The requirements for the structure of radar signals used to detect small targets are substantiated.*

Keywords: *detection of small targets, detection range of unmanned aerial vehicles, probability of correct signal detection, nomograms for assessing the capabilities of detectors*

For citation: Dvornikov S.-jr, Dvornikov S. Detection Range Estimation of Small UAVs at a Given Probability of Their Identification. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-6-13

Оценка дальности обнаружения малоразмерных БПЛА при заданной вероятности их идентификации

✉ **Сергей Сергеевич Дворников**^{1,2}, dvornik.92@mail.ru

✉ **Сергей Викторович Дворников**^{1,2} ✉, practcdsv@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

²Военная академия связи им. С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация: Представлены результаты разработки научно-методического аппарата, обеспечивающего проведение оценки дальности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены общие проблемы радиолокационного обнаружения малоразмерных объектов. Осуществлена математическая постановка задачи исследования с позиций обнаружения радиолокационных сигналов в шумах на основе вероятностного подхода. Обоснованы параметры радиолокационных станций, имеющих наиболее существенное значение для повышения достоверности обнаружения объектов с малой эффективной поверхностью рассеивания. Приведены функциональные зависимости дальности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов от значения отношения сигнал/шум в канале и чувствительности приемных устройств. Исследована зависимость дальности обнаружения от длины волны излучений радиолокационных станций. Представлена количественная оценка вероятностей правильного обнаружения малоразмерных целей и ложной тревоги при различных значениях порога принятия решения. Разработаны номограммы для оценки возможностей обнаружителей беспилотных летательных аппаратов типа Phantom 3. Обоснованы требования к структуре радиолокационных сигналов, используемых для обнаружения малоразмерных целей.

Ключевые слова: обнаружение малоразмерных целей, дальность обнаружения беспилотных летательных аппаратов, вероятность правильного обнаружения сигнала, номограммы оценки возможностей обнаружителей

Ссылка для цитирования: Дворников С.С., Дворников С.В. Оценка дальности обнаружения малоразмерных БПЛА при заданной вероятности их идентификации // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-6-13

Introduction

Small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various fields of human activity, from high-altitude panoramic shooting of the terrain to the delivery of small-sized cargo [1–3].

The economic accessibility of small-sized UAVs for the consumer and the ease of their control open up the possibility of unauthorized use of such devices [4, 5]. Consequently, the issues of suppressing the illegal use of small UAVs are relevant for law enforcement agencies and departments.

At the same time, the small size of such devices and the use of composite materials for their manufacture significantly complicate the solution of the problem of their timely detection [6, 7]. Therefore, the development of a scientific and methodological apparatus for assessing the possibilities of timely detection of small-sized UAVs is a priority area of research, which has a pronounced practical focus for law enforcement agencies [8–10].

Taking into account these aspects, this article proposes the results of assessing the possibility of radar detection of Phantom-class quadcopters [11–13].

Statement of the problem of UAV detection from the standpoint of statistical decision theory

The task of detecting small UAVs is proposed to be considered from the standpoint of receiving and processing radar signals reflected from the target [14–16]. In the general case, such a task is based on the elements of decision theory [17, 18], according to which it is necessary to make a reasonable choice between two alternative hypotheses H_0 and H_1 , obtained from the results of statistical processing of the received im-

plementations of the input samples $x(t)$, about the presence or absence they have a useful signal.

So, in accordance with the hypothesis $H_0: x(t) = n(t)$, the processed sample of the input implementation $x(t)$ contains only noise $n(t)$. And the hypothesis $H_1: x(t) = s(t) \oplus n(t)$ characterizes the situation, according to which, in the processed sample of the accepted implementation $x(t)$, in addition to the noise component, there is a useful radar signal reflected from the target $s(t)$.

In the analytical representation of the hypothesis H_1 , the symbol $\oplus$ indicates the additive nature of the interaction of the useful signal $s(t)$ with the noise components $n(t)$ [19, 20].

Further, we will assume that the channel noise can be described by a Gaussian distribution:

$$p_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right). \quad (1)$$

In formula (1), x is the measured amplitude value of the input sample $x(t)$, which, in the absence of a useful signal in it, will be equal to the amplitude value of the noise components n in the receiving path; σ_0^2 is the channel noise dispersion.

If there is a useful signal $s(t)$ reflected from the target with an amplitude value s in the processed sample of the input implementation $x(t)$, the resulting distribution (1) is transformed to the following form:

$$p_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left(-\frac{(x-s)^2}{2\sigma_0^2}\right). \quad (2)$$

Graphically, the procedures for detecting a radar signal in the processed sample can be interpreted from the standpoint of searching for the area deter-

mined by the plots of distributions $p_0(x)$ and $p_1(x)$, in accordance with formulas (1) and (2) [20, 21]. For the situation under consideration, these graphs are shown in Fig. 1.

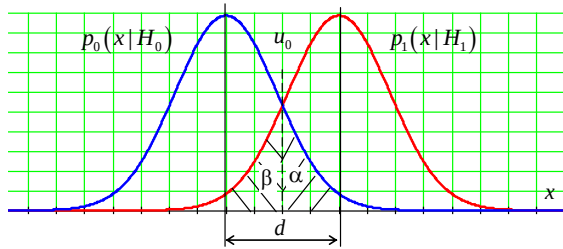


Fig. 1. Graphs Characterizing the Distribution of Conditional Probabilities Corresponding to Alternative Hypotheses about the Presence and Absence of a Useful Signal in the Processed Sample

On Fig. 1 $p_0(x|H_0)$ is the distribution of the measured value of the input realization in the presence of only noise in it, which can be characterized as a conditional probability corresponding to the hypothesis $H_0: x(t) = n(t)$. And $p_1(x|H_1)$ – respectively, is the distribution of the measured value of the input realization, in which, in addition to noise, a useful signal was contained. This distribution characterizes the conditional probability corresponding to the hypothesis $H_1: x(t) = z(t) \oplus n(t)$.

Obviously, only in the case when the measured value of x unambiguously falls into one of the areas limited by the functions of conditional probabilities $p_0(x|H_0)$ and $p_1(x|H_1)$, it is possible to make a fairly correct decision about the presence or absence of a useful signal in the processed implementation (infinity of the "tails" of distributions hypothetically leaves the possibility of an incorrect decision).

In [15], the probabilities that lead to the occurrence of errors are defined as an error of the first kind α and an error of the second kind β . So, the error of the first kind α characterizes the probability of a false alarm, i.e. making a decision about the presence of a useful signal in the processed sample, although it was actually absent. In other words, the decision was made to reject the hypothesis H_0 , although it was true. An error of the second kind β , called "missing the target", occurs when the hypothesis H_0 is accepted, although in fact the hypothesis H_1 is true.

As a result, the total probability of erroneous decisions p_e will be determined in accordance with the expression:

$$p_e = \alpha p_1 + \beta p_0. \quad (3)$$

It should be noted that the false alarm value α is determined by the area of the figure under the conditional probability function $p_0(x|H_0)$, limited by a pre-selected threshold G :

$$\alpha = \int_{u_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx. \quad (4)$$

Accordingly, the value of the target skip β is determined by the area bounded by the conditional probability function $p_1(x|H_1)$ as follows:

$$\beta = \int_{-\infty}^{u_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-s)^2}{2\sigma_0^2}\right) dx. \quad (5)$$

Note that expressions (4) and (5) were obtained taking into account the normalization of the noise variance. In practice, quite often, as the threshold value for making a decision, u_0 , the intersection point of the graphs of the conditional probabilities $p_0(x|H_0) = p_1(x|H_1)$ is chosen. In this case, the value of the total error probability will be determined as follows:

$$p_e = 0.5(\alpha + \beta). \quad (6)$$

Taking into account formulas (4) and (5), expression (6) can be transformed to the form:

$$p_e = \int_{M[s]=d/2}^{\infty} \frac{0.5}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right) dx + \int_{-\infty}^{M[s]=d/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-s)^2}{2\sigma_0^2}\right) dx. \quad (7)$$

Here $M[s]$ is the average value of the amplitude values of the sample of the input implementation $s(t)$; and $d = \max[p_1(x|H_1)] - \max[p_0(x|H_0)]$ is the difference between the maximum values of $p_0(x|H_0)$ and $p_1(x|H_1)$.

Taking into account the considered concepts, the problem of detecting small UAVs is defined as the search for conditions under which the maximum value of the probability of making a correct decision about the presence of a radar signal reflected from the target is ensured:

$$D = \int_{u_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-s)^2}{2\sigma_0^2}\right) dx \rightarrow \max \text{ at } \alpha \rightarrow \min. \quad (8)$$

Those, while minimizing the magnitude of false alarms. According to Fig. 1 condition (8) will be best provided with an increase in the value of d , which determines the energy differences between the parameters of the channel noise and the useful signal.

From such positions, the probability of correct detection is a function of the current ratio of the signal power to the noise power spectral density, which in the framework of the work will be considered as the signal-to-noise ratio (SNR) [14, 17].

In turn, the energy parameters of the useful signal are determined both by the technical capabilities of the paths for its formation and processing, and by the parameters of the target, in particular, by the size of its effective scattering surface (ESS) [22].

Substantiation of radar parameters for UAV detection

The difficulty of detecting small-sized UAVs is primarily due not only to the small value of their ESS [23], but also to their rather small geometric dimensions. Therefore, an important point in the development of detectors is the choice of the wavelength of the transmitter signal, carried out taking into account the provision of the following requirements for the radar system [23–26]:

- the maximum range of the radar, which decreases with increasing frequency as a result of an increase in the attenuation of radio wave energy in the real atmosphere;
- resolution in terms of angular coordinates and the error of their measurement, which is determined by the width of the radiation pattern, the geometric dimensions of the antenna, and improves with increasing frequency, i.e. with shortening of the wavelength;
- probability of detection, depending on the range, sensitivity of the radar receiver, SNR at the receiving point, as well as the method of processing the burst of pulses.

It should be taken into account that since the main parameter of the detected object is its effective scattering surface [23], the maximum geometric dimensions of the object of detection should be at least 16 times greater than the radar wavelength.

Then, for small UAVs of the Phantom 3 type, see Fig. 2, the value of λ will be $\lambda = \frac{\sqrt{0.3^2 + 0.3^2}}{16} \approx 0.025$ m.

Note that the calculated value of λ corresponds to a frequency of $f[\text{MHz}] = \frac{300}{0.025 [\text{meter}]} = 12000$ MHz (12 GHz), which belongs to the so-called X-band.



Fig. 2. General View of a Small-Sized Phantom 3 UAV

As already noted, the energy parameters of the detected signal are determined by the ESS of the target, which characterizes the ratio of the power density reflected from the small-sized UAV to that incident on it, in the process of irradiating it from the side of the radar [25, 27].

Theoretically, the ESS value can only be calculated for simple geometric shapes made of a homogeneous conductive material. For other objects, the ESS is de-

termined experimentally by irradiating them in an anechoic chamber. It should be understood that the value of the ESS of the same object will be different depending on the range of the radar. So for the X-band ESS of a small-sized Phantom 3 UAV, according to [23] is $\sigma = 0.06$ m².

Then, knowing the radar parameters and the ESS value of a small UAV, it is possible to calculate its detection range, which will be determined by the formula [19, 27]:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P G^2 \sigma \lambda^2 q}{P_{\min} (4\pi)^3}}, \quad (9)$$

where $P_{\min}$ is the threshold sensitivity of the receiving device; G is the antenna gain (provided that one system works for reception and transmission); σ is the ESS of the target (small UAV); q is the SNR; λ is the radar wavelength.

On Fig. 3 shows graphs of the function $R(q)$ for various values of the sensitivity of the radar receiver $P_{\min} = 10^{-14}$; 10^{-12} W.

An analysis of the presented results shows that a detection range of the order of 2 km is actually not achievable for radars whose receiver sensitivity is worse than 1×10^{-14} . The results are obtained for the conditions: $P = 200$ W; $G = 23$ dB; and $\lambda = 2.5$ cm.

Graphs in Fig. 3 are built for the upper part of the X-band, it should be understood that reducing the frequency provides a reduction in attenuation in free space. But at the same time, the ESS of the object also decreases.

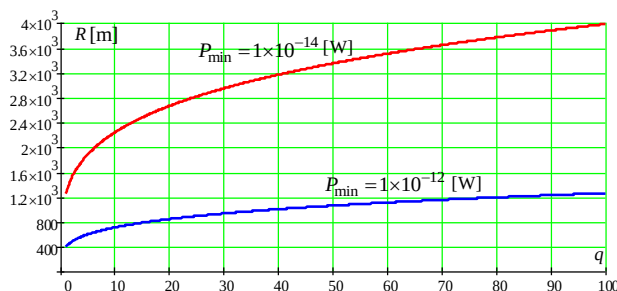


Fig. 3. Dependence of the Detection Range of Small UAVs on the SNR at Different Values of the Radar Sensitivity

So, the transition to the lower part of the X-band, i. e. the choice of $\lambda = 3.75$ cm will lead to a 1.5-fold decrease in the ESS of a small UAV, but the level of signal attenuation will also decrease. On Fig. 3 shows plots of $R(q)$ for $P_{\min} = 10^{-14}$ when operating in the upper and lower parts of the X-band, taking into account the 1.5-fold reduction in the ESS of a small UAV. On Fig. 4 points A and B show the level of detection range provided by the radar at $\lambda = 2.5$ cm and $\lambda = 3.75$ cm.

Note that the transition to the lower part makes it possible to increase the noise immunity of detection by 1.8 dB, which for the level $q = 6$ dB provides an increase in the range by 190 m.

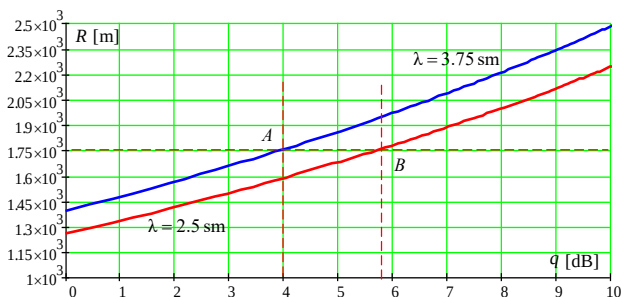


Fig. 4. Dependence of the Detection Range of a Small UAV on the SNR at Different Values of the Radar Wavelength

Quantitative assessments of UAV detection

To obtain quantitative estimates characterizing the detector of small UAVs with the considered parameters, we assume that the radar uses a single pulse for detection. Then the probability of correct detection as a function of SNR (measured when receiving one pulse) will be calculated as [27, 28]:

$$P_{\Pi 0} = \begin{cases} 0.5 [1 + \Phi(\sqrt{q} - u_0)] & \text{at } \sqrt{q} \geq u_0; \\ 0.5 [1 - \Phi(u_0 - \sqrt{q})] & \text{at } \sqrt{q} < u_0, \end{cases} \quad (10)$$

where $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$; q is the SNR; u_0 – detection threshold.

In this case, the value of the conditional false alarm probability α will be determined as [28]:

$$\alpha = \exp\left(-\frac{u_0^2}{2}\right). \quad (11)$$

On Figs. 5 and 6 show plots of $D(q)$ and $\alpha(u_0)$.

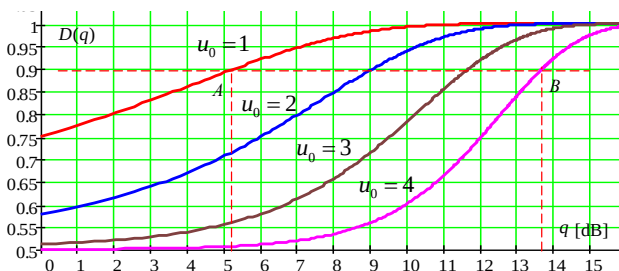


Fig. 5. Dependence of the Probability of Correct Detection of Small UAVs on the SNR for Different Values of the Decision Making Threshold

Analysis of the obtained results shows the following. The smaller the threshold value u_0 , the higher the detection probability for the same SNR value. On Fig. 5 shows points A and B corresponding to the level $D = 0.9$ at $u_0 = 1$ and $u_0 = 4$. And if in the first case the indicated detection was provided at an SNR of about 5.2 dB, then in the second case the SNR was 13.8 dB.

At the same time, it should be taken into account that the process of detecting small-sized UAVs should be carried out taking into account the minimization of the probability of false alarms.

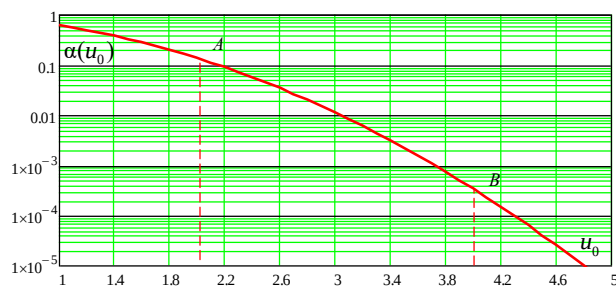


Fig. 6. Dependence of the Conditional False Alarm Probability on the Value of the Decision Threshold

So, according to the graph in Fig. 6, at $u_0 = 2$, the false alarm value reaches a value of the order of $\alpha = 0.105$ (point A in Fig. 6). And an acceptable result $\alpha = 2 \times 10^{-3}$ is provided only with $u_0 = 4$ (point B in Fig. 6).

Taking into account the results obtained, it seems interesting to combine the graphs in Figs. 3 and 5 in a single format SNR, see Fig. 7.

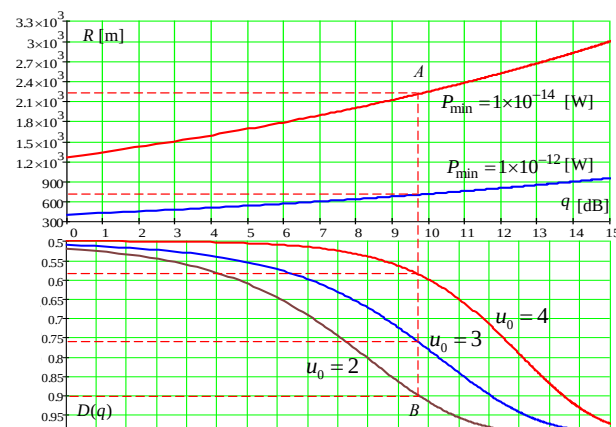


Fig. 7. Nomogram for Assessing the Capabilities of Small UAV Detectors

Let us define the result of graph matching as nomograms for estimating the detection range of small UAVs for a given probability of correct decision making and sensitivity of radar receivers.

So, for $D = 0.9$ (point B in Fig. 7), the detection range $R = 2.3$ km (point A in Fig. 6) will be possible only if the SNR in the channel is about 9.8 dB and the sensitivity of the radar receiver is $P_{\min} = 10^{-14}$ W.

A further increase in the efficiency of the radar when detecting small UAVs is associated with the implementation of the signal in the form of a burst of pulses [19]. When small-sized UAVs move even at a speed of 100 m/s and linear dimensions of 0.3 m, the burst duration should not exceed 15–30 ms. Then, to ensure the pulse power equal to at least $E = 6$ mJ with a total radar power of 200 W, the pulse duration should be $\tau = 2.5$ ms. Therefore, for a duty cycle equal to $Q = 2$, there will be no more than 4 pulses in a burst.

The dependence of the probability of correct detection of small UAVs on the SNR under the conditions of processing single pulses and a burst of four pulses is shown in Fig. 8.

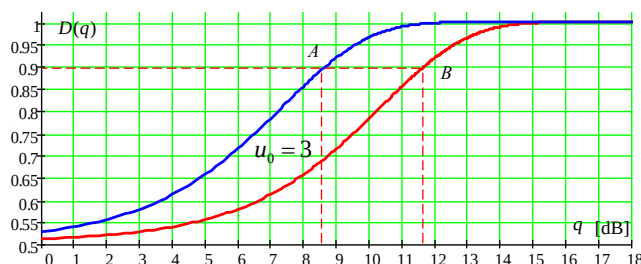


Fig. 8. Dependence of the Probability of Correct Detection of Small-Sized UAVs on SNR with Coherent Accumulation of 4 Pulses (Point A) and with Processing of one Pulse (Point B)

The results obtained allow us to conclude that for a burst containing only four pulses, incoherent processing will not bring a significant effect. Coherent accumulation in the case of receiving all pulses will provide an increase in noise immunity by about 2.5 dB, see Fig. 8.

Conclusion

Conducted studies to address the issues of detection of small-sized UAVs have shown that the main problems are associated with their low effective dispersion surface. Considering that the effectiveness of radars is determined not only by their technical characteristics, but also by the channel and target parameters, it is proposed to use nomograms to assess the detection capabilities of small UAVs, which allow for a given SNR level to determine the probability of correct detection, depending on the sensitivity of the radar receiver.

A further increase in the detection efficiency of small-sized UAVs can be associated with an increase in the radar power, the gain of antenna systems, an improvement in the sensitivity of the receiving path, a transition to a higher frequency range, and the use of joint time-frequency analysis methods presented in [29–31].

References

1. Titkov O.S. Payload of some small UAVs. *Aviatsionnye sistemy*. 2018;3:33–36.
2. Pavlovich A.V., Krukova N.A., Efremov V.V. Model of the Using Little Dimensioned Unmanned Aircraft Systems for the Reason Ecological Monitoring. *Informatsionnye tekhnologii v stroitelnykh sotsialnykh i ekonomicheskikh sistemakh*. 2020;4(22):20–24.
3. Sidortsov I.A., Podstrigaev A.S. Review of methods of illegal use of commercial unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the XXXV International Scientific and Practical Conference on Young researcher: Challenges and Prospects, 12–22 June 2017, Moscow, Russia, vol.10(35)*. Moscow: Internauka Publ.; 2017. p.367–374.
4. Aleshina-Alekseeva E.N. The Role of Remotely Piloted Aircraft in Administrative Violation and Offense. *Managing of activities to ensure road safety: state, problems, ways of improvement*. 2021;1(4):21–23.
5. Pakhomov M.E., Zueva M.A. Review of means of combating multicopters used for terrorist purposes. *Topical Issues of Theory and Practice in the Activities of Police Units. Materials of Intradepartmental Scientific-Practical Conference*. 2018:63–66.
6. Kostromitsky S.M., Nefedov D.S. Estimation of the Energy Gain when Detecting Small-Sized Targets by the "Track-Before-Detect" Method. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey"*. 2022;3:67–78.
7. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V. Design of Spectral-Efficient Signal Construction in Radio Data Transmission Control and Measuring Complexes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017;60(3):221–228. DOI:10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228
8. Arkhipov V.L., Chebotaryov A.N., Kurilov A.V. A Model of the Intruder of Air Space Over an Important State Facility Protected by the Russian National Guard's Troops. *Voennaia mysl*. 2017;3:54–58.
9. Dvornikov S.V. Time-Varying Process Detection Method Based on Spectrum Character Multiplication with an Automatic Identification Threshold. *Nauchnoe priborostroenie*. 2004;4:92–97.
10. Kurysev K.N. Some Problems of the Fight against Unmanned Aerial Vehicles in the Conditions of the Penal System: Features and Methods of Counteraction. *Penitentsiarnoe pravo iuridicheskaya teoriya i pravoprimeritelnaia praktika*. 2022;1(31):125–128.
11. Kolchevskay M.N., Krivosheev P.D., Kolchevskay I.N., Malakhovsky E.A., Petrov P.V., Kolchevsky N.N. Application of Quadcopter Phantom 3 as a Measuring Laboratory. *Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT*. 2019;12-3:22–28.
12. Makarenko S.I. *Counteraction to Unmanned Aerial Vehicles*. St. Petersburg: Science-intensive technologies Publ.; 2020. 204 p.
13. Makarenko S.I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Control systems, communications and security*. 2016;2:73–132. DOI:10.24411/2410-9916-2016-10204
14. Antonov I.K., Zhukov M.N. Models of signals and interference in a multi-beam radar when detecting unmanned aerial vehicles. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2022;76(3):55–61.
15. Markovich I.I., Panychev A.I., Zavtur E.E. Digital Signal Processing in a Passive Multi-Position Radar, Created on the Basis of the UAV Grouping. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022;1(225):6–17. DOI:10.18522/2311-3103-2022-1-6-17
16. Vovshin B.M., Khitrov A.V. Spatio-temporal signal processing in MIMO radar with antenna arrays. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoi oborony*. 2021;3(31):45–56.
17. Dvornikov S.V., Kryachko A.F., Pshenichnikov A.V. Research of Radio Engineering Systems in Conflict Situations of Cognitive Character. *Proceedings of the XXII International Scientific Conference on Wave Electronics and Infocommunication Systems, 03–07 June, St. Petersburg, Russia, part 2*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2019. p.84–89.
18. Pankratov V.A., Tverskaya E.S. Bayesian decision theory as a basis for the statistical theory of pattern recognition. *Modern European Researches*. 2022;2-1:102–107.

19. Lavrov A.A., Antonov I.K., Kasaikin A.A., Ovchinnikov V.G., Ogorodnikov M.S. Experimental studies of the radar method for detecting a small air target with long-term coherent signal accumulation. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2022; 76(3):27–38. DOI:10.18127/j00338486-202008(16)-06
20. Antonov I.K., Zhukov M.N., Nenashev A.S., Chernov S.A. Method of Requirements Justification for Receive Path of Multi-Beam Radar during Detection of Stealth Aerial Targets. *Informatsionno-izmeritelnye i upravliaiushchie sistemy*. 2017;15(4):56–63.
21. Simonov A.N., Volkov R.V., Dvornikov S.V. *Fundamentals of Construction and Operation of Goniometric Systems for Coordinate Measurement of Radio Emission Sources*. St. Petersburg: VAS Publ.; 2017. 248 p.
22. Ryabchenko V.Yu., Paslyon V.V. Research of Ways of Reduction the Radar Cross-Section Radiotechnical Objects. *Bulletin of the Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2018;2:27–33.
23. Parnes M. Calculation of the Effective Scattering Surface of Small Objects. *SVCH elektronika*. 2017;2(3):22–24.
24. Voznyuk M.A., Dvornikov S.V., Vinokurov M.E., Petrosyan A.P., Romanenko P.G. Operation of radio communication lines with frequency hopping under conditions of intentional interference. *Information Technologies*. 2012;10:64–67.
25. Tolstukha Y.E., Dvornikov A.S., Golik A.M., Ustinov A.A., Dvornikov S.V., Torgaev O.A. Justification of Requirements for Radars from the Position of Estimating the Differences Coefficient. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniia*. 202;3:101–107.
26. Viktorov D.S., Plastinina E.V., Samovolina E.V. Justification of requirements for digital signal synthesizers for various types of radar. *Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics*. 2020;4:43–55. DOI:10.26456/vtpmk604
27. Dvornikov S.V. Time-Varying Process Detection Method Based on Spectrum Character Multiplication with an Automatic Identification Threshold. *Nauchnoe priborostroenie*. 2004;14(4):92–97.
28. Andreev M.Ya., Gubarev A.V., Ochrimenko S.N., Parshukov V.N., Rubanov I.L. Estimation Calculus of Probability by False Alarm Under Integration Information Systems of Underwater Searching by Surface Ship. *Sensors and systems*. 2019;9(239): 37–39.
29. Dvornikov S.V., Zheleznyak V.K., Komarov V.F., Khramov R.N. A method for detecting radio signals based on processing their frequency-time distributions of energy density. *Information and space*. 2005;4:13–16.
30. Dvornikov S. Theoretical Foundations of the Synthesis of Bilinear Energy Distributions of Nonstationary Processes in the Frequency-Temporary Space: Review. *Proc. of Telecommun. Univ*. 2018;4(1):47–60.
31. Belov S.P., Serdyukov V.S., Belov A.S., Skobchenko E.V. On the formation and processing of complex channel signals based on time-frequency matrices. *Economics. Information Technologies*. 2023;50(1):211–218. DOI:10.52575/2687-0932-2023-50-1-211-2186

Список источников

1. Титков О.С. Полезная нагрузка некоторых малоразмерных БЛА // *Авиационные системы*. 2018. № 3. С. 33–36.
2. Павлович А.В., Крюкова Н.А., Ефремов В.В. Модель применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с целью экологического мониторинга // *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. 2020. № 4(22). С. 20–24.
3. Сидорцов И.А., Подстригаев А.С. Обзор способов противоправного применения коммерческих беспилотных летательных аппаратов // XXXV международная научно-практическая конференция «Молодой исследователь: вызовы и перспективы» (Москва, Россия, 12–22 июня 2017). М.: ООО «Интернаука», 2017. Т. 10(35). С. 367–374.
4. Алешина-Алексеева Е.Н. Беспилотные летательные аппараты: их роль при административном правонарушении и преступлении // *Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования*. 2021. № 1(4). С. 21–23.
5. Пахомов М.Е., Зуева М.А. Обзор средств борьбы с мультикоптерами, используемыми в террористических целях // *Актуальные вопросы теории и практики в деятельности подразделений полиции. Материалы внутриведомственной научно-практической конференции*. 2018. С. 63–66.
6. Костромицкий С.М., Нефедов Д.С. Оценка энергетического выигрыша при обнаружении малоразмерных целей методом «Сопровождение до обнаружения» // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2022. № 3. С. 67–78.
7. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 3. С. 221–228. DOI:10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228
8. Архипов В.Л., Чеботарев А.Н., Курилов А.В. Модель нарушителя воздушного пространства важного государственного объекта, охраняемого войсками национальной гвардии России // *Военная мысль*. 2017. № 3. С. 54–58.
9. Дворников С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // *Научное приборостроение*. 2004. Т. 14. № 4. С. 92–97.
10. Курьесев К.Н. Некоторые проблемы борьбы с беспилотными летательными аппаратами в условиях уголовно-исполнительной системы: особенности и способы противодействия // *Пенитенциарное право: юридическая теория и правоприменительная практика*. 2022. № 1(31). С. 125–128.
11. Кольчевская М.Н., Кривошеев П.Д., Кольчевская И.Н., Малаховский Е.А., Петров П.В., Кольчевский Н.Н. Применение квадрокоптера Phantom 3 в качестве измерительной лаборатории // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2019. Т. 12-3. С. 22–28.
12. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. СПб.: Издательство «Наукоемкие технологии», 2020. 204 с.
13. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // *Системы управления, связи и безопасности*. 2016. № 2. С. 73–132. DOI:10.24411/2410-9916-2016-10204
14. Антонов И.К., Жуков М.Н. Модели сигналов и помех в многолучевом радиолокаторе при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2022. Т. 76. № 3. С. 55–61.

15. Маркович И.И., Паньчев А.И., Завтур Е.Е. Цифровая обработка сигналов в пассивной многопозиционной РЛС, созданной на базе группировки БЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1(225). С. 6–17. DOI:10.18522/2311-3103-2022-1-6-17
16. Вовшин Б.М., Хитров А.В. Пространственно-временная обработка сигналов в ММО РЛС с антенными решётками // Вестник воздушно-космической обороны. 2021. № 3(31). С. 45–56.
17. Дворников С.В., Крячко А.Ф., Пшеничников А.В. Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера // XXII Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, Россия, 03–07 июня 2019). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. Ч. 2. С. 84–89.
18. Панкратов В.А., Тверская Е.С. Байесовская теория принятия решений как основа статистической теории распознавания образов // Modern European Researches. 2021. № 2-1. С. 102–107.
19. Лавров А.А., Антонов И.К., Касаикин А.А., Овчинников В.Г., Огородников М.С. Экспериментальные исследования радиолокационного метода обнаружения малоразмерной воздушной цели при длительном когерентном накоплении сигнала // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 3. С. 27–38. DOI:10.18127/j00338486-202008(16)-06
20. Антонов И.К., Жуков М.Н., Ненашев А.С., Чернов С.А. Методика обоснования требований к характеристикам приемного канала в многолучевом радиолокаторе при обнаружении малозаметных воздушных целей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. Т. 15. № 4. С. 56–63.
21. Симонов А.Н., Волков Р.В., Дворников С.В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений. СПб.: ВАС, 2017. 248 с.
22. Рябченко В.Ю., Паслён В.В. Обзор способов уменьшения эффективной поверхности рассеивания радиотехнических объектов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2018. № 2. С. 27–33.
23. Парнес М. Расчет эффективной поверхности рассеяния малых объектов // СВЧ электроника. 2017. № 2(3). С. 22–24.
24. Вознюк М.А., Дворников С.В., Винокуров М.Е., Петросян А.П., Романенко П.Г. Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех // Информационные технологии. 2012. № 10. С. 64–67.
25. Толстуха Ю.Е., Дворников А.С., Голик А.М., Устинов А.А., Дворников С.В., Таргаев О.А. и др. Обоснование требований к РЛС с позиций оценки коэффициента различимости // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. № 3. С. 101–107.
26. Викторов Д.С., Пластинина Е.В., Пластинина Е.В. Обоснование требований к цифровым синтезаторам сигналов для различных типов РЛС // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2020. № 4. С. 43–55. DOI:10.26456/vtprmk604
27. Дворников С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // Научное приборостроение. 2004. Т. 14. № 4. С. 92–97.
28. Андреев М.Я., Губарев А.В., Охрименко С.Н., Паршуков В.Н., Рубанов И.Л. Оценка вероятности ложной тревоги обнаружения цели при интеграции информационных систем подводного наблюдения надводного корабля // Датчики и системы. 2019. № 9(239). С. 37–39.
29. Дворников С.В., Железняк В.К., Комарович В.Ф., Храмов Р.Н. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии // Информация и космос. 2005. № 4. С. 13–16.
30. Дворников С.В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений энергии нестационарных процессов в частотно-временном пространстве (обзор) // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 47–60.
31. Белов С.П., Сердюков В.С., Белов А.С., Скобченко Е.В. О формировании и обработке сложных канальных сигналов на основе частотно-временных матриц // Экономика. Информатика. 2023. Т. 50. № 1. С. 211–218. DOI:10.52575/2687-0932-2023-50-1-211-218

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 14.08.2023; принята к публикации 24.08.2023.

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 14.08.2023; accepted for publication 24.08.2023.

Информация об авторах:

ДВОРНИКОВ
Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, научный сотрудник научно-исследовательского отдела Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0001-7426-6475>

ДВОРНИКОВ
Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2), Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

**2.2.6 – Оптические
и оптико-электронные приборы
и комплексы**

**2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения**

**2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства
и их технологии**

**2.2.15 – Системы, сети и устройства
телекоммуникаций**

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Научная статья

УДК 621.382

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20



Исследования свойств микроизгиба одномодового оптического волокна

Иван Романович Гулаков, gulakov@bsu.by

Андрей Олегович Зеневич, a.zenevich@bsac.by

Татьяна Александровна Матковская✉, t.matkovskaya@bsac.by

Евгений Владимирович Новиков, e.novikov@bsac.by

Белорусская государственная академия связи,
Минск, 220114, Республика Беларусь

Аннотация: Работа посвящена исследованию свойств микроизгиба оптического волокна. Показано, что увеличение диаметра микроизгиба при неизменном усилии в области его формирования приводило к росту мощности оптического излучения, выводимого из волокна в области микроизгиба. Установлено, что наименьшая величина ответвляемой в области микроизгиба мощности оптического излучения и наименьшая величина потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдается для оптического волокна G657. Наибольшее значение величины ответвляемой в области микроизгиба мощности излучения и наибольшее значение величины потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдается для оптического волокна G655. Результаты статьи могут найти применение в системах защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи.

Ключевые слова: микроизгиб, свойства микроизгиба, оптическое волокно, канал утечки информации, информационная безопасность

Ссылка для цитирования: Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Матковская Т.А., Новиков Е.В. Исследование свойств микроизгиба одномодового оптического волокна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 15–20. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20

Investigations of Single-Mode Optical Fiber Microbending Properties

Ivan Gulakov, gulakov@bsu.by

Andrey Zenevich, a.zenevich@bsac.by

Tatiana Matkovskaia✉, t.matkovskaya@bsac.by

Evgeniy Novikov, e.novikov@bsac.by

Belarusian State Academy of Communications,
Minsk, 220114, Republic of Belarus

Abstract: This research is devoted to the study of the properties of the microbending of an optical fiber. It is shown that an increase in the diameter of a microbend at a constant force in the area of its formation led to an increase in the power of optical radiation output from the fiber in the area of the microbend. It has been established that the smallest value of the optical radiation power branched in the microbending region and the smallest value of the radiation power loss at the microbending for the entire range of wavelengths under study is observed for the G657 optical fiber. The largest value of the radiation power branched off in the microbending region and the largest value of the radiation power loss at the microbending for the entire range of wavelengths under study is observed for the G655 optical fiber. The results of the article can be used in systems for protecting information transmitted over fiber-optic communication lines.

Keywords: *microbending, microbending properties, optical fiber, information leakage channel, information security*

For citation: Gulakov I., Zenevich A., Matkovskaya T., Novikov E. Investigations of Single-Mode Optical Fiber Microbending Properties. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):15–20. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20

Введение

Для передачи информации широко используются волоконно-оптические линии связи. В таких линиях связи информационные сигналы распространяются внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой [1–3]. Несмотря на наличие защитной оболочки, существуют различные способы формирования каналов утечки информации из оптического волокна [4]. Одним из таких способов является формирование макроизгибов оптического волокна [5, 6].

Макроизгиб представляет собой любое макроскопическое отклонение оси оптического волокна от прямой линии [7]. Радиус макроизгиба $R_{\text{мак}}$ значительно больше диаметра оптического волокна (как правило $R_{\text{мак}} \geq 2$ мм). К примеру, макроизгиб можно получить, согнув оптическое волокно вокруг цилиндрической поверхности. В области макроизгиба с боковой поверхности волокна наблюдается выход сигнального оптического излучения за пределы волокна. Для регистрации этого излучения достаточно использовать доступные оптико-электронные конвертеры и компьютер. Такой способ организации утечки передаваемой по оптическому волокну информации прост в реализации и получил достаточно широкое распространение.

Другим способом организации утечки передаваемой по оптическому волокну информации является создание микроизгибов оптического волокна. При этом количественные критерии параметров отводимой мощности оптического излучения и элементов изгиба оптического волокна, которые определяют возможность отвода излучения к фотоприемникам несанкционированного пользователя, в литературе рассмотрен недостаточно.

Под микроизгибом понимается резкое изменение кривизны оптического волокна, представляющее локальное осевое смещение порядка нескольких микрометров [8]. Микроизгиб отличается от макроизгиба тем, что радиус микроизгиба $R_{\text{мик}}$ меньше диаметра оптического волокна.

Микроизгибы возникают при производстве оптического волокна, а также при производстве и прокладке оптического кабеля. Они могут быть обусловлены волнистостью поверхности сердцевины и оболочки, появляться в результате температурных расширений и сжатий непосредственно волокна и защитных покрытий, в процессе изготовления из волокон кабеля и наложения защитного покрытия, из-за дефектов в защитном покрытии, таких как пу-

стоты, микротрещины, частицы примесей, неоднородности покрывающего материала. При наматывании волокна с увеличенным натяжением проявление дефектов имеет тенденцию увеличиваться. Причиной микроизгибов может стать наматывание оптического волокна на предметы с грубой поверхностью. Микроизгибы появляются в тех случаях, когда оптическое волокно располагается в ограниченном пространстве и его необходимо наматывать на катушку малого диаметра [9–11].

Сформировать микроизгиб достаточно просто путем воздействия на волокно с определенным усилием предметом небольших размеров. В результате в области микроизгиба наблюдается выход оптического излучения, несущего информационный сигнал с боковой поверхности волокна, за его пределы. Такой способ формирования канала утечки также является достаточно простым в реализации.

Кроме этого, при формировании канала съема информации с помощью макроизгиба покидающее волокно оптическое излучение рассредоточено вдоль всей его области и полностью собрать это излучение для регистрации не удастся. Напротив, для микроизгиба, имеющего малые размеры, покидающее волокно оптическое излучение сосредоточено в малой области волокна и легко может быть практически полностью собрано и зарегистрировано. Поэтому формирование канала утечки информации при помощи микроизгиба предпочтительно по сравнению с созданием такого канала на основе макроизгиба.

Для проектирования систем обнаружения микроизгибов оптического волокна необходимо знать их характеристики. Одними из наиболее важных характеристик микроизгиба являются вносимые ими дополнительные потери мощности излучения в оптическом волокне и уровень мощности оптического сигнала, отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба. Первое из этих свойств определяет возможность обнаружения факта наличия канала утечки информации. Второе определяет возможность использования микроизгиба для съема данных посредством такого канала утечки. Однако данные свойства микроизгиба оптического волокна в настоящее время практически не исследованы. Поэтому целью настоящей работы является определение этих свойств микроизгиба оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна G652, G655 и G657, поскольку они достаточно часто применяются в оптических кабелях. На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментальной установки для проведения исследования свойств микроизгиба. На схеме введены следующие обозначения: ИИ – источник излучения; ОВ – оптическое волокно; ИМ – измеритель мощности; МИ – микроизгиб; ПР – проволока; П1, П2 – текстолитовые пластины; ГР1, ГР2 – грузы; Д – диафрагма; ФД – фотоприемник; А – амперметр; В – вольтметр; ИП – источник питания, R_n – резистор нагрузки.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом: от источника излучения в оптическое волокно вводится оптическое излучение. В процессе исследования существовала возможность направить в волокно излучение следующих длин волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Такие длины волн были выбраны, поскольку они соответствуют «окнам прозрачности» одномодового оптического волокна и на них осуществляется передача информации [1–3].

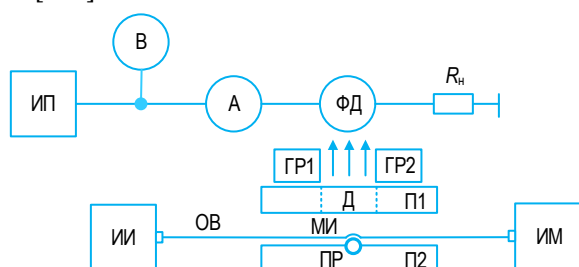


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block Diagram of the Experimental Setup

Мощность вводимого в волокно оптического излучения для всех длин волн была одинаковой и составляла 1 мВт. Такая мощность излучения наиболее часто используется в передатчиках информации волоконно-оптических линий связи [12].

К выходу волокна ОВ подключен измеритель мощности излучения. Длина оптического волокна составляет 1 м, что позволяет пренебречь потерей мощности оптического излучения в волокне на исследуемых длинах волн, так как потеря мощности в этих волокнах на всех исследуемых длинах волн не превышала 0,4 дБ/км.

Волокно подключалось к измерителю мощности излучения и источнику ИИ при помощи отрезков оптического волокна, оконцованных разъемами FC. Источник оптического излучения и измеритель мощности входят в состав оптического тестера ОТ-3-1, поверенного и откалиброванного перед проведением измерений.

Измерения потери мощности излучения на микроизгибе выполнялись на основе метода вносимых

потерь, определенного стандартом ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012, с учетом других требований этого стандарта. Отметим, что дистанция установления модового равновесия для исследуемых ОВ и разъёмных соединений FC не превышала 0,1 мм [13].

На волокне ОВ формируется микроизгиб. Для формирования микроизгиба использовалась медная проволока с диаметрами от 100 до 200 мкм. Выбор диаметров проволоки определялся тем, что при диаметрах больших 200 мкм происходил излом оптического волокна, а при меньших 100 мкм потеря мощности излучения на микроизгибе практически отсутствовала.

Место формирования микроизгиба располагалось в середине используемого отрезка волокна. Отметим, что в контрольных измерениях использовались отрезки волокна в 5 и 10 м, при этом результаты совпадали в пределах погрешности измерительной аппаратуры.

При формировании изгиба медная проволока располагалась перпендикулярно волокну ОВ. Проволока вдавливалась в волокно ОВ при помощи двух сжимаемых с определенным усилием пластин П1 и П2, как это показано на рисунке 1.

Усилие, которым осуществлялось формирование микроизгиба на волокне, создавалось при помощи грузов ГР1 и ГР2. Грузы располагались на верхней пластине П1, при этом нижняя пластина П2 располагалась на горизонтальной твердой поверхности (см. рисунок 1). Общая масса грузов оставалась постоянной и равной $m = 1,25$ кг. Величина m была подобрана таким образом, чтобы она соответствовала минимальному усилию, при котором наблюдается выход оптического излучения за пределы волокна в области микроизгиба для всех исследуемых оптических волокон, длин волн и диаметров проволоки. Для меньших значений массы не удавалось зафиксировать выход излучения за пределы волокна G657 в области микроизгиба. При больших значениях массы возникал излом волокна при формировании микроизгиба проволокой толщиной 200 мкм.

В верхней пластине П1 установлена диафрагма, напротив которой с одной стороны располагался микроизгиб, а с другой – фотоприемник. В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод ФД-110ГА, примененный ввиду того, что он чувствителен к оптическому излучению исследуемых длин волн.

На фотоприемник подается напряжение обратного смещения U_n от источника постоянного напряжения. Величина напряжения обратного смещения контролируется при помощи вольтметра. Амперметр используется для измерения электрического тока, протекающего через фотоприемник. Для ограничения величины тока, протекающего через фотоприемник, применяется резистор

нагрузки, который включен последовательно с фотоприемником. Величина сопротивления резистора нагрузки равна $R_n = 1$ кОм.

При проведении исследований определяется фототок фотоприемника (I_Φ). Для этого измеряются величины электрического тока I_T и I , протекающего через фотоприемник в отсутствии оптического излучения в волокне и при его наличии, соответственно. Величина I_T измеряется при закрытой диафрагме, а значение I – при открытой. Фототок вычисляется по формуле: $I_\Phi = I - I_T$.

По величине фототока определялась мощность оптического излучения, поступающего от микроизгиба на фотоприемник: $P_\Phi = I_\Phi / S$, где S – чувствительность фотоприемника.

При проведении экспериментальных исследований определялись дополнительно вносимые потери мощности излучения D_n и уровень мощности оптического сигнала, отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба D_b . Величина D_n определяется по выражению [14]:

$$D_n = 10 \lg \left(\frac{P_b}{P} \right), \quad (1)$$

где P – мощность ИИ; P_b – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ.

Уровень мощности оптического сигнала D_b , отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба, вычисляется по выражению:

$$D_b = 10 \lg \left(\frac{I_\Phi / S}{P} \right). \quad (2)$$

Исследования выполнялись при температуре окружающей среды $T = 293$ К.

Результаты измерений и их обсуждение

В процессе калибровки установки было определено напряжение обратного смещения фотоприемника, соответствующее максимуму его чувствительности. Дальнейшие измерения выполнялись при этом напряжении. Характеристики фотоприемника представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики фотоприемника

TABLE 1. Characteristics of the Photodetector

Напряжение питания, В	Длина волны, нм	Чувствительность, А/Вт
19	1310	0,13
	1490	0,16
	1550	0,15
	1625	0,03

В процессе исследования установлены зависимости величины D_n от диаметра формирующей микроизгиб проволоки d . Зависимости D_n от d для оптического волокна G655 представлены на рисунке 2. Для других оптических волокон эти зави-

симости были аналогичными. Как видно из полученных зависимостей, увеличение диаметра проволоки, формирующей микроизгиб, приводило к уменьшению величины D_n , а значит – росту потери мощности оптического излучения на микроизгибе.

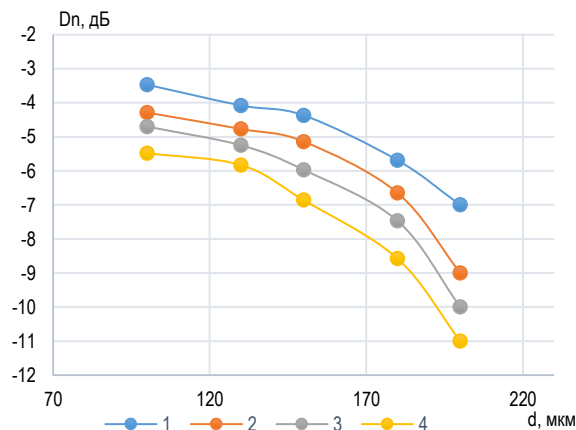


Рис. 2. Зависимость потери мощности на микроизгибе от диаметра микроизгиба для ОВ G655 для разных длин волн: 1 – 1310 нм; 2 – 1490 нм; 3 – 1550 нм; 4 – 1625 нм

Fig. 2. Depends of Power loss on Microbending Diameter for OF G655 for Different Wavelengths: 1 – 1310 nm; 2 – 1490 nm; 3 – 1550 nm; 4 – 1625 nm

Такое поведение зависимости D_n от d связано с тем, что создание микроизгиба с большим диаметром приводит к сужению большей части сердцевины оптического волокна, чем для микроизгиба с меньшим d .

Для постоянного значения d с ростом длины волны наблюдалось уменьшение D_n . Таким образом, можно утверждать, что при неизменном диаметре микроизгиба и постоянной мощности оптического излучения большие потери мощности будут наблюдаться для излучения с большей длиной волны. Такое поведение зависимости D_n от d обусловлено тем, что происходит увеличение модового пятна оптического излучения и увеличение потерь мощности на микроизгибе.

Также в процессе проведенных исследований были установлены зависимости величины D_b от диаметра формирующей микроизгиб проволоки d . Зависимости D_b от d для исследуемых длин волн (1 – 1310 нм, 2 – 1490 нм, 3 – 1550 нм, 4 – 1625 нм) и оптического волокна G655 представлены на рисунке 3. Для других оптических волокон эти зависимости были аналогичными. Как видно из полученных зависимостей, увеличение диаметра микроизгиба приводило к росту величины D_b , а значит – к увеличению мощности оптического излучения, ответвляемой с микроизгиба. Такое поведение зависимости D_b от d связано с тем, что создание микроизгиба с большим диаметром, как было отмечено ранее, приводит к сужению большей части сердцевины оптического волокна, чем для микроизгиба с меньшим d .

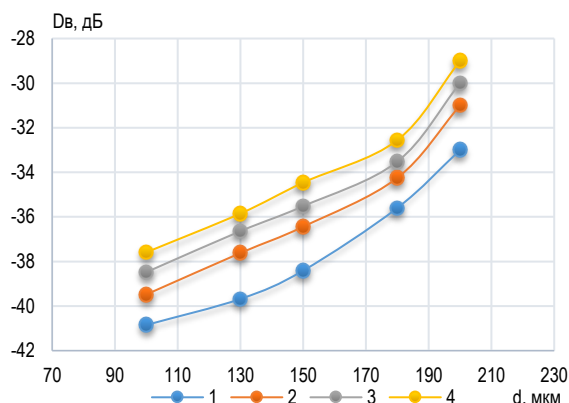


Рис. 3. Зависимость уровня мощности оптического сигнала, отводимого за пределы волокна в области микроизгиба, от диаметра изгиба

Fig. 3. Dependence of the Power Level of the Optical Signal Removed Outside the Fiber in the Microbend Region on the Bend Diameter

В связи с этим большая часть мощности оптического излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна в области микроизгиба, переходит в оболочку, а после покидает волокно через ее боковую поверхность.

Для постоянного значения диаметра формирующей микроизгиб проволоки d с ростом длины волны наблюдался рост величины D_b . Таким образом, можно утверждать, что при неизменном диаметре микроизгиба и постоянной мощности оптического излучения ответвляется большая мощность для излучения с большей длиной волны. Это связано с тем, что увеличение длины волны приводит к росту диаметра модового пятна, а значит, и его площади. Чем больше площадь модового пятна, тем большая часть распространяющегося по волокну излучения оказывается в оболочке оптического волокна. Затем это излучение покидает волокно через его боковую поверхность.

Такое поведение зависимости $D_b(d)$ наблюдалось и для макроизгибов: уменьшение диаметра приводило к росту величины D_b , а значит – к увеличению мощности оптического излучения, ответвляемой с макроизгиба [14].

В таблице 2 представлены значения D_n и D_b (в дБ) для наибольшего значения диаметра микроизгиба – 200 мкм из исследуемого диапазона d . Для

этого диаметра наблюдались наименьшие значения D_n и наибольшие значения D_b для всех исследуемых длин волн.

ТАБЛИЦА 2. Характеристики микроизгиба оптического волокна с диаметром 200 мкм

TABLE 2. Microbending Characteristics of Optical Fiber with a Diameter of 200 μm

Тип ОВ	Длина волны, нм							
	1310		1490		1550		1625	
	D_n	D_b	D_n	D_b	D_n	D_b	D_n	D_b
G652	-4	-34	-5	-32	-6	-31	-7	-30
G655	-8	-33	-9	-31	-10	-30	-11	-29
G657	-2	-35	-3	-33	-4	-32	-5	-31

Как следует из данных, представленных в таблице, наибольшее значение D_n и наименьшее D_b для всех исследуемых волн наблюдается для оптического волокна G657. Наименьшее значение D_n и наибольшее D_b для всех исследуемых волн наблюдается для оптического волокна G655.

Заключение

Установлено, что увеличение диаметра микроизгиба при неизменном деформирующем усилии в области его формирования приводило к росту мощности оптического излучения, ответвляемой с микроизгиба.

Показано, что наименьшая величина ответвляемой в области микроизгиба мощности оптического излучения и наименьшие потери мощности излучения на микроизгибе для всех исследуемых длин волн наблюдаются для оптического волокна G657.

Определено, что наибольшее значение ответвляемой в области микроизгиба мощности излучения и наибольшее значение потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдаются для оптического волокна G655.

Таким образом, из исследованных оптических волокон наименее уязвимым для несанкционированного доступа к передаваемой информации при использовании микроизгиба является волокно G657, а наиболее уязвимым – волокно G655.

Список источников

1. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
2. Govind P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 563 p.
3. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб.: Лань, 2021. 268 с.
4. Зеневич А.О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 142 с.
5. Стенина Т.А. Изучение влияния изгибов на оптическое волокно // Евразийский союз ученых. 2015. Т. 11. № 2. С. 70–73.
6. Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2003. 514 с.
7. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. Reference Guide to Fiber Optic Testing. Saint-Etienne: JDS Uniphase Corporation, 2011. 172 p.

8. ГОСТ IEC 60050-731-2017. Международный электротехнический словарь. Глава 731. Волоконно-оптическая связь. М: Стандартинформ, 2020. 41 с.
9. Tosco F. Technical Staff of CSELT: Fiber Optics Communication Handbook. 1990. PP. 241–246.
10. Unger C., Stocklein W. Investigation of the microbending sensitivity of fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1994. Vol. 12. Iss. 4. PP. 591–596. DOI:10.1109/50.285350
11. Малых Ю.В., Шубин В.В. Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*. 2016. № 1. С. 69–79.
12. Варава Н., Пронин С., Никоноров М. Приемные и передающие модули для ВОЛС, использующих пакетную передачу информации // *Первая миля*. 2018. № 5. С. 22–28. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.22.28
13. Шубин В.В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 257 с.
14. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового волокна при помощи кремниевое фотоумножителя // *Доклады БГУИР*. 2022. Т. 20. № 6. С. 37–44. DOI:10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44

References

1. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Fiber-Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2010. 576 p.
2. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002. 530 p.
3. Sklyarov O.K. *Fiber-optic networks and communication systems*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2021. 268 p.
4. Zenevich A.O. *Detectors of Information Leakage from Optical Fiber*. Minsk: Belarusian State Academy of Communications Publ.; 2017. 143 p.
5. Stenina T.A. Study of the influence of bends on optical fiber. *Eurasian Union of Scientists*. 2015;11(2):70–73.
6. Freeman R.L. *Fiber-optic communication systems*. Moscow: Technosfera Publ.; 2003. 514 p.
7. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. *Reference Guide to Fiber Optic Testing*. Saint-Etienne: JDS Uniphase Corporation; 2011. 172 p.
8. GOST IEC 60050-731-2017. *International Electrotechnical Dictionary. Chapter 731*. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. 41 p.
9. Tosco F. Technical Staff of CSELT: Fiber Optics Communication Handbook. 1990. p.241–246.
10. Unger C., Stocklein W. Investigation of the microbending sensitivity of fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 1994;12(4): 591–596. DOI:10.1109/50.285350
11. Malykh Yu.V., Shubin V.V. Method for calculating the efficiency of radiation transmission from the side surface of a curved single-mode optical fiber to a receiving optical device. *Questions of atomic science and technology. Series of mathematical modeling of physical processes*. 2016;1:69–79.
12. Varava N., Pronin S., Nikonov M. Receiving and transmitting modules for fiber-optic communication lines using packet data transfer. *First Mile*. 2018;5:22–28. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.22.28
13. Shubin V.V. *Information security of fiber-optic systems*. Sarov: All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ.; 2015. 257 p.
14. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaya T.A. Detection of an information leakage channel from a multimode fiber using a silicon photomultiplier. *Doklady BSUIR*. 2022;20(6):37–44. DOI:10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44

Статья поступила в редакцию 21.04.2023; одобрена после рецензирования 28.06.2023; принята к публикации 29.06.2023.

The article was submitted 21.04.2023; approved after reviewing 28.06.2023; accepted for publication 29.06.2023.

Информация об авторах:

ГУЛАКОВ
Иван Романович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>

ЗЕНЕВИЧ
Андрей Олегович

доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>

МАТКОВСКАЯ
Татьяна Александровна

аспирант кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-1499-6158>

НОВИКОВ
Евгений Владимирович

кандидат технических наук, доцент, директор Института современных технологий связи Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0009-0009-2944-758X>

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33



Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования

- ✉ Евгений Алексеевич Ищенко¹, kursk1998@yandex.ru
- Юрий Геннадьевич Пастернак¹, pasternakyg@mail.ru
- Владимир Андреевич Пендюрин², infonpp-acc.ru@yandex.ru
- Дмитрий Константинович Проскурин¹, pdk@vgasu.vrn.ru
- Сергей Михайлович Фёдоров¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, 394006, Российская Федерация

²АО НПП «Автоматизированные системы связи»,
Воронеж, 394062, Российская Федерация

Аннотация: В данной статье исследуется возможность использования схемотехнических форматов описания радиокомпонентов для применения в задачах электродинамического моделирования. Исследование проводилось на примере управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла для коммутации узлов, которого применялись SPICE-модели эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей. Также рассматривалась возможность использования альтернативного формата описания радиоэлектронных компонентов – Touchstone-файлы. Полученные результаты иллюстрируются графиками матриц рассеяния, а также эквивалентными схемами и SPICE-кодом. Полученные результаты могут быть востребованы при создании конструкций, совмещающих активные нелинейные радиокомпоненты и СВЧ-устройства.

Ключевые слова: эквивалентные схемы, SPICE, Touchstone, МЭМС-ключи, pin-диоды, метаматериал, электродинамическое моделирование

Ссылка для цитирования: Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Проскурин Д.К., Фёдоров С.М. Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 21–33. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33

Equivalent Circuits Application of Pin-Diodes and MEMS-Keys in Electrodynamic Modeling Problems

- ✉ Eugene Ishchenko¹, kursk1998@yandex.ru
- Yuri Pasternak¹, pasternakyg@mail.ru
- Vladimir Pendyurin², infonpp-acc.ru@yandex.ru
- Dmitriy Proskurin¹, pdk@vgasu.vrn.ru
- Sergey Fedorov¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Voronezh State Technical University,
Voronezh, 394006, Russian Federation

²Research and Development Enterprise “Automated Communication Systems”, JSC,
Voronezh, 394062, Russian Federation

Abstract: This article studies the possibility of using circuit formats to describe radio components in electrodynamic modeling problems. The study was carried out on the example of a controlled metamaterial in the form of an electromagnetic crystal with SPICE-models of equivalent circuits of pin-diodes and MEMS-keys. Also, the possibility of using Touchstone files as an alternative format for describing radio-electronic components was considered. The obtained results are illustrated by scatter matrix plots, as well as equivalent circuits and SPICE code. Obtained results can be used for the design of structures that combine active nonlinear radio components and microwave devices.

Keywords: equivalent circuits, SPICE, Touchstone, MEMS-switches, pin-diodes, metamaterial, electrodynamic simulation

For citation: Ishchenko E., Pasternak Yu., Pendyuein V., Proskurin D., Fedorov S. Equivalent Circuits Application of Pin-Diodes and MEMS-Keys in Electrodynamic Modeling Problems. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4): 21–33. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33

Введение

В современных СВЧ-устройствах и антеннах часто используются активные радиокомпоненты, которые позволяют обеспечить управление характеристиками электромагнитных волн. Чаще всего в таких задачах используются pin-диоды и микро-электромеханические системы (МЭМС). Однако при проведении исследований и разработки СВЧ-устройств часто используются методы электродинамического моделирования, поэтому возникает задача описания и использования pin-диодов и МЭМС-устройств в процессе моделирования всего устройства в целом. Большинство таких компонентов имеют два основных режима работы – включенный режим, когда обеспечивается замыкание цепи; и выключенный, когда реализуется максимальная изоляция. Для моделирования МЭМС-структур и pin-диодов на топологическом уровне применяются специальное программное обеспечение (ПО), которое несовместимо с ПО для электродинамического моделирования. Для разрешения этого несоответствия применяют эквивалентные схемы активных радиокомпонентов.

Существует исследование [1], в котором при моделировании вместо МЭМС-ключей используются сосредоточенные элементы. Однако авторы отмечают, что из-за сложности реализации модели и определения характеристик МЭМС-коммутатора схема была упрощена, чтобы обеспечить высокую скорость моделирования и определить базовые характеристики работы предложенной конструкции. В работе [2] авторы предлагают использовать pin-диоды для реализации активных антенн с возможностью управления характеристиками диаграммы направленности. В ходе моделирования была использована эквивалентная схема из сосредоточенных элементов, соответствующая pin-диоду в активном (включенном) режиме. При этом не приводится информации о том, как была описана модель и как учитывались характеристики pin-диода в выключенном режиме. В работе [3] применяется модель варикапа, которая заменяется емкостью, что приводит к снижению точности исследования, так как в варикапах, как и в любых радиодеталях при-

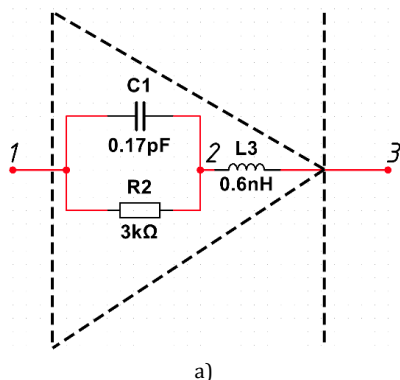
сутствуют паразитные эффекты, способные оказывать влияние на характеристики протекающих токов, а также электромагнитных волн. В работах [4, 5] авторы приводят подробные эквивалентные схемы pin-диодов для моделирования с последующим измерением параметров макета с установленными реальными pin-диодами. Результаты эксперимента подтверждают высокую точность и эффективность представленных эквивалентных схем для электродинамического моделирования активных СВЧ-устройств.

В данной работе представлено исследование возможности применения SPICE- и Touchstone-моделей (модель подразумевает описание радиокомпонента с учетом всех потерь и паразитных влияний на исследуемый объект) для электродинамического моделирования в DS CST Studio Suite 2023 управляемого метаматериала. Принцип работы метаматериала подробно описан в [6], но в общем он заключается в замыкании узлов электромагнитного кристалла для формирования отражающей поверхности и их размыкании для создания радио-прозрачной структуры.

Формирования SPICE- и Touchstone-моделей для задач электромагнитного моделирования

Рассмотрение форматов файлов моделей реальных электронных компонент начнем в хронологическом порядке их появления. Язык программирования для схем – SPICE (аббр. от англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) был разработан в Калифорнийском университете в Беркли в 1960-х гг. [7]. Особенностью данного языка является подробное описание эквивалентных схем с возможностью последующего математического моделирования. Базовым принципом построения SPICE-моделей является описание номиналов эквивалентных компонентов с привязкой к соединяющим узлам. Рассмотрим принцип построения SPICE-моделей, которые могут быть использованы в процессе моделирования и исследования различных схем. Для примера возьмем описание SPICE-модели pin-диода в выключенном режиме (рисунок 1), который приводится в работе [5]. Для описания

любой SPICE-модели требуется задать узлы, которые входят в схему для соединения компонентов. Отметим, что узел «0» всегда зарезервирован для заземления, а десятичные множители – в языке SPICE, согласно таблице 1.



a)

```
.SUBCKT PINDIODE OFF 1 3
C1 1 2 0.17PF
R2 1 2 3KOHMS
L3 2 3 0.6NH
.ENDS
```

b)

Рис. 1. Эквивалентная схема pin-диода (a) и его SPICE-код (b)

Fig. 1. Pin-Diode Equivalent Circuit (a) and its SPICE Code (b)

ТАБЛИЦА 1. Десятичные множители в языке SPICE

TABLE 1. Scale Factors of SPICE

Буква обозначения	Десятичный множитель	Приставка
T	10^{12} (e12)	Тера
G	10^9 (e9)	Гига
X или MEG	10^6 (e6)	Мега
K	10^3 (e3)	Кило
M	10^{-3} (e-3)	Милли
U	10^{-6} (e-6)	Микро
N	10^{-9} (e-9)	Нано
P	10^{-12} (e-12)	Пико
F	10^{-15} (e-15)	Фемто

Описание SPICE-модели (расширение файлов «.cir») всегда начинается с задания компонента с помощью команды «. SUBCKT». После этой команды, через табуляцию (TAB), следует название компонента или модели, а далее задаются номера входного (положительного) и выходного (отрицательного) контакта:

```
«. SUBCKT NAMECOMPONENTN+ N-»
```

Затем следует листинг описания всех эквивалентных элементов. Т. к. в нашем случае во всех задачах используются только пассивные компоненты, то будут приведены их описания, но важно отметить, что в SPICE могут быть описаны и активные компоненты (транзисторы, диоды и др.) [7].

Модель резистора имеет описание в виде:

```
«RNAME N1 N2 VALUE$OHMS»
```

Для удобства написания и последующей проверки схемы компонента рекомендуется делать сквозную нумерацию эквивалентных элементов, однако это не является обязательным, т. к. для SPICE приоритетными являются именно номера узлов ($N1$, $N2$) и номинал ($VALUE$; обозначения десятичных множителей (S) приведены в таблице 1).

Модель конденсатора имеет описание в виде:

```
«CNAME N+ N- VALUE$F<IC=INCOND>»
```

Особенностью описания конденсатора (и некоторых других элементов) является возможность задания начального значения напряжения или тока ($IC=INCOND$), но использование данной функции возможно только при описании полной активной схемы со строкой моделирования «. TRAN».

Модель индуктивности имеет описание в виде:

```
«LNAME N+ N- VALUE$H<IC=INCOND>»
```

Структура описания индуктивности является идентичной конденсатору. Стоит отметить, что указание названия величин не является обязательным (Омы – $OHMS$, Фарады – F , Генри – H), а для обозначения десятичного множителя может использоваться экспоненциальная запись (приводится во второй колонке таблицы 1 в скобках).

Завершается описание модели командой «. ENDS». Как и в любом языке программирования, в SPICE возможно внесение комментариев путем добавления знака «*» перед текстом. В качестве примеров SPICE-моделей далее будут приведены эквивалентные схемы pin-диодов и МЭМС-переключателей.

Из сказанного выше видно, что SPICE-модели представляют собой подробное описание радиоэлектронного компонента и позволяют создать его копию для последующего производства, что создает угрозу сохранению коммерческой тайны и экономическим интересам разработчика. По этой причине в 1984 г. Hewlett-Packard (HP) был предложен новый формат файлов описания радиоэлектронных компонент – Touchstone [8], который позже стал стандартом в векторных анализаторах цепей, а также в программном обеспечении Advanced Design System (компания Keysight). Развитием данного формата описания стали модели IBIS (аббр. от англ. Input/output Buffer Information Specification). По названию формата видно, что в таком файле описываются характеристики входных/выходных портов (коэффициенты отражения) и результаты работы компонента (коэффициенты передачи). Подобная запись позволяет держать в секрете конструкцию радиоэлектронного компонента, т. к. он представляется в виде «черного» ящика, преобразующего сигнал со

входа в некоторый сигнал на выходе. Touchstone-модель (расширение файла «.s2p») содержит информацию об одной выбранной волновой матрице СВЧ-компонента, частотах измерения, типах представления данных. Особенностью таких файлов является то, что они описываются только в определенном диапазоне частот, моделирование вне которого невозможно. Формат записи заголовка и начало описания Touchstone-модели приводится в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Описание файла Touchstone

TABLE 2. Description of the Touchstone File

Стартовая строка Touchstone-модели имеет вид:		
#	< frequency unit>	<parameter> <format> R <n>
Функция в файле .s2p	Обозначение	Виды и описание
Строки комментариев	!	Возможно указание служебной или иной информации, которая не используется
Начало главной строки и считывания файла	#	Обозначает первую строку, которую начинает анализировать ПО
< frequency unit>	GHz MHz KHz Hz	Обозначает множитель частоты, который использовался при формировании записи, по умолчанию (GHz)
<parameter>	S Y Z H G	Указывает тип записанной матрицы параметров; по умолчанию используются S-параметры (матрица рассеяния)
<format>	DB MA RI	Формат записи данных: DB – амплитуда в дБ ($20 \log Mag$) и, через табуляцию, записывают углы; MA – абсолютные значения амплитуд (Magnitude) и, через табуляцию, записывают углы; RI – действительные-мнимые числа (Re-Im). По умолчанию используется формат MA, углы записываются в градусах
R <n>	<n> – заменить на сопротивление	Указывает эталонное сопротивление при измерениях; по умолчанию 50 Ом

После указания первой строки заголовка записывается основной код файла, который определяет коэффициенты передачи для многополюсников. Ниже приводится пример листинга файла Touchstone:

```
«!Demo Touchstone file
# GHz S MA R 50
! freq magS11 angS11 magS21 angS21 magS12 angS12
magS22 angS22
1      0.9      -0.24    0.01    89.8    0.1    89.8
      0.9      -0.24»
```

Как видно из примера выше, Touchstone-файлы содержат данные о результатах измерения, при этом не требуют информации о внутреннем строении схемы, что делает их универсальным и удобным инструментом для использования результатов реальных измерений в процессе математического моделирования.

Отметим, что, несмотря на свой возраст, SPICE до сих пор популярен в схемотехническом моделировании: SPICE и его модификации используются в NI Multisim, Cadence OrCAD, MicroCAP, LTspice, Altium Designer. Формат Touchstone применяются в программах электродинамического моделирования (Keysight ADS, NI AWR), а также в векторных анализаторах цепей для сохранения данных измерений.

В данной статье для математического моделирования в программном пакете DS CST Studio Suite 2023 будут использоваться эквивалентные схемы pin-диодов и МЭМС-ключей во включенном и выключенном состоянии, записанные в виде SPICE- и Touchstone-моделей, между которыми будет произведено сравнение.

Исследуемая модель управляемого метаматериала, размещенного в волноводе

В процессе моделирования использовался волновод WR510 (WG7, R18) с размерами 129,54×64,77 мм (5,10×2,55 дюймов) с частотой среза 1,157 ГГц. В середину волновода была вставлена пластина метаматериала с длиной плеча 9,38 мм ($\lambda/16$ на частоте 2 ГГц). Вид волновода и пластины метаматериала приводится на рисунке 2.

Данная конструкция волновода с метаматериалом может работать в двух режимах:

- 1) прозрачный – коммутирующие устройства включены, и электромагнитная волна проходит сквозь метаматериал с минимальными потерями;
- 2) отражательный – коммутирующие элементы в узлах замкнуты, и падающая волна испытывает отражение от пластины метаматериала.

В идеализированном случае, когда в прозрачном режиме в узлах отсутствует электрический контакт, а в отражательном режиме узлы замкнуты медными проводниками, матрицы рассеяния (S_{11} и S_{21}) будут иметь вид, представленный на рисунке 3.

Как видно, при коммутации узлов удастся обеспечить высокий коэффициент отражения электромагнитных волн от структуры метаматериала в широком диапазоне частот. На основании представленной конструкции проведем исследование эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей на основе SPICE- и Touchstone-моделей.

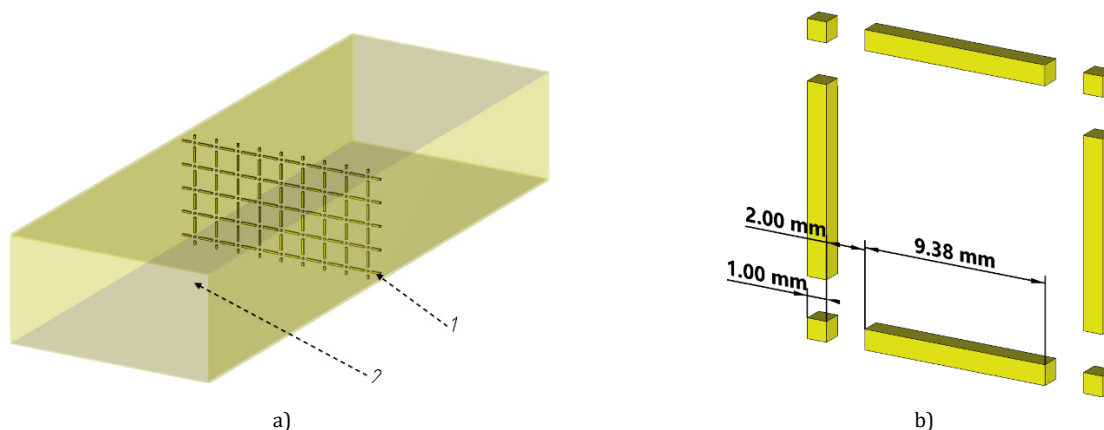


Рис. 2. Исследуемая в процессе моделирования задача: а) пластина метаматериала (1), волновод (2); б) ячейка метаматериала (в углах размещаются коммутирующие устройства – pin-диоды или МЭМС-ключи)

Fig. 2. Problem Studied in Process of Modeling: a) Metamaterial Plate (1), Waveguide (2); b) Metamaterial Cell (Switching Devices are Placed in the Nodes – Pin-Diodes or MEMS-Switches)

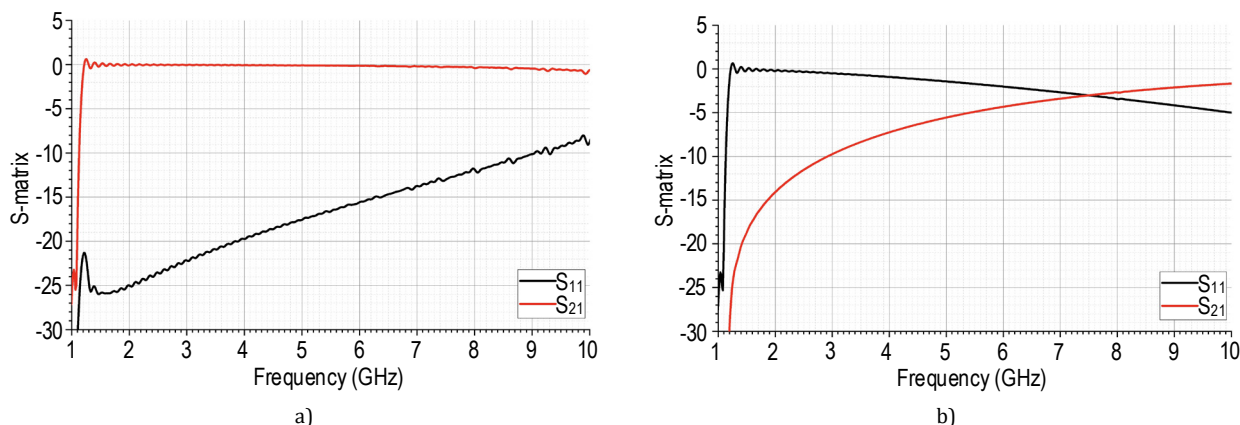


Рис. 3. S-параметры волновода с метаматериалом в идеализированном случае: прозрачный (а) и отражательный (б) режим

Fig. 3. S-parameters of Waveguide with Metamaterial in the Idealized Case: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Математическое моделирование управляемого метаматериала со SPICE-моделями pin-диодов

Первым этапом исследования является выбор эквивалентных схем для используемых радиокомпонентов. Эквивалентная схема pin-диода во многом определяется структурой полупроводникового перехода после добавления i -области. Общие принципы создания конструкции pin-диодов позволили выявить закономерности их параметров, на основе которых были построены эквивалентные схемы для открытого и закрытого состояния диода. При этом, с точки зрения набора эквивалентных элементов, эти схемы будут неизменны. Обобщенная структура pin-диода [9], а также его универсальные эквивалентные схемы приведены на рисунке 4.

Данная универсальная эквивалентная схема является общей для всех pin-диодов, а различия между конкретными изделиями будут лишь в номиналах L , R_s , C_T и R_p . Отметим, что параметр L зависит от геометрических характеристик корпуса и размеров контактных площадок, и имеет малые значения, поэтому наиболее важными являются остальные три параметра диода. В открытом ре-

жиме pin-диод ведет себя как переменный резистор, управляемый протекающим током:

$$R_s = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p)Q} \text{ или } R_s = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p)I_f \tau}, \quad (1)$$

где $Q = I_f \tau$; W – ширина i -области; I_f – прямой ток; τ – время жизни носителей заряда; μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок.

В закрытом режиме резистор R_s заменяется на параллельное соединение емкости (C_T) и омических потерь при обратном токе (R_p). Паразитная емкость при этом определяется в соответствии с выражением:

$$C_T = \frac{\epsilon A}{W}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость кремния; A – площадь перехода.

Описанная эквивалентная схема позволяет обеспечить минимальное сопротивление pin-диодов в открытом (включенном) и высокую изоляцию в закрытом (выключенном) состоянии. В данной статье рассматриваются две конструкции pin-диодов

из научных статей [5, 10]. Эквивалентная схема с номиналами элементов для pin-диода из статьи [5] представлена на рисунке 5.

Приведенные эквивалентные схемы использовались для электродинамического моделирования

волновода с управляемым метаматериалом (см. рисунок 2). На рисунке 6 приводятся графики S -параметров, полученные с использованием эквивалентных схем pin-диодов в качестве коммутирующих элементов, а также идеализированного случая (см. рисунок 3) работы метаматериала.

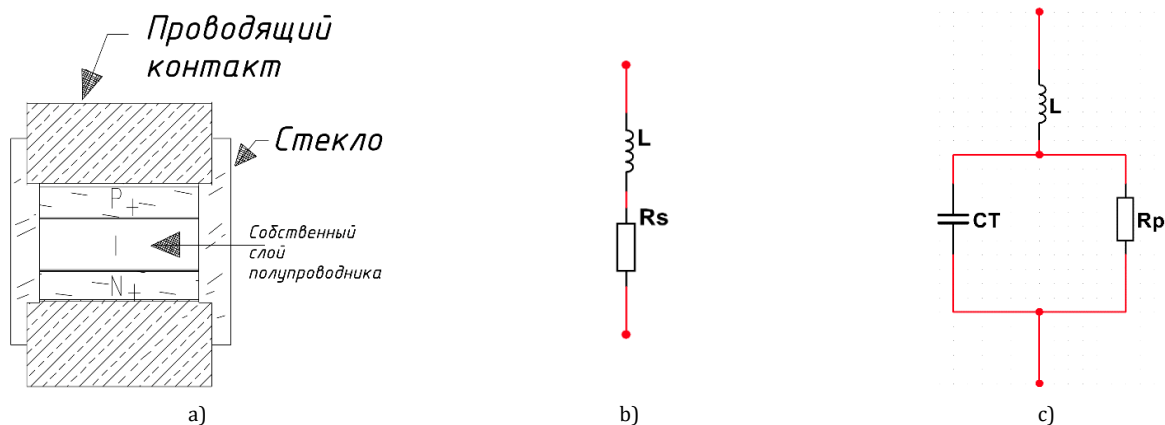
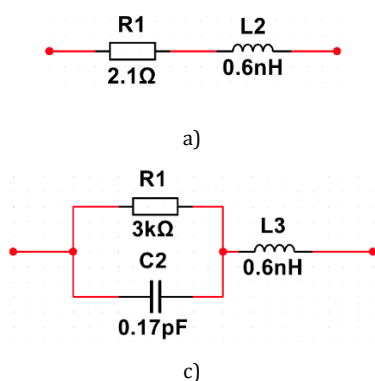


Рис. 4. Обобщенная структура (а) и эквивалентная схема PIN-диода в открытом (б) и закрытом (с) состоянии

Fig. 4. Pin-Diode Design (a) and Its Equivalent Circuit in ON State (b) and OFF State (c)



```
.SUBCKT PIN1ON 1 3
R1 1 2 2.1OHMS
L2 2 3 0.6NH
.ENDS
```

б)

```
.SUBCKT PIN1OFF 1 3
R1 1 2 3KOHMS
C2 1 2 0.17PF
L3 2 3 0.6NH
.ENDS
```

д)

Рис. 5. Эквивалентные схемы для pin-диода [5]: схема pin-диода (а) и SPICE-модель (б) – включенное состояние; схема pin-диода (с) и SPICE-модель (д) – выключенное состояние

Fig. 5. Equivalent Circuits for Pin-Diode [5]: a) Pin-Diode Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) Pin-Diode Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

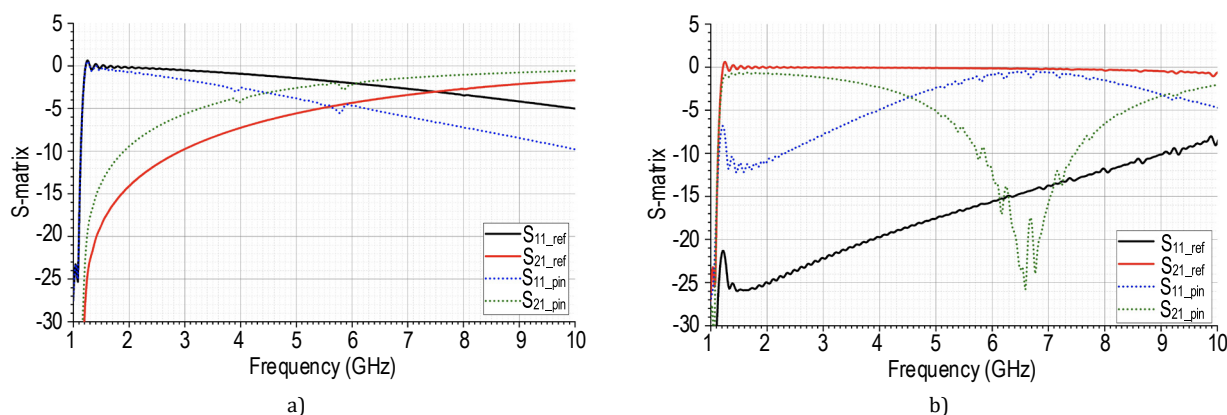


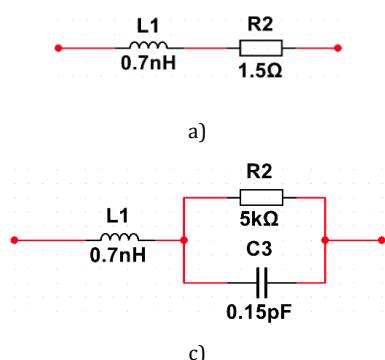
Рис. 6. S -параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели pin-диода [5]: отражательный (а) и прозрачный (б) режим

Fig. 6. S-Parameters of Controlled Metamaterial With Pin-Diode SPICE Models from REFERENCE [5]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно по полученным результатам, использование pin -диодов приводит к увеличению потерь в прозрачном режиме, т. к. в закрытом состоянии сопротивление pin -диодов не бесконечно, и определяется эквивалентной схемой. Также стоит обратить внимание на существенное возрастание S_{11} -параметра в диапазоне частот от 5 до 8 ГГц для прозрачного режима. Данный всплеск вызван резонансом в контуре закрытого pin -диода, что приводит к замыканию узлов метаматериала и, как следствие, отражению электромагнитной волны от него. Таким образом, использование pin -диодов в качестве

коммутирующих элементов ограничено по частоте из-за особенностей их эквивалентной схемы.

Далее, рассмотрим pin -диод из работы [10], в которой авторы на основе экспериментальных измерений и технической спецификации получили эквивалентную схему pin -диода Skyworks SMP1345-079LF (рисунок 7). На основе приведенных эквивалентных схем и соответствующего SPICE-кода проводилось моделирование аналогичное ранее рассмотренному pin -диоду из работы [5]. Полученные результаты, а также сравнение с идеализированным случаем приводятся на рисунке 8.



```
.SUBCKT PIN2ON 1 3
L1 1 2 0.7NH
R2 2 3 1.5OHMS
.ENDS
```

```
.SUBCKT PIN2OFF 1 3
L1 1 2 0.7NH
R2 2 3 5KOHMS
C3 2 3 0.15PF
.ENDS
```

Рис. 7. Эквивалентные схемы для pin -диода [10]: схема pin -диода (a) и SPICE-модель (b) – включенное состояние; схема pin -диода (c) и SPICE-модель (d) – выключенное состояние

Fig. 7. Equivalent Circuits for Pin-Diode [10]: a) Pin-Diode Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) Pin-Diode Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

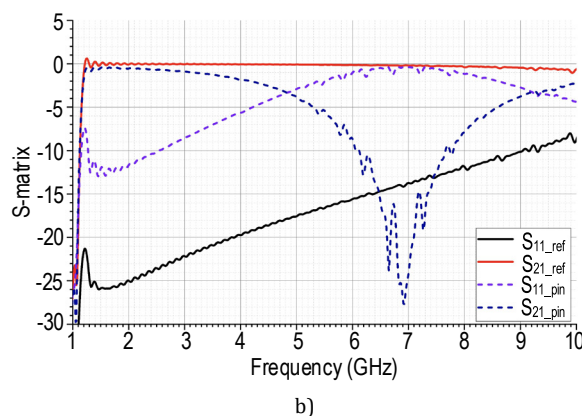
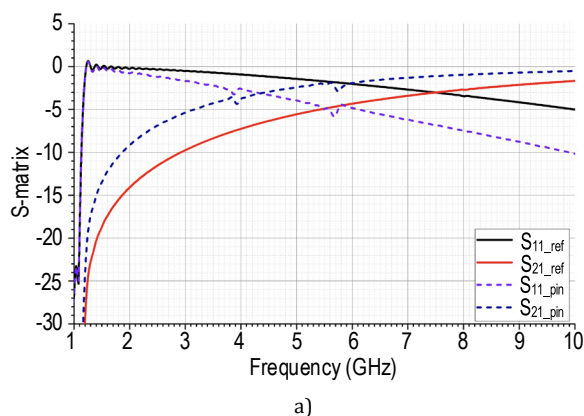


Рис. 8. S-параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели pin -диода [10]: отражательный (a) и прозрачный (b) режимы

Fig. 8. S-Parameters of Controlled Metamaterial with Pin-Diode SPICE Models from Reference [10]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно из представленных графиков, использование pin -диода другой конструкции не приводит к существенному изменению характера кривой S-параметров. Имеющиеся незначительные различия в рабочих характеристиках рассмотренных конструкций pin -диодов напрямую вызваны особенностями их топологий. По этой причине конструкция из работы [10] в прозрачном режиме обеспечивает большую изоляцию в более широком

диапазоне частот, что подтверждается графиками на рисунке 9, а также результатами схемотехнического моделирования для одиночного pin -диода.

Таким образом, на основе моделирования управляемого метаматериала с pin -диодами можно сделать вывод, что основные характеристики pin -диода слабо зависят от конкретной модели и в основном определяются общей эквивалентной схемой.

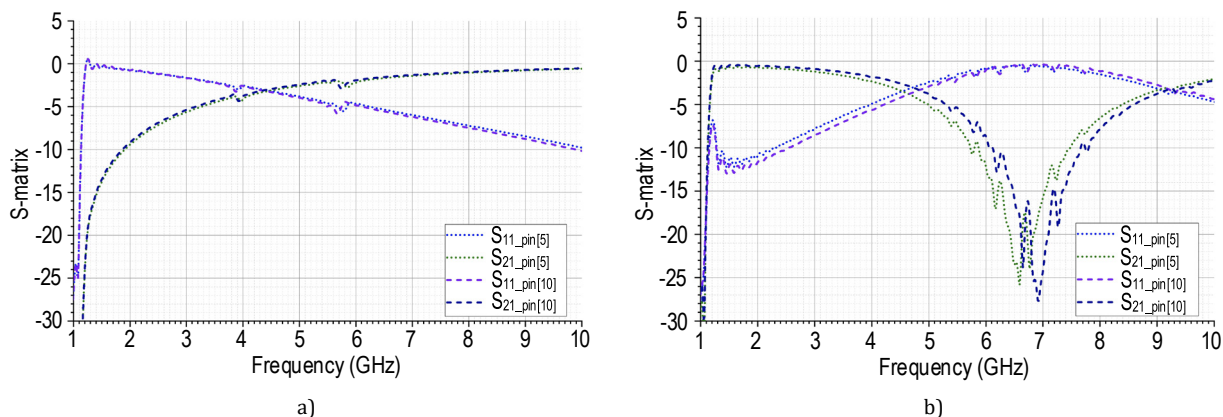


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования управляемого метаматериала с использованием SPICE-моделей pin-диодов в качестве коммутационных элементов: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

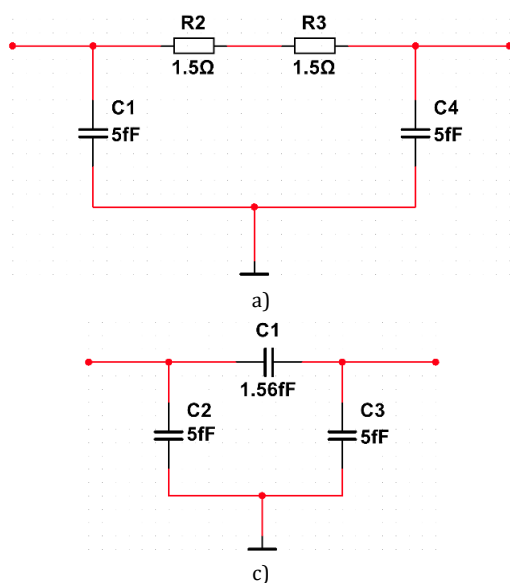
Fig. 9. Comparison of Simulation Results of Controlled Metamaterial with Equivalent Circuits of Pin-Diodes: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Математическое моделирование управляемого метаматериала со SPICE-моделями МЭМС-переключателей

Проведем аналогичный анализ для случая использования МЭМС-переключателей. В настоящее время их конструкции быстро развиваются, а в производстве используют современные технологии фотолитографии, в том числе с применением фотолитографии в глубоком ультрафиолете (компания ASML) и технологий 5+ нм, что приводит к постоянному изменению их эквивалентных схем, сильно зависящих от технологического процесса, топологической конструкции контактов, используемых актуаторов и методов обеспечения питания. В данной работе рассмотрены две конструкции МЭМС-переключателей из работ [11, 12]. Отметим, что высокая сложность конструкции современных МЭМС-

переключателей делает невозможным или крайне затруднительным получение эквивалентных схем, поэтому при их исследовании удобнее использовать Touchstone-файлы.

В статье [11] была предложена конструкция МЭМС-переключателя, обеспечивающего в закрытом состоянии достаточно высокий уровень изоляции благодаря формированию П-контура из конденсаторов с малыми емкостями. Эквивалентная схема этого МЭМС-переключателя, а также его SPICE-модель приводятся на рисунке 10. На основе приведенных SPICE-моделей проводилось электродинамическое моделирование волновода с управляемым метаматериалом; полученные результаты сравнивались с идеализированным случаем. Графики зависимостей S-параметров от частоты приведены на рисунке 11.



```
.SUBCKT MEMS1ON 1 3
C1 1 0 5FF
R2 1 2 1.5OHMS
R3 2 3 1.5OHMS
C4 3 0 5FF
.ENDS
```

b)

```
.SUBCKT MEMS1OFF 1 2
C1 1 2 1.56FF
C2 1 0 5FF
C3 2 0 5FF
.ENDS
```

d)

Рис. 10. Эквивалентные схемы для МЭМС-переключателя [11]: схема МЭМС-переключателя (а) и SPICE-модель (б) – включенное состояние; схема МЭМС-переключателя (с) и SPICE-модель (д) – выключенное состояние

Fig. 10. Equivalent Circuits for MEMS-Switch [11]: a) MEMS-Switch Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) MEMS-Switch Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

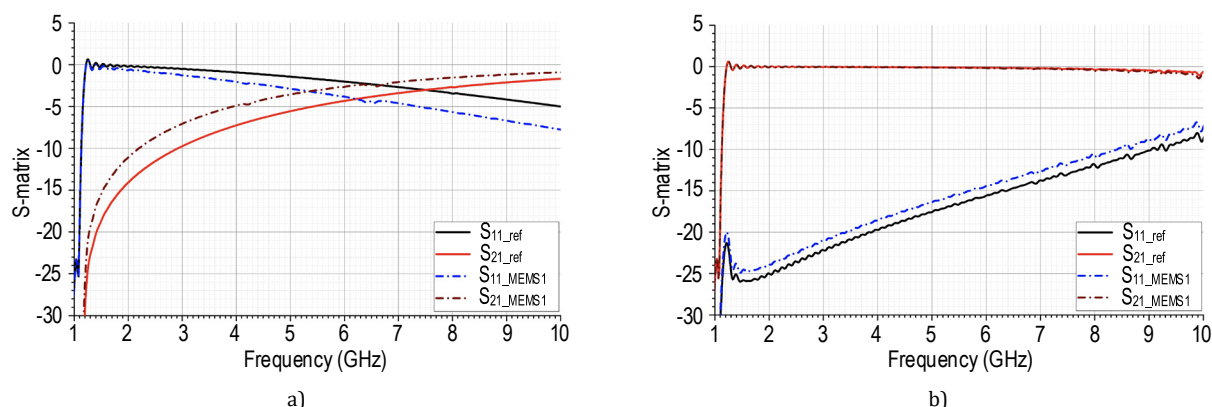


Рис. 11. S -параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели МЭМС-переключателя [11]: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

Fig. 11. S -Parameters of Controlled Metamaterial with MEMS-Switch SPICE Models from Reference [11]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно по полученным результатам, использование МЭМС-переключателя [11] позволяет получить S -параметры, очень близкие к идеализированному случаю. Таким образом, рассмотренный МЭМС-переключатель обеспечивает лучшие характеристики работы управляемого метаматериала по сравнению с pin-диодами.

В качестве еще одного варианта коммутирующего элемента был исследован МЭМС-переключатель из статьи [12]. На рисунке 12 приводится эквивалентная схема и SPICE-модель этого МЭМС-переключателя. Как и в предыдущих случаях, представленные SPICE-модели использовались для моделирования метаматериала и получения S -параметров (рисунк 13). Отметим, что из-за усложне-

ния эквивалентной схемы большого числа нелинейных элементов, а также с учетом использования 180 переключателей для коммутации всех узлов пластины метаматериала, время моделирования увеличилось в 2,5 раза по сравнению со случаем использования pin-диодов и в 1,5 раза по сравнению с МЭМС-переключателем из [11].

Полученные результаты показывают, что использование MEMS-переключателей позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот по сравнению с pin-диодами. Однако МЭМС-переключатель из [12] значительно уступает конструкции из [11] в реализуемой эффективности работы метаматериала, что особенно заметно в отражательном режиме.

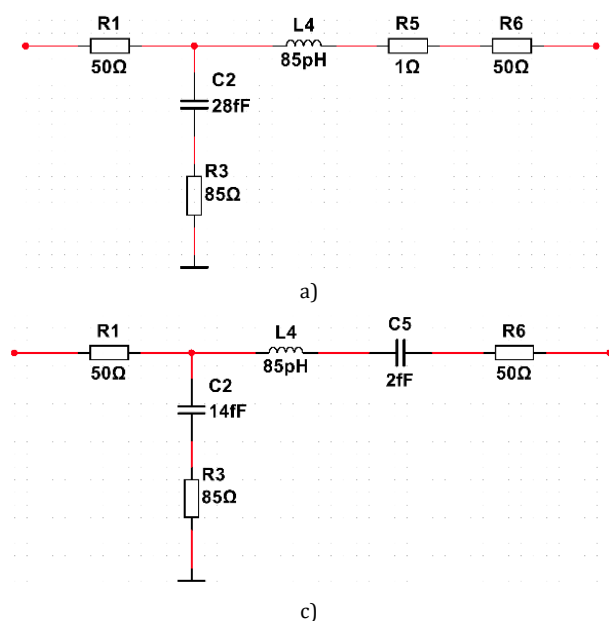


Рис. 12. Эквивалентные схемы для МЭМС-переключателя [12]: схема МЭМС-переключателя (а) и SPICE-модель (б) – включенное состояние; схема МЭМС-переключателя (с) и SPICE-модель (д) – выключенное состояние
Fig. 12. Equivalent Circuits for MEMS-Switch [12]: a) MEMS-Switch Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) MEMS-Switch Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

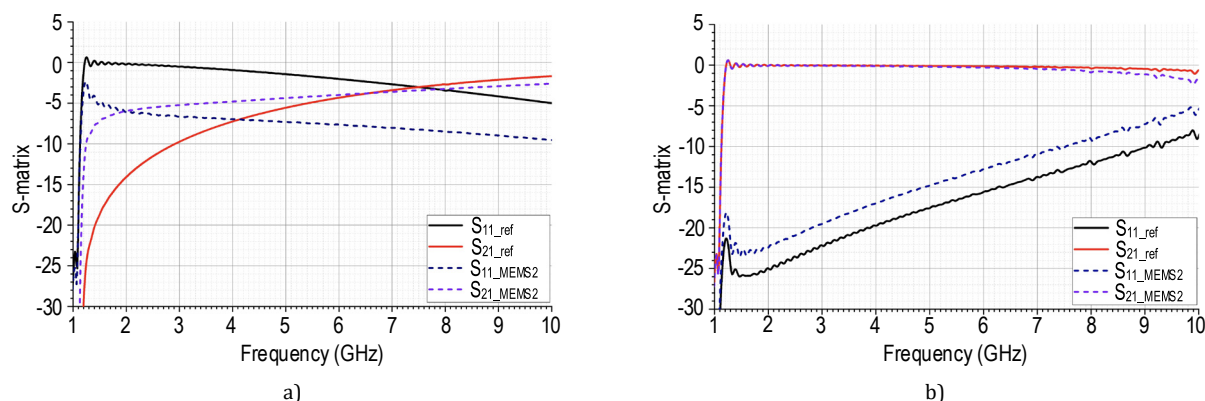


Рис. 13. S-параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели МЭМС-переключателя [12]: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

Fig. 13. S-Parameters of Controlled Metamaterial with MEMS-Switch SPICE Models from Reference [12]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Таким образом, использование SPICE-моделей позволяет повысить точность математического моделирования благодаря учету влияния паразитных характеристик радиокомпонента, включая нелинейный характер зависимости сопротивления от частоты. Однако также следует рассмотреть случай, когда использование SPICE-моделей по какой-либо причине невозможно, и доступны только Touchstone-файлы. Поэтому произведем сравнение точности моделирования при использовании SPICE- и Touchstone-моделей.

Сравнение результатов моделирования при использовании SPICE- и Touchstone-моделей эквивалентных схем

Для оценки эффективности применения Touchstone-файлов при электродинамическом моделировании рассматривался случай использования pin-диода (см. рисунок 5) в закрытом состоянии, а также МЭМС-переключатель (см. рисунок 10) в открытом состоянии. Для формирования Touchstone-файла были построены эквивалентные схемы коммутационных элементов в редакторе схем CST Schematic и рассчитаны их S-параметры в широком диапазоне частот (рисунки 14 и 15).

Отметим, что формирование Touchstone-файла проще, чем создание SPICE-модели, т. к. не требуется вручную набирать программный код описания радиоэлектронного компонента. Но Touchstone-файл ограничен выбранным при его формировании диапазоном частот и не может использоваться для математического моделирования вне этого диапазона. На рисунке 16 приводятся результаты моделирования волновода с управляемым метаматериалом с использованием Touchstone-файлов, а также их сравнение со SPICE-моделями для соответствующих случаев. Из приведенных графиков видно, что применение Touchstone-файлов при моделировании дает результаты, совпадающие со случаем использования SPICE-моделей. Таким образом, при наличии одной из волновых матриц описания компонента возможно проведение электродинамического моделирования с высокой точностью, что является востребованным при определении влияния нелинейных элементов на различные СВЧ-устройства или антенны. Однако отметим, что использование нелинейных элементов приводит к значительному усложнению процедуры математического моделирования, а значит, увеличивает требования к вычислительным мощностям.

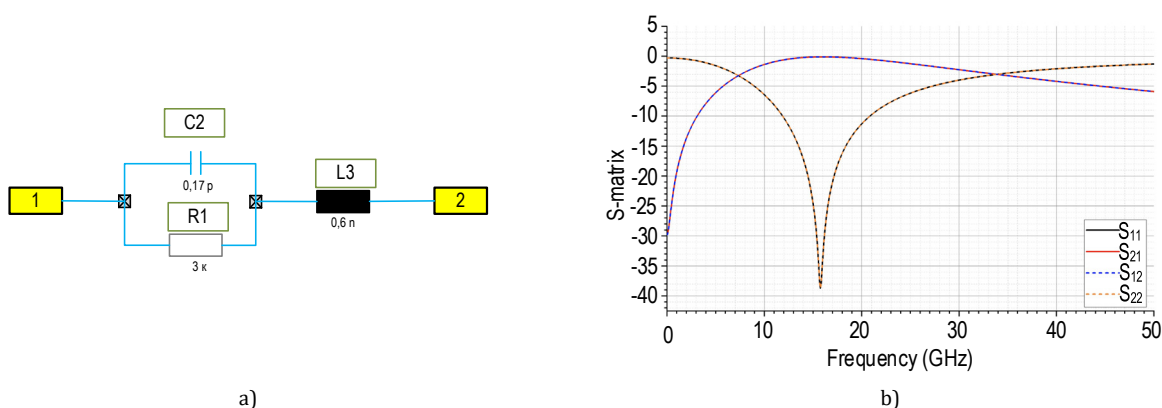
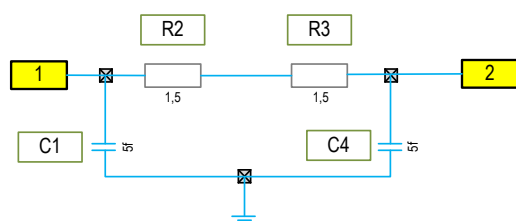
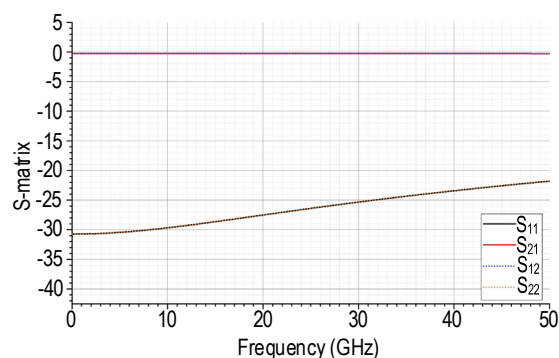


Рис. 14. Touchstone-файл для pin-диода в закрытом состоянии: а) эквивалентная схема, собранная в CST Schematic; б) графики S-параметров, которые записывались в Touchstone-файл

Fig. 14. Touchstone File for Pin-Diode in OFF State: a) Equivalent Circuit in CST Schematic; b) S-Parameters for Touchstone File



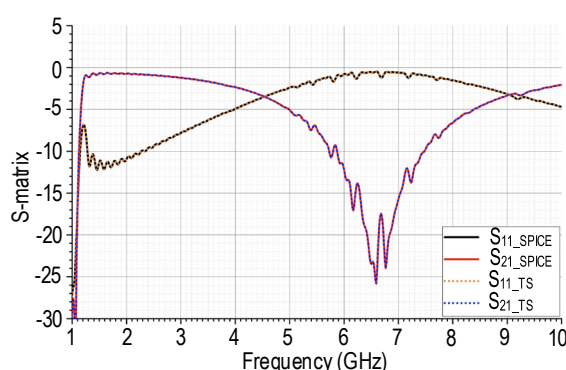
a)



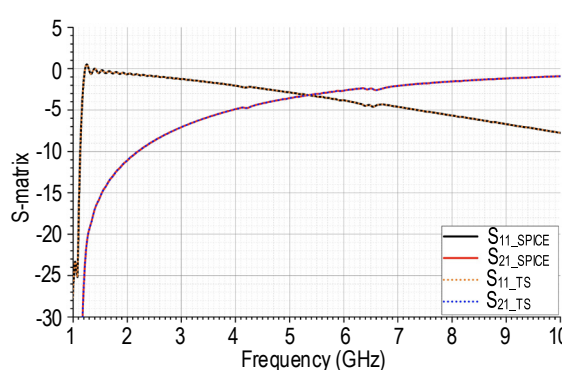
b)

Рис. 15. Touchstone-файл для МЭМС- переключателя в открытом состоянии: а) эквивалентная схема, собранная в CST Schematic; б) графики S -параметров, которые записывались в Touchstone-файл

Fig. 15. Touchstone File for MEMS-Switch in OFF State: a) Equivalent Circuit in CST Schematic; b) S -Parameters for Touchstone File



a)



b)

Рис. 16. S -параметры для волновода с управляемым метаматериалом с использованием Touchstone-файлов для случая: а) pin-диода в закрытом состоянии; б) МЭМС-переключателя в открытом состоянии

Fig. 16. S -parameters of Controlled Metamaterial with Touchstone Files for the Case of: a) Pin-Diode in OFF State; b) MEMS-Switch in ON State

Также, в ходе моделирования в программном пакете DS CST Studio Suite 2023 было обнаружено, что использование SPICE-моделей позволяет уменьшить время расчета по сравнению с Touchstone-файлами. Например, при решении последней из рассмотренных задач (сравнение результатов моделирования МЭМС-переключателя на основе SPICE-модели и Touchstone-файла) было выяснено, что моделирование с использованием SPICE-модели занимает 10 мин. 30 с, использует 57 Гб оперативной памяти в пике и обеспечивает равномерную загрузку CUDA-ядер ($2 \times$ Nvidia Tesla T4); в случае Touchstone-файла время расчета составило 12 мин. 59 с (что на 5 % больше), было использовано 69 Гб оперативной памяти в пике, а загрузка CUDA-ядер носила неравномерный характер. Такие результаты объясняются особенностями работы программного пакета DS CST Studio Suite 2023: в случае SPICE-моделей S -параметры эквивалентной схемы рассчитываются во всем исследуемом диапазоне частот перед началом моделирования; а при использовании Touchstone-файлов считывание волновой матрицы происходит для каждой частоты по отдельности по мере надобности. Однако

в общем эффективность расчетов оставалась на достаточно высоком уровне при моделировании всех рассмотренных нелинейных компонентов благодаря использованию вычислительных ядер CUDA.

Заключение

Таким образом, применение SPICE-моделей и Touchstone-файлов позволяет совместить схемотехнические системы моделирования с электродинамическими, за счет чего в ходе расчетов учитывается больше параметров реальных радиоэлектронных компонентов и повышается точность результатов моделирования СВЧ-устройств. SPICE-модели являются достаточно точным описанием компонентов на топологическом уровне, учитывающим их паразитные параметры, которые оказывают влияние на протекающие токи и электромагнитные волны. Однако из-за особенностей построения SPICE-моделей, создающих угрозу сохранению в тайне конструкции компонента, в настоящее время в основном используется описание только в виде IBIS-файлов. Touchstone-файлы также лишены этого недостатка. Они могут быть получены на основе

IBIS-файлов и представляют собой набор волновых матриц многополюсников. Кроме того, Touchstone-файлы могут быть сформированы с помощью векторных анализаторов цепей, так как являются стандартом предоставления результатов (измерительная аппаратура Keysight и Rohde&Schwarz). Эта особенность позволяет проводить гибридные исследования – когда часть результатов получена на основе реальных измерений, а часть – путем выполнения электродинамического моделирования.

Актуальность полученных результатов связана с повышением точности численного электродинамического анализа метаматериальных объемных структур с управляемой диаграммой рассеянного излучения [13, 14], в частности – для оценки потерь мощности в управляющих элементах и цепях их питания. В работах [13, 14] было показано, что на ос-

нове объемных метаматериальных структур с оптическим или электрическим способом управления рассеянным излучением могут быть реализованы отражатели фазированных антенных решеток, а также – рефлекторы антенных систем с широкоугольным сканированием в сверхширокой полосе частот и покрытий, существенно снижающих эффективную поверхность рассеяния защищаемых объектов в заданных направлениях.

Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют значительно повысить эффективность автоматизированного проектирования управляемых метаматериалов за счет использования схемотехнических форматов описания управляющих элементов, а также – для верификации электродинамических моделей на основе данных натурного измерения характеристик радиокомпонентов.

Список источников

1. Wu Z.-f., Liu J.-b. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter // *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China (ACES, Beijing, China, 29 July–01 August 2018)*. IEEE, 2018. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application // *Proceedings of the 18th International Conference on Smart Technologies (IEEE EUROCON 2019, Novi Sad, Serbia, 01–04 July 2019)*. IEEE, 2019. DOI:10.1109/EUROCON.2019.8861926
3. Wu Z.N., Tang W.X., Cui T.J. A beam-steerable metamaterial lens using varactor diodes // *Proceedings of the MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP, Suzhou, China, 01–03 July 2015)*. IEEE, 2015. DOI:10.1109/IMWS-AMP.2015.7324902
4. Chaimool S., Hongnara T., Rakluea C., Akkaraekthalin P., Zhao Y. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019. Vol. 2019. Article ID 7216324. DOI:10.1155/2019/7216324
5. Liu B., Lin G., Cui Y., Li R. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article ID 9852. DOI:10.1038/s41598-017-10364-4
6. Пастернак Ю.Г., Ищенко Е.А., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя // *Труды учебных заведений связи*. 2021. Т. 7. № 1. С. 54–62. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62
7. Vladimirescu A. The SPICE Book. John Wiley, 1994. 432 p.
8. Touchstone File Format Specification. Rev 1.1. EIA/IBIS Open Forum, 2002. 11 p.
9. The PIN Diode Circuit Designers': Handbook. Microsemi Corporation, 1998. 137 p.
10. Ahmad I., Dildar H., Khan W.U.R., Ullah S., Ullah S., Albreem M.A., Alsharif M.H., Uthansakul P. Frequency Reconfigurable Antenna for Multi Standard Wireless and Mobile Communication Systems // *Tech Science Press*. 2021. Vol. 68. Iss. 2. PP. 2563–2578. DOI:10.32604/cmc.2021.016813
11. Casals-Terré J., Pradell L., Heredia J.C., Giacomozzi F., Iannacci J., Contreras A., Ribó M. Enhanced Robustness of a Bridge-Type Rf-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 22. Article ID 8893. DOI:10.3390/s22228893
12. Gong S., Shen H., Barker N.S. Study of Broadband Cryogenic DC-Contact RF MEMS Switches // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. Vol. 57. Iss. 12. PP. 3442–3449. DOI:10.1109/TMTT.2009.203387
13. Авдюшин А.С., Ашихмин А.В., Зеленин И.А., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Искусственный диэлектрик с синтезируемой поверхностью отражения электромагнитных волн СВЧ диапазона // *Радиотехника*. 2014. № 6. С. 4–7.
14. Авдюшин А.С., Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М., Чугуевский В.И. Использование цилиндров с анизотропным характером проводимости для упрощения модели искусственного диэлектрика // *Радиотехника*. 2014. № 6. С. 100–104.

References

1. Wu Z.-f., Liu J.-b. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter. *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China, ACES, 29 July–01 August 2018, Beijing, China*. IEEE; 2018. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application. *Proceedings of the 18th International Conference on Smart Technologies, IEEE EUROCON 2019, 01–04 July 2019, Novi Sad, Serbia*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/EUROCON.2019.8861926

3. Wu Z.N., Tang W.X., Cui T.J. A beam-steerable metamaterial lens using varactor diodes. *Proceedings of the MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, IMWS-AMP, 01–03 July 2015, Suzhou, China*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/IMWS-AMP.2015.7324902
4. Chaimool S., Hongnara T., Rakkuea C., Akkaraekthalin P., Zhao Y. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019;2019:7216324. DOI:10.1155/2019/7216324
5. Liu B., Lin G., Cui Y., Li R. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding. *Scientific Reports*. 2017;7:9852. DOI:10.1038/s41598-017-10364-4
6. Pasternak Yu., Ishchenko E., Pendyurin V., Fedorov S. Use of Active Metamaterial as a Phase Shifter Integrated into the Waveguide. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2021;7(1):54–62. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62
7. Vladimirescu A. *The SPICE Book*. Wiley; 1994. 432 p.
8. *Touchstone File Format Specification*. Rev 1.1. EIA/IBIS Open Forum; 2002. 11 p.
9. *The PIN Diode Circuit Designers' Handbook*. Microsemi Corporation; 1998. 137 p.
10. Ahmad I., Dildar H., Khan W.U.R., Ullah S., Ullah S., Albreem M.A., Alsharif M.H., Uthansakul P. Frequency Reconfigurable Antenna for Multi Standard Wireless and Mobile Communication Systems. *Tech Science Press*. 2021;68(2):2563–2578. DOI:10.32604/cmc.2021.016813
11. Casals-Terré J., Pradell L., Heredia J. C., Giacomozzi F., Iannacci J., Contreras A., Ribó M. Enhanced Robustness of a Bridge-Type Rf-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications. *Sensors*. 2022;22(22):8893. DOI:10.3390/s22228893
12. Gong S., Shen H., Barker N.S. Study of Broadband Cryogenic DC-Contact RF MEMS Switches. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009;57(12):3442–3449. DOI:10.1109/TMTT.2009.2033872
13. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Zelenin I.A., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. Artificial Dielectric with Surface Synthesized for Reflection of Electromagnetic Waves of Microwave Range. *Radiotekhnika*. 2014;6:4–7.
14. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M., Chuguevskiy V.I. Use of Cylinders with Anisotropic Conductivity to Simplify Mathematical Model of Artificial Dielectrics. *Radiotekhnika*. 2014;6:100–104.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; одобрена после рецензирования 17.06.2023; принята к публикации 05.09.2023.

The article was submitted 09.06.2023; approved after reviewing 17.06.2023; accepted for publication 05.09.2023.

Информация об авторах:

ИЩЕНКО
Евгений Алексеевич

аспирант кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

ПАСТЕРНАК
Юрий Геннадьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>

ПЕНДЮРИН
Владимир Андреевич

кандидат технических наук, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи»

 <https://orcid.org/0000-0002-4697-5976>

ПРОСКУРИН
Дмитрий Константинович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0009-0004-0569-6737>

ФЁДОРОВ
Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-34-43



Кодирование АФМ-сигналов при передаче дробного числа бит на символ

Марк Александрович Мендельсон mendelson.ma@sut.ru

Вадим Анатольевич Егоров, egorov.va@sut.ru

Дмитрий Андреевич Копылов ✉, kopylov.da@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В статье предлагается простой с точки зрения вычислительных затрат метод кодирования дробного числа бит на символ при амплитудно-фазовой модуляции (АФМ). Изложение ведется применительно к случаю, когда необходимо сформировать значение удельной скорости передачи с точностью до четверти бита на символ. Приводятся алгоритмы работы кодера и декодера, формирования синхросигнала и величины энергетического выигрыша, достигаемого при использовании данного метода. Предложенный метод кодирования использован при разработке и модернизации высокоскоростных модемов, испытания которых подтвердили достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: АФМ, кодер, декодер, многомерное созвездие, дробное число бит на символ

Источник финансирования: статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР

Ссылка для цитирования: Мендельсон М.А., Егоров В.А., Копылов Д.А. Кодирование АФМ-сигналов при передаче дробного числа бит на символ // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 34–43. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-34-43

AFM Signals Coding When Transmitting a Fractional Number of Bits per Symbol

Mark Mendelson, mendelson.ma@sut.ru

Vadim Egorov, egorov.va@sut.ru

Dmitry Kopylov ✉, kopylov.da@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The article proposes a simple method from the point of view of computational costs for encoding a fractional number of bits per symbol with amplitude-phase modulation (APM). The presentation is performed in relation to the case when it is necessary to form the value of the specific transmission rate with an accuracy of up to a quarter of a bit per symbol. Algorithms for the operation of the encoder and decoder, the formation of a synchro signal and the amount of energy gain achieved by using this method are given. The proposed coding method was used in the development and modernization of high-speed modems, the tests of which confirmed the reliability of the results obtained.

Keywords: APM, encoder, decoder, multidimensional constellation

Funding: the article was prepared within the framework of applied scientific research of SPbSUT, registration number 123060900012-6 in the EGISU R&D

For citation: Mendelson M., Egorov V., Kopylov D. AFM Signals Coding When Transmitting a Fractional Number of Bits per Symbol. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):34–43. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-34-43

Введение

Одной из задач при построении высокоскоростных модемов является разработка кодирующего и декодирующего устройств, которые должны обеспечивать требуемые характеристики при наименьших вычислительных затратах [1]. С другой стороны, естественно, необходимо использовать методы модуляции и кодирования, обеспечивающие в условиях реального канала связи возможность максимального повышения скорости передачи данных.

Как правило, назначение кодовых комбинаций точкам сигнального созвездия осуществляется для целого числа бит на двумерный символ [2–6]. При допустимых в разработке значениях скорости модуляции, определяемых параметрами канала связи, и целом числе бит на символ это приводит к сетке значений скоростей передачи, кратных скорости модуляции. Однако возникают ситуации, когда получаемые таким образом значения скоростей передачи не соответствуют требованиям разработки. Кроме того, при модернизации модемов возникает задача вполне определенного повышения скорости передачи. При необходимости увеличения скорости передачи и использовании сигнальных созвездий с целым числом бит/символ увеличение числа кодируемых бит на единицу приводит к увеличению размера сигнального созвездия в два раза и к потере помехоустойчивости примерно на 3 дБ. В то же время получаемое увеличение скорости передачи при увеличении числа кодируемых бит на единицу может оказаться избыточным. Поэтому возникает необходимость в меньшем увеличении скорости, что приводит к задаче кодирования дробного значения числа бит/символ. Это позволяет добиться меньшего увеличения размера сигнального созвездия, при уменьшении потерь в помехоустойчивости. В связи с этим целью работы является разработка простого в реализации алгоритма кодирования и декодирования АФМ-сигналов с дробным числом бит/символ.

Осуществление кодирования дробного числа бит/символ предполагает назначение определенным двоичным кодовым комбинациям блока из последовательности нескольких двумерных символов (многомерное кодирование). Для удобства кодирования сигнальное созвездие делится на кольца. В блоке из нескольких двумерных символов на каждой позиции могут быть точки сигнального созвездия из различных колец. Выбор возмож-

ных комбинаций чередования точек различных колец в блоке из последовательности двумерных символов является одной из задач кодирования. Алгоритм кодирования дробного числа бит на символ, входящий в состав Рекомендаций МСЭ-T V.34 [7], V.90 и др., предполагает разбиение сигнального созвездия на большое число колец (до 18), является достаточно сложным и требует значительных вычислительных ресурсов, что при модернизации модемов является существенным ограничивающим фактором. Аналогичное утверждение о сложности можно отнести к методу передачи сигналов со скоростью быстрее скорости Найквиста [8], который обеспечивает получение дробных скоростей передачи, но пока не нашел практического применения, и в данной работе не рассматривается.

В то же время в работе [9] предложен достаточно простой алгоритм разбиения созвездия на два кольца для кодирования полуцелого числа бит. На основе [1] данный подход развит для передачи дробного числа бит, при которой возможно применение процедуры сверточного кодирования. Простота предлагаемого метода важна при модернизации модемов с ограниченными вычислительными возможностями. Он позволяет в значительной степени сохранить исходный метод кодирования для целого числа бит/символ и, в то же время, решить задачу получения необходимых скоростей передачи с меньшей потерей помехоустойчивости.

Метод иллюстрируется примером реализации кодирующего устройства при переходе от целочисленной удельной скорости к скорости 6,75 и 8,25 бит/символ. Приводится алгоритм работы соответствующего декодера и предлагается формирование цикла при применении предлагаемого алгоритма. Необходимое для кодирования формирование цикла предлагается совместить с формированием цикла внешнего кодера Рида – Соломона. Определяется величина выигрыша в помехоустойчивости за счет предлагаемого кодирования, которая хотя и уступает методу [7], но дает возможность значительно уменьшить затраты вычислительных ресурсов.

Предложенный метод кодирования использован при разработке и модернизации высокоскоростных модемов, испытания которых подтвердили расчетные параметры модемов по достигнутой скорости и коэффициенту ошибок при наличии аддитивных помех.

Несколько иной подход к решению задачи получения скорости передачи с дробным значением бит/символ по сравнению с предлагаемым в данной работе рассматривается в [10].

Основные принципы построения кодера

Структурная схема кодирующего устройства приведена на рисунке 1.

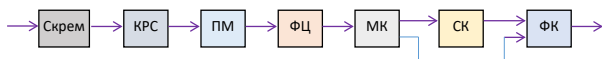


Рис. 1. Структурная схема кодирующего устройства

Fig. 1. Block Diagram of the Coding Device

Входной поток данных скремблируется (Скрем) и направляется в кодер Рида – Соломона (КРС), где вносится избыточность, далее поток поступает в перемежитель (ПМ) и формирователь цикла (ФЦ) для формирования цикла передачи. Сформированный таким образом сигнал посылается в многомерный кодер (МК), в котором цикл передачи делится на сигнальные блоки. Эти сигнальные блоки подвергаются относительному и сверточному кодированию (СК) и, в сочетании с информацией, полученной в многомерном кодере, осуществляется процедура отображения элементов сигнального блока в точки сигнального созвездия (формирование координат точек – ФК). При этом формируемое сигнальное созвездие обладает необходимой симметрией для решения задачи фазовой неоднозначности на 90°.

Задача кодирования состоит в разбиении выбранного сигнального созвездия на «кольца», выборе разрешенных комбинаций чередования точек «колец» и в назначении определенных кодовых комбинаций точкам сигнального созвездия.

Выбор формы сигнального созвездия, разбиение его на кольца, выбор разрешенных комбинаций чередования точек колец при фиксированном значении бит/символ должны осуществляться из условия получения минимума энергии многопозиционного сигнала в целом: $P_S = \min$.

Применительно к вариантам, рассматриваемым в данной работе, ограничимся рассмотрением разбиения созвездий на 2 (А, В) и 3 кольца (А, В, С):

$$p_1 \sum_A P_k(x_k, y_k) + p_2 \sum_B P_k(x_k, y_k) + p_3 \sum_C P_k(x_k, y_k) = \min, \quad (1)$$

где p_1, p_2, p_3 – вероятности появления сигнальных точек созвездия из колец А, В и С, соответственно; $P(x_k, y_k)$ – энергия k -ой точки созвездия с координатами x_k, y_k .

С целью минимизации энергии сигнала необходимо при выбранном размещении требуемого количества точек в сетке прямоугольных координат

выбрать внешнюю границу созвездия с наименьшей мощностью, что приводит к форме созвездия в виде круга и приближения к гауссовскому распределению вероятностей сигналов в пределах созвездия [9].

Назначение кодовых комбинаций точкам сигнального созвездия производится по критерию минимума числа искажаемых бит при ошибочном приеме сигнальной точки, что равносильно минимуму кодового расстояния между каждой переданной, и возможностью принять ошибочно соседними точками созвездия:

$$\sum_i \sum_k d_k(U_i, Q_k) = \min$$

при ограничении:

$$d_i(U_i, Q_k) \leq M,$$

где U – код переданной точки; Q – код соседней точки; M – максимально допустимое кодовое расстояние между соседними точками.

Для поиска координат сигнального созвездия и назначения соответствующих кодовых комбинаций использовалась оптимизационная процедура, с помощью которой при заданных ограничениях минимизировалось кодовое расстояние между соседними точками созвездия. Примером подобного назначения кодовых комбинаций при безызбыточном кодировании является код Грея.

Обозначим через n величину целой части удельной скорости числа бит на символ. Рассмотрим процедуру разбиения созвездия на кольца для случая передачи четвертой части бита. Здесь возможны два варианта: передача одной четверти бит на символ ($n + 0,25$) и трех четвертей бит на символ ($n + 0,75$). В обоих случаях используется формирование сигнального блока из последовательности 4-х 2-мерных символов (формирование 8-мерного созвездия), причем для варианта одной четверти бит/символ длина сигнального блока равна $4n + 1$ и трех четвертей бит на символ длина сигнального блока равна $4n + 3$.

Заметим, что при подобном подходе и необходимости получения удельной скорости с нечетной кратностью величины 0,125 бит/символ потребуются формирование сигнального блока из последовательности, содержащей восемь 2-мерных символов и т. д. Соответственно, формируемая длина сигнального блока составит $8n + j$, где j выбирается равным 1, 3, 5 или 7.

За счет сверточного кодирования количество бит, направляемых в отображатель (формирователь координат точек), увеличивается. Однако для упрощения дальнейшего изложения количество отображаемых бит приводится без учета сверточного кодирования. При выборе внешней границы

созвездия (формы созвездия) производится скругление с учетом того, что созвездие в виде круга обеспечивает наименьшую среднюю мощность [9].

В случае передачи одной четверти бит/символ задача кодирования проще всего решается путем разбиения сигнального созвездия на два «кольца»: внутреннее с количеством точек 2^n (кольцо А) и внешнего – с количеством точек 2^{n-2} (кольцо В), окружающих первое кольцо, с точками созвездия, выбранных из условия (1).

При передаче трех четвертей бит на символ сигнальное созвездие разделяется на три «кольца» с разным количеством точек:

- первая группа (кольцо А) состоит из 2^n точек, соответствующих передаче целой части бит/символ;
- вторая группа (кольцо В) состоит из 2^{n-1} точек, окружающих первое кольцо;
- третья группа (кольцо С) включает в себя 2^{n-2} точек, окружающих второе кольцо.

Точки в кольцах созвездия, так же, как и ранее, выбираются из условия (1).

При решении задачи кодирования необходимо выбрать комбинации размещения символов двух типов колец А и В при передаче одной четверти бит на символ, и трех типов колец А, В и С при передаче трех четвертей бит на символ на 4-х возможных позициях в сигнальном блоке.

Для первого случая (при скорости $n + 0,25$) варианты комбинаций колец в сигнальном блоке приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Варианты комбинаций колец в сигнальном блоке (при скорости $n + 0,25$)

TABLE 1. Rings Combinations Variants in the Signal Block (Speed is $n + 0.25$)

№ п/п	Комбинация символов колец	Средняя мощность	Код первых бит
1	4А	162,75	0
2	4В	367,5	–
3	3А+В	213,9375	100
4	2А+В+А	213,9375	101
5	А+В+2А	213,9375	110
6	В+3А	213,9375	111
7	2А+2В	265,125	–
8	А+3В	316,3125	–

Из перечня вариантов комбинаций размещения символов колец А и В следует отдать предпочтение комбинациям, обладающим, по возможности, наименьшей энергией. Тогда целесообразно выбрать следующие 5 возможных комбинаций символов колец А и В: одна комбинация, когда в сигнальном блоке передаются 4 символа, соответствующие точкам только из кольца А, и 4 комбинации передачи 3-х символов из кольца А и одного символа из кольца В.

Если первый бит в сигнальном блоке равен 1, то в зависимости от значений второго и третьего бита формируются (в различной последовательности) три двумерных символа из кольца А и один – из кольца В. Значения кодовых комбинаций первых трех бит сигнального блока и соответствующие им комбинации символов колец приведены в таблице 1. Число перед наименованием кольца означает количество символов в сигнальном блоке из данного кольца. При расчете средней мощности в кольцах принято, что точки сигнального созвездия расположены в рамках прямоугольной сетки с нечетными координатами $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots, \pm(2m - 1)$. При этом вероятность появления двумерных символов из кольца А составит $7/8$, а из кольца В – $1/8$.

Заметим, что при равномерном выборе символов вероятность появления сигналов из колец А и В составляет 0,8 и 0,2, соответственно. Другими словами, распределение вероятностей появления различных точек в сигнальном созвездии по предлагаемой процедуре формируется неравномерным с уменьшением вероятности появления сигналов при увеличении их энергии. Расчет с использованием (1) показывает, что выигрыш от предлагаемого выбора точек сигнального созвездия составляет около 0,34 дБ.

Во втором случае (при скорости $n + 0,75$) имеется 81 возможная комбинация символов. Типы комбинаций символов колец в сигнальном блоке, соответствующее им количество вариантов перестановок и средняя мощность сигнала определенной комбинации для созвездия точек с нечетными координатами и случая передачи 6,75 бит/символ приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Варианты комбинаций колец в сигнальном блоке (при скорости $n + 0,75$)

TABLE 2. Rings Combinations Variants in the Signal Block (Speed is $n + 0.75$)

№ п/п	Комбинация символов колец	Количество вариантов	Средняя мощность
1	4А	1	42
2	4В	1	102
3	4С	1	126
4	3А+В	4	57
5	2А+2В	6	72
6	А+3В	4	87
7	3А+С	4	63
8	2А+2С	6	84
9	А+3С	4	105
10	3В+С	4	108
11	2В+2С	6	114
12	В+3С	4	120
13	2А+В+С	12	78
14	А+2В+С	12	93
15	А+В+2С	12	99

Из перечня комбинаций размещения символов колец А, В и С, приведенных в таблице 2, также следует отдать предпочтение комбинациям, обладающим, по возможности, наименьшей энергией. В предлагаемом ниже варианте используются комбинации символов колец 4А, 3А+В, 3А+С, 2А+2В, 2А+В+С, А+3В, А+2В+С (см. таблицу 2). Это комбинации с наименьшей энергией, среди которых пропущены комбинации символов колец 2А+2С, как запрещенные. При этом следует заметить, что отказ от комбинации символов 2А+2С (2 символа из кольца С) вызван дополнительным увеличением пик-фактора формируемого сигнала из-за большей пиковой мощности данной комбинации по сравнению с выбранными кодовыми комбинациями символов (см. таблицу 2).

Можно показать, что при использовании предлагаемой ниже процедуры формирования блока символы из кольца А встречаются в используемых комбинациях сигналов с вероятностью $5/8$, символы из кольца В – $9/32$, символы из кольца С – $3/32$ (при равномерном распределении символы из кольца А встречаются с вероятностью $4/7$, из кольца В – $2/7$, из кольца С – $1/7$). Также, как и при скорости 8,25 бит/с, изменяется распределение вероятностей появления различных точек в сигнальном созвездии – с увеличением энергии сигналов вероятность их появления уменьшается.

Как известно, оптимальное неравномерное распределение вероятностей сигналов (гауссовское) в канале с аддитивным белым шумом дает в пределе выигрыш в помехоустойчивости 1,33 дБ по сравнению с равновероятным распределением в двумерном созвездии, для восьмимерного созвездия предельный выигрыш составляет 0,73 дБ [9]. Величина выигрыша за счет предлагаемого разбиения сигнального созвездия на три кольца составляет около 0,28 дБ (на 2 кольца 0,34 дБ), что соответствует примерно половине потенциального выигрыша при оптимальной процедуре формирования многомерного сигнала.

Сигнальные созвездия, сформированные по приведенному выше методу, для вариантов 6,75 и 8,25 бит/символ с учетом увеличения размера сигнального созвездия вдвое при использовании сверточного кодера, приведены на рисунках 2 и 3, соответственно. На рисунке 2 сигнальное созвездие образовано из 224 точек, причем внутреннее кольцо А включает 128 точек, кольцо В – 64 точки, кольцо С – 32 точки. Созвездие на рисунке 3 содержит 512 точек во внутреннем кольце А и 128 точек – во внешнем кольце В. Ломанные линии разделяют внутреннее и внешние кольца. Из сравнения приведенных на рисунках 2 и 3 созвездий и полученных значений выигрыша в помехоустойчивости следует, что при увеличении количества точек и числа колец в созвездии можно в большей степени приблизиться к

форме созвездия в виде круга и к гауссовскому распределению вероятностей сигналов в созвездии соответственно.

Это приводит к меньшим потерям в помехоустойчивости по сравнению с потенциальной [9].

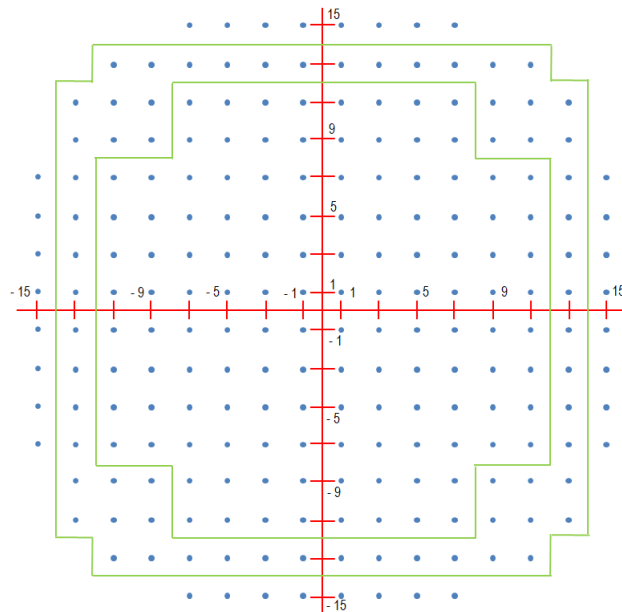


Рис. 2. Сигнальное созвездие для варианта 6,75 бит/символ

Fig. 2. Signals Constellation for the Variant of 6.75 bits per symbol

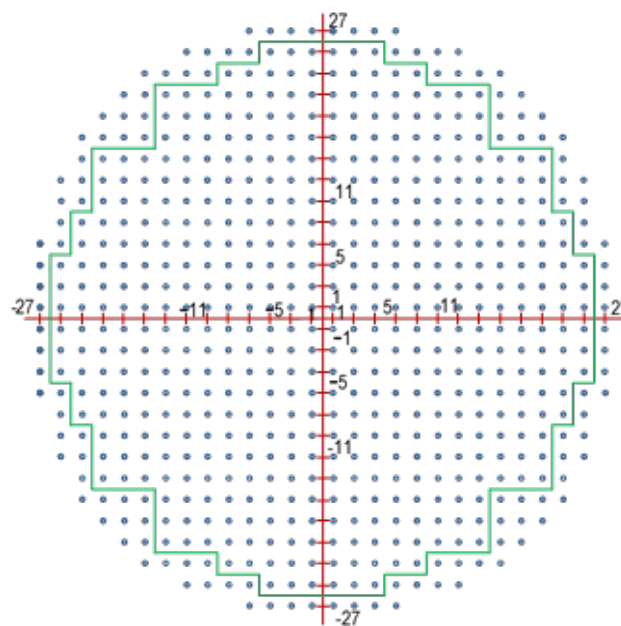


Рис. 3. Сигнальное созвездие для варианта 8,25 бит/символ

Fig. 3. Signals Constellation for the Variant of 8.25 bits per symbol

В варианте формирования созвездия из 2-х и 3-х колец область возможных значений функций распределения с учетом значений вероятностей сигналов в отдельных кольцах, приведена на рисунках 4а и 4б, соответственно.

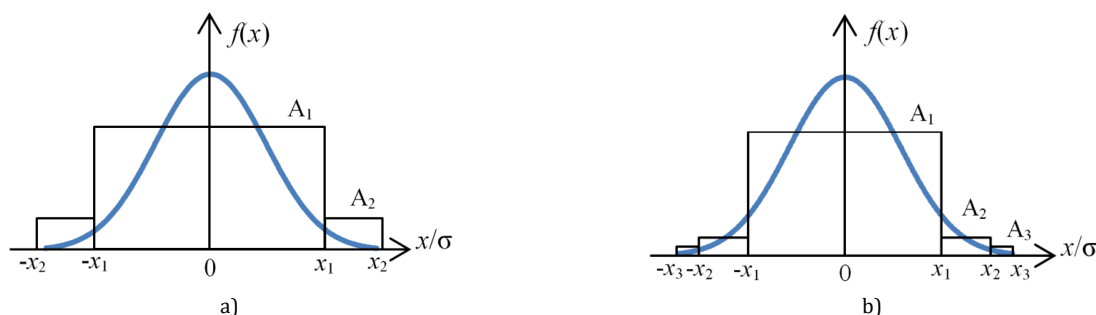


Рис. 4. Аппроксимация ступенчатой функцией нормального закона распределения сигналов в созвездии

Fig. 4. Approximation by a Step Function of the Normal Law of Signal Distribution in a Constellation

Принято, что область возможных значений аргумента нормального закона распределения: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$, где значение x выражено в единицах σ и ограничено пределами $\pm 3\sigma$.

На рисунке 4 обозначено x_i – верхняя граница ширины i -й ступеньки, A_i – высота ступенек, которые определены с учетом ширины ступенек:

$$A_1 = P_1/2x_1, A_2 = P_2/(2(x_2 - x_1)), \\ A_3 = P_3/(2(x_3 - x_2)),$$

где P_i – вероятность появления сигналов в определенном кольце А, В, С. В ступенчатой функции, в соответствии с принятым правилом деления на кольца, для варианта двух колец ширина первой ступеньки в 4 раза превышает ширину второй (при 8,25 бит/символ). В варианте 3-х колец и более ширина первой ступеньки в 2 раза превышает ширину второй, и далее ширина каждой очередной ступеньки в 2 раза превышает ширину последующей.

Ошибка аппроксимации $\epsilon(x)$ является четной функцией, поэтому можно ограничиться областью положительных значений от 0 до 3σ .

Средний квадрат ошибки (СКО) вычисляется по выражению:

$$\epsilon^2(x) = \sum_{m=1}^3 \int_{x_{m,i-1}}^{x_{m,i}} (A_i - f(x))^2 dx, \quad (2)$$

где $x_{m,i-1}$, $x_{m,i}$ – нижняя и верхняя границы для положительных значений аргумента колец $m = 1, 2$ и 3 , что соответствует кольцам А, В и С.

Рассмотрим подробнее выражение СКО на участке кольца А. Выражения для остальных колец аналогичны, отличия в значениях границ колец и высоты ступеньки:

$$\epsilon_A^2(x) = \int_a^b (A_1 - f(x))^2 dx = \\ = A_1^2(b - a) - 2A_1 \int_a^b f(x) dx + \int_a^b f^2(x) dx,$$

где a и b – нижняя и верхняя границы кольца А для положительных значений аргумента.

Учтем, что $\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$, где $F(x)$ – функция распределения нормального закона в интегральной форме. Примем во внимание, что $f^2(x) = \frac{1}{2\pi} \exp(-x^2)$ является также функцией с нормальным законом распределения, но отличается величиной множителя в показателе экспоненты и перед ней.

После замены переменной $x = x_1/\sqrt{2}$ в третьем слагаемом в формуле (2) можно привести выражение для СКО для кольца А к следующему виду:

$$\epsilon_A^2(x) = \int_a^b (A_1 - f(x))^2 dx = \\ = A_1^2(b - a) - 2(A_1)(F(b) - F(a)) + \\ + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} (F(b\sqrt{2}) - F(a\sqrt{2})). \quad (3)$$

Используя формулу (3) для расчетов выражения (2), получим значения СКО при аппроксимации нормального закона распределения сигналов ступенчатой функцией, рассчитанные при передаче с удельной скоростью 8,25 бит/символ (2 кольца) и 6,75 (3 кольца), которые приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Рассчитанные значения СКО

TABLE 3. MSR Values Estimated

Количество колец	2	3
СКО, неравномерное распределение	0,0479	0,0466
СКО, равномерное распределение	0,0603	0,0603
Выигрыш по СКО, дБ	1,0	1,12

Из данных таблицы 3 следует, что при увеличении количества колец значение СКО уменьшается, но незначительно. Такой характер изменения СКО при увеличении количества колец качественно соответствует ранее приведенной закономерности выигрыша в мощности сигналов созвездия. Это объясняется тем, что при увеличении количества колец их ширина уменьшается по степенному закону 2^N , это приводит к уменьшению влияния каждого по-

следующего кольца на величину выигрыша. Поэтому, исходя из простоты реализации, использование 2–3-х колец в созвездии является разумным компромиссом между сложностью и достигаемым выигрышем в помехоустойчивости при кодировании дробного числа бит по предлагаемому методу.

Для оценки вероятности битовой ошибки для выбранных созвездий, содержащих M сигнальных точек, представляется возможным использовать расчетную формулу для созвездий с QAM для четного значения $k = \log_2 M$:

$$P_B \approx \frac{2(1 - L^{-1})}{\log_2 L} Q \left(\sqrt{\frac{(3 \log_2 L) 2E_b}{L^2 - 1} \frac{1}{N_0}} \right) \quad (4)$$

или воспользоваться формулой верхней границы коэффициента ошибок для произвольного значения $k \geq 1$ [11]:

$$P_B \leq \left(1 - \left(1 - 2Q \left(\sqrt{\frac{3k}{M-1} \frac{E_b}{N_0}} \right) \right)^2 \right) / k. \quad (5)$$

В этих выражениях $L = \sqrt{M}$, $h^2 = E_b/N_0$ – отношение энергии бита к спектральной плотности помехи, где $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du.$$

При использовании формул (4 и 5) для исследуемых созвездий в значение отношения сигнал/помеха h^2 аналогично [5] вводится поправочный коэффициент $Y = P_{\text{исх}}/P_M$ и вместо h^2 используется значение Yh^2 . В поправочном коэффициенте $P_{\text{исх}}$ – средняя мощность символов исходного созвездия на основе которого сформировано используемое, P_M – средняя мощность символов используемого созвездия с учетом неравновероятного распределения вероятностей сигналов в нем и перехода от квадратного (крестообразного) созвездия к скругленному. Отметим, что в рассматриваемых созвездиях величина минимального евклидова расстояния между сигнальными точками в исходном и используемом созвездиях одинаковы.

На рисунке 5 представлены графики зависимости вероятности битовой ошибки P_B от отношения сигнал/помеха. Для созвездия с удельной скоростью 6,75 бит/символ (112 точек) в качестве исходного использовано созвездие с 128-QAM (при $Y = 1,128$), и кривые построены на основе выражения (5). Для созвездия с удельной скоростью 8,25 бит/символ (320 точек) в качестве исходного использовано созвездие с 256-QAM (при $Y = 0,903$), и при расчете коэффициента ошибок применена формула (4).

Поскольку альтернативой применения скорости 8,25 бит/символ является целочисленная скорость 9 бит/символ, для этого случая также на рисунке 5 приведена соответствующая кривая помехоустойчивости, вычисленная по формуле (5).

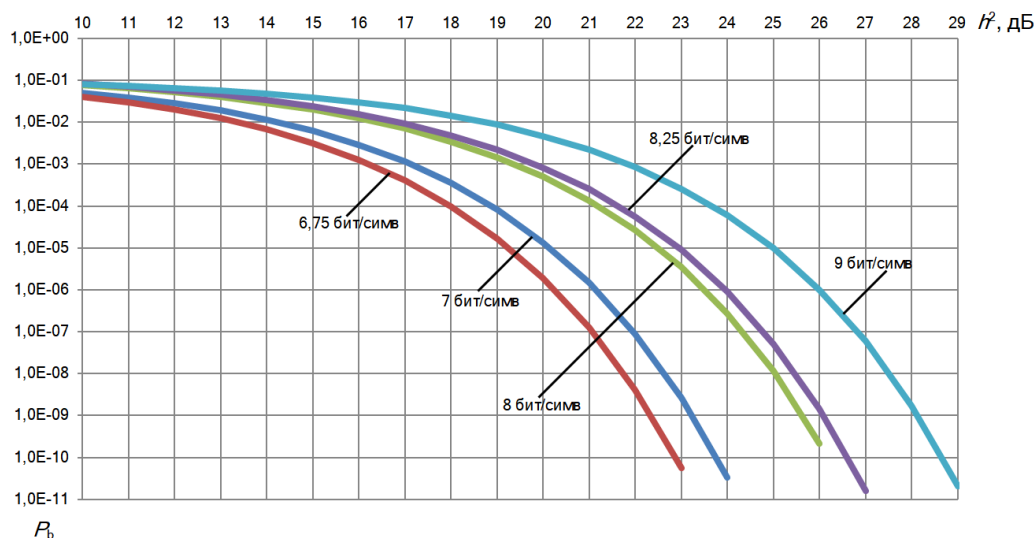


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки P_B от отношения сигнал/помеха

Fig. 5. Dependencies of the Bit Error Probability P_B on the Signal-to-Noise Ratio

Из рисунка 5 видно, что при вероятности ошибки $1 \cdot 10^{-8}$ выигрыш в помехоустойчивости для скорости 6,75 по сравнению с целочисленной скоростью 7 бит/символ (исходное созвездие) составляет около 0,9 дБ, для скорости 8,25 – около 2,1 дБ по сравнению с целочисленной скоростью 9 бит/символ.

Отметим, что отличия значений в помехоустойчивости между исходным созвездием с 7 и применяемым созвездием с 6,75 бит/символ, и между исходным с 8 бит/символ и применяемым созвездием 8,25 близки к значениям $10 \lg Y$, т. е. 0,89 и –0,44 дБ, соответственно. Таким образом, изменения в поме-

хоустойчивости созвездий с дробными скоростями по сравнению с исходными созвездиями, использующими целочисленные значения удельной скорости, соответствуют ожидаемым.

Формирование блока и отображение сигналов

Во входную информационную последовательность в начале каждого цикла вставляются биты синхросигнала и служебного канала (в ФЦ на рисунке 1). В многомерном кодере полученная последовательность делится на сигнальные блоки в зависимости от скорости передачи либо по $4n + 1$, либо по $4n + 3$ бит каждый. Разбиение блока длиной $4n + 1$ бит при передаче одной четверти бит на символ проводится исходя из значений первых трех бит в блоке. Если первый бит равен нулю, то передаются 4 символа из кольца А. В противном случае с учетом значений второго и третьего битов блока передается одна из 4-х возможных комбинаций символов колец: $3A+B$, $2A+B+A$, $A+B+2A$ и $B+3A$.

Разбиение блока из $4n + 3$ бит на биты, формирующие 4 последовательных символа, предлагается провести в два этапа: сначала производится разбиение на подблоки, а затем последние делятся на символы.

Рассмотрим процедуру разбиения на подблоки. Сначала определяется значение первого бита блока. Если этот бит равен нулю, то последующие $4n + 2$ бит блока делятся на два подблока по $2n + 1$ бит в каждом. Если же первый бит блока равен 1, то при втором бите блока равном нулю последующие $4n + 1$ бит делятся на первый подблок из $2n + 1$ бит и второй подблок из $2n$ бит. Если же первые два бита блока равны 1, то последующие $4n + 1$ бит делятся на первый подблок из $2n$ бит и второй подблок из $2n + 1$ бит.

Затем осуществляется процедура разбиения подблоков. Если в подблоке из $2n + 1$ бит первый бит равен нулю, то оставшиеся $2n$ бит подблока делятся на два символа кольца А по n бит каждый. Если в подблоке из $2n + 1$ бит первый бит равен 1, то при втором бите подблока равном нулю оставшиеся $2n - 1$ бит подблока делятся на символы из кольца А (n бит) и кольца В ($n - 1$ бит). Если в подблоке из $2n + 1$ бит первый и второй биты подблока равны 1, то оставшиеся $2n - 1$ бит подблока делятся на символы из кольца В и кольца А.

Если в подблоке из $2n$ бит первый и второй биты равны нулю, то оставшиеся $2n - 2$ бит подблока делятся на символы из кольца А и кольца С ($n - 2$ бит). Если в подблоке из $2n$ бит первый бит равен 0, то при втором бите подблока равном 1 оставшиеся $2n - 2$ бит делятся на символы из кольца С и кольца А. Если в подблоке из $2n$ бит первый бит равен 1, то при втором бите подблока равном 0 оставшиеся $2n - 2$ бит делятся на два символа из кольца В каждый. Если в подблоке из $2n$ бит первые два бита

равны 1, то при третьем бите подблока равном 0, оставшиеся $2n - 3$ бит делятся на символы из кольца В и кольца С. Если в подблоке из $2n$ бит первые три бита равны 1, то оставшиеся $2n - 3$ бит делятся на символы из кольца С и кольца В.

На основе проведенного разбиения сигнальных блоков формируется управляющий сигнал для блока отображения групп бит в координаты точек сигнального созвездия (кольца А, В или С).

В узле отображения решетчатого кодера по комбинациям двоичных сигналов на выходе сверточного кодера и значениям управляющих сигналов производится отображение информационных бит в координаты точек сигнального созвездия.

Выбор структуры циклового синхросигнала

Для осуществления декодирования необходимо обозначить на передаче границы сигнальных блоков, что удобно совместить с синхросигналом цикла кодера Рида – Соломона и формировать его в виде специального многомерного сигнала. Ниже приводится пример формирования синхросигнала для передачи трех четвертей бита на символ при скорости 6,75 бит/символ, случай формирования синхросигнала при передаче одной четверти бит на символ выполняется аналогично.

С целью повышения помехоустойчивости опознавания границ циклов желательно формировать синхросигнал с наибольшей мощностью. При этом синхросигнал можно формировать из двух двумерных символов кольца В, поскольку комбинация из двух символов кольца С является неразрешенной. Для формирования такой структуры синхросигнала в соответствии с вышеописанной процедурой первые 4 бита синхросигнала должны быть 1110. Последующие три бита кодовой комбинации, соответствующей символам синхросигнала выбираем, например, 010. Для задания координат двумерного символа необходимы еще три бита, абсолютные значения которых не имеют значения, поскольку их значения по двум входным битам вычисляются в кодере относительности и сверточном кодере. Изменение значений указанных трех бит приводят к вращению двумерной точки.

Поскольку информация о синхросигнале заложена в амплитуде сигналов кольца В, которая кодируется тремя битами 010, то в кодовых комбинациях на входе сверточного кодера каждого из двух двумерных символов синхросигнала освобождаются по два свободных бита, которые можно использовать для увеличения скорости передачи сигналов служебного канала. В этом случае синхрогруппу на входе сверточного кодера можно представить в виде 1110 010xx 010xx, где символом 'x' обозначены дополнительные биты служебного канала.

Процедура декодирования

Процедура декодирования включает в себя предварительное вхождение в цикловый синхронизм и проводится по завершению приема 4-х двумерных символов (сигнального блока) и заключается в определении:

- метки начала цикла, которая также дает возможность отметить начало каждого сигнального блока, входящего в цикл;
- принадлежности сигнальных точек к кольцам А, В или С (по координатам сигнальных точек) для определения комбинаций начальных бит блока и подблоков, разделяющих блок из $4n + 3$ (или $4n + 1$) бит на 4 двумерных символа, и создания соответствующих управляющих сигналов для выбора раздела таблицы декодирования;
- комбинаций бит, соответствующих координатам сигнальных точек на передающей стороне с учетом управляющих сигналов, определяющих раздел таблицы декодирования.

Дальнейшее изложение ведется применительно к декодированию при скорости три четверти бит на символ, декодирование при скорости одна четверть бит на символ выполняется аналогично.

Определение начальных бит блоков и подблоков проводится на основе анализа типов колец в двух парах двумерных символов, входящих в состав блока. Сначала по каждой паре символов определяются начальные биты данной пары и количество бит, которое эти символы представляют. Затем по типам пар символов (пара из $2n + 1$ бит или из $2n$ бит) в блоке выносится решение о начальных комбинациях бит 4-символьного сигнального блока.

Список источников

1. Egorov V.A., Mendelson M.A. Method Coding of QAM Signals for Transmission Fractional Number Bit per Symbol // Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Circuits and System for Communications (St. Petersburg, Russia, 26–28 June 2002). IEEE, 2002. DOI:10.1109/OCCSC.2002.1029079
2. Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125–219. DOI:10.24412/2410-9916-2023-1-125-219
3. Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 2. Исследование достигаемого повышения скорости передачи данных. // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 220–243. DOI:10.24412/2410-9916-2023-1-220-243
4. Дворников С.В., Пшеничников А.В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 221–228. DOI:10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228
5. Дворников С.С. Обоснование эмпирического выражения для оценки помехоустойчивости сигналов квадратурной модуляции // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-6-13
6. Пантенков Д.Г. Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Часть 1. Методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 60–79. DOI:10.31854/1813-324X-2020-2-60-78.
7. Rec. ITU-T V.34 (02/98). A Modem Operating at data signalling rates of up to 33 600 bit/s for use on the general switched telephone network and on leased point-to-point 2-wire telephone-type circuits.
8. Бакулин М.Г., Григорьев В.А., Крейнделин В.Б., Лагутенко И.О. Синтез многомерных созвездий сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 4. С. 344–353. DOI:10.7868/S0033849417040015

Поскольку не все возможные комбинации колец используются, то возможно обнаружение ошибки в принятом сигнале по приему недопустимой комбинации чередования символов колец.

Предложенный метод кодирования использован при разработке адаптивного модема с удельными скоростями от 1,0 до 8,25 бит/символ, испытания которого подтвердили достоверность полученных результатов.

Выводы

В этой работе предложен метод кодирования и декодирования АФМ-сигналов при передаче дробного числа бит/символ, который является достаточно простым и не требует значительных вычислительных затрат.

Приведена оценка помехоустойчивости сигналов при передаче дробного числа бит/символ на примере рассматриваемых созвездий. Показано, что получаемый выигрыш по сравнению с передачей целого числа бит/символ соответствует ожидаемому.

Кроме того, предложен метод формирования циклового синхросигнала, который, наряду с указанием границ сигнальных блоков, указывает на границы циклов внешнего кодера Рида – Соломона.

Предложенный метод кодирования может быть использован при построении высокоскоростных модемов, и, особенно, их модернизации с целью увеличения скорости передачи при ограниченных вычислительных ресурсах.

9. Forney G., Gallager R., Lang G., Longstaff F., Qureshi S. Efficient modulation for band-limited channels // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1984. Vol. 2. Iss. 5. PP. 632–647. DOI:10.1109/JSAC.1984.1146101
10. Полушин П.А., Раджабов У.М., Лось В.О. О возможности плавной регулировки скорости передачи многоуровневых цифровых сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 1(41). С. 46–54.
11. Прокис Д.Д. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 797 с.

References

1. Egorov V.A., Mendelson M.A. Method Coding of QAM Signals for Transmission Fractional Number Bit per Symbol. *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Circuits and System for Communications, 26–28 June 2002, St. Petersburg, Russia*. IEEE; 2002. DOI:10.1109/OCCSC.2002.1029079
2. Ivanov M.S., Shushkov A.V., Makarenko S.I. Increasing the data transmission rate in the air radio network of aircrafts controlling due to adaptive use of energy, signal and frequency resources of network. Part 1. Models and method of the data transmission rate increasing. *Systems of Control, Communication and Security*. 2023;1:125–219. DOI:10.24412/2410-9916-2023-1-125-219
3. Ivanov M.S., Shushkov A.V., Makarenko S.I. Increasing the data transmission rate in the air radio network of aircrafts controlling due to adaptive use of energy, signal and frequency resources of network. Part 2. Investigation of the achieved increase in data transfer rate. *Systems of Control, Communication and Security*. 2023;1:220–243. DOI:10.24412/2410-9916-2023-1-220-243
4. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V. Design of spectral-efficient signal construction in radio data transmission control and measuring complexes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017;60(3):221–228. DOI:10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228
5. Dvornikov S. Justification of the Empirical Expression for Assessing the Noise Immunity of Quadrature Modulation Signals. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(1):6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-6-13
6. Pantenkov D.G. Methodological Approach to Integrated Effectiveness Assessment Apply of Aviation Systems with UAVs. Part 1. Evaluation Methods for Effectiveness of Solving Radio Communication and Remote Monitoring Tasks. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2020;6(2):60–78. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-60-78
7. Rec. ITU-T V.34. A Modem Operating at data signalling rates of up to 33 600 bit/s for use on the general switched telephone network and on leased point-to-point 2-wire telephone-type circuits. 1998.
8. Bakulin M.G., Grigor'ev V.A., Lagutenko I.O., Kreindelin V.B. Synthesis of Multidimensional Signal Constellations with Quadrature Amplitude Modulation. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017;62(4):371–379. DOI:10.7868/S0033849417040015
9. Forney G.D., Gallager R.G., Lang G.R., Logstaff F.M., Qureshi S.V. Efficient modulation for band-limited channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1984;2(5):632–647. DOI:10.1109/JSAC.1984.1146101
10. Polushin P.A., Radjabov U.M., Los V.O. Possibility of Smooth regulation of Multilevel Digital Signals Transmission Rate. *Radiotechnical and Telecommunication Systems*. 2021;1(41):46–54.
11. Proakis J.G. *Digital Communication*. New York: Mc Graw-Hill, 1995.

Информация об авторах:

МЕНДЕЛЬСОН
Марк Александрович

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории систем вторичного уплотнения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-8154-7969>

ЕГОРОВ
Вадим Анатольевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории систем вторичного уплотнения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0008-9584-0403>

КОПЫЛОВ
Дмитрий Андреевич

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории систем вторичного уплотнения Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0008-5547-8024>

Научная статья

УДК 621.396.677

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63



Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона.

Часть 1. Модель двух радиолиний

Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Эволюция сетей радиодоступа (СРД) 1G–4G за последние 40 лет показала, что возможности диаграммообразования (ДО) добавляют дополнительное пространственное измерение в традиционные методы мультиплексирования устройств. При формировании базовыми станциями gNB (gNodeB) и пользовательскими устройствами UE (User Equipment) узких диаграмм направленности антенны (ДНА) помимо частотного, временного и кодового разделения каналов появляется дополнительное пространственное измерение, реализующее пространственное мультиплексирование. Данная концепция известна уже достаточно давно, однако полноценная реализации ее возможностей на практике ожидается с широким распространением сверхплотных СРД диапазона миллиметровых волн (ММВ) пятого (5G) и последующих (B5G) поколений. Для управления ДНА может использоваться подход предварительного анализа обучающих последовательностей о текущей обстановке в радиоканале CSI (Channel State Information), однако его накладные расходы становятся неприемлемо высокими в условиях сверхплотного распределения устройств. Альтернативным подходом является ДО на основе позиционирования. Обоснованность, актуальность и перспективность данного подхода определяется тем фактом, что для сетей 5G, в отличие от предыдущих поколений, впервые формализованы требования к точности позиционирования UE до одного метра. Первоначальные исследования в области ДО на основе позиционирования уже проводились на протяжении последних лет, однако преимущественно для частных сценариев одной или нескольких радиолиний между gNB и стационарными UE. В настоящей работе впервые формализована и программно реализована научно-обоснованная методология управления ДНА стационарной gNB на основе позиционирования подвижного UE для сценария двух радиолиний. Проблемой практической реализации ДО является сложно прогнозируемый уровень помех вследствие взаимного влияния радиолиний с подвижными UE. При оценке мгновенного отношения сигнал/помеха в сценарии двух радиолиний между двумя стационарными gNB, которые осуществляют ДО на основе текущего местоположения подвижных UE в процессе их перемещения, необходимо учитывать взаимное влияние радиолиний друг на друга. В таком сценарии передатчик в одной радиолинии выступает одновременно и как источник полезного сигнала для одного подвижного приемника, и как источник мешающего сигнала для другого подвижного приемника. Задача оценки помех для такого сценария усложняется нелинейностью ДНА передатчика и/или приемника. Разработанная и программно реализованная в настоящей работе модель использует функции пакета расширения Phased Array System Toolbox Matlab. Результаты моделирования показывают существенный разброс (десятки дБ) мгновенного отношения сигнал/помеха в зависимости от территориального разнеса устройств и могут быть использованы при обосновании сценариев построения и функционирования сверхплотных СРД 5G/B5G.

Ключевые слова: диаграммообразование, позиционирование, сверхплотная сеть радиодоступа, диапазон миллиметровых волн, радиолиния, Phased Array System Toolbox

Источник финансирования: работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 22-29-00528, <https://rscf.ru/project/22-29-00528>.

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63

Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks.

Part 1. Model of Two Links

 Grigoriy Fokin, fokin.ga@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The evolution of 1G to 4G radio access networks (RANs) over the past 40 years has shown that beamforming (BF) capabilities add an additional spatial dimension to traditional device multiplexing methods. When base stations (gNodeB - gNB) and user equipment (UE) form narrow antenna radiation patterns (APPs), in addition to frequency, time and code division of channels, an additional spatial dimension appears that implements spatial multiplexing. This concept has been known for quite a long time, but the full implementation of its capabilities in practice is expected with the widespread adoption of millimeter wave (mmWave) ultra-dense networks (UDN) of the fifth (5G) and subsequent (B5G) generations. To control APP, the approach of preliminary analysis of training sequences about the current situation in the radio channel - CSI (Channel State Information) - can be used, but its overhead costs become unacceptably high in conditions of ultra-dense distribution of devices. An alternative approach is positioning-based BF. The validity, relevance and prospects of this approach are determined by the fact that for 5G networks, unlike previous generations, for the first time the requirements for UE positioning accuracy up to one meter are formalized. Initial research in the field of location-aware BF has already been carried out over the past years, however, mainly for particular scenarios of one or more radio links between gNBs and fixed UEs. In this work, for the first time, a scientifically based methodology for controlling the beam pattern of a stationary gNB based on the positioning of a mobile UE for a two-radio link scenario is formalized and implemented in software. The problem of practical implementation of BF is the difficulties to predict level of interference due to the mutual influence of radio links with mobile UEs. When estimating the instantaneous signal-to-interference ratio in a two-radio link scenario between two fixed gNBs that perform BF based on the current location of mobile UEs as they move, it is necessary to take into account the mutual influence of each other's radio links on each other. In such a scenario, a transmitter on one radio link acts both as a source of a wanted signal for one UE and as a source of an interfering signal for another UE. The task of assessing interference for such a scenario is complicated by the nonlinearity of the transmitter and/or receiver ARPs. The model developed and implemented in software in this work uses the functions of the Phased Array System Toolbox Matlab extension package. The simulation results show a significant scatter (tens of dB) of the instantaneous signal-to-interference ratio depending on the territorial separation of devices and can be used to justify scenarios for the construction and operation of 5G/B5G UDN.

Keywords: beamforming, positioning, ultra-dense radio access network, millimeter wave band, radio link, Phased Array System Toolbox

Funding: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00528, <https://rscf.ru/project/22-29-00528>

For citation: Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63

1. Введение

1.1. Предпосылки развития диаграммообразования на основе позиционирования в сетях связи

Цифровые сети радиодоступа (СРД) 2G–3G дециметрового диапазона волн функционировали преимущественно со всенаправленными антеннами у пользовательских устройств (UE, аббр. от англ. User Equipment) и секторными антеннами у базовых станций. Методология построения сетей 2G GSM с частотно-временным разделением каналов

использует модель кластера, которая для поддержания требуемого уровня внутрисистемных помех устанавливает в первом приближении допустимый территориальный разнос приемопередающих устройств, использующих одинаковый частотно-временной ресурс. Методология функционирования сетей 3G UMTS с кодовым разделением каналов использует быстрое централизованное управление мощностью передатчиков для поддержания допустимого уровня внутрисистемных помех в своей и соседних сотах [1].

Использование пространственной обработки сигналов (ПОС) за счет многоэлементных антенных решеток (АР) на приемопередатчиках базовых станций получило распространение в сетях радиодоступа 4G LTE. Основными режимами работы при этом являлись разнесенная передача в канале «вниз» – DL (Downlink: gNB → UE) от базовой станции к UE, разнесенный прием в канале «вверх» UL – (Uplink: UE → gNB) от UE к базовой станции и ПОС в канале «вниз» в однопользовательском режиме – SU-MIMO (аббр. от англ. Single-User Multiple-Input and Multiple-Output). Реализовать АР с пространственной обработкой в портативных подвижных UE не позволял дециметровый диапазон волн. Для функционирования многопользовательской пространственной обработки – MU-MIMO (аббр. от англ. Multi-User MIMO) требуются системы massive MIMO с числом элементов АР, не менее числа устройств в данной соте; обычно под massive MIMO понимают систему с числом элементов от 64 и выше [1]. Системы massive MIMO могут работать как в режиме ПОС, так и в режиме диаграммообразования (ДО) – формирования узкого луча при работе на передачу и/или на прием. Возможность реализации таких систем в портативных подвижных UE становится возможной с переходом в диапазон миллиметровых волн (MMB) в СРД пятого (5G) и последующих поколений B5G (Beyond 5G). Дополнительным стимулом к использованию режима ДО в каналах UL и DL является новая устройство-центрическая архитектура функционирования СРД, в том числе, непосредственная связь устройств друг с другом в режиме D2D (аббр. от англ. Device-to-Device) в сверхплотных сетях (UDN, аббр. от англ. Ultra Dense Network) [1].

Возможности ДО на передаче и приеме у стационарных базовых станций gNB и подвижных UE позволяют уплотнить приемопередатчики на уровне СРД и реализовать концепцию пространственного мультиплексирования (SDMA, аббр. от англ. Space-Division Multiple Access), а также компенсировать существенные потери при распространении радиоволн (РРВ) диапазона MMB (аббр. от англ. mmWave – Millimeter-Wave) за счет более высоких коэффициентов усиления (КУ) диаграмм направленности антенн (ДНА) с узкими лучами. Однако вместе с новыми возможностями ДО устройств приводит и к новым вызовам при построении и функционировании сети радиодоступа, а также к новым проблемам управления образующими ее подвижными устройствами UE [2].

Если ранее задача управления мобильностью и радиоресурсами на уровне СРД, в том числе при поддержании допустимого уровня внутрисистемных помех, решалась частотно-территориальным планированием и централизованным управлением, то в сверхплотных СРД диапазона MMB с устройство-центрической архитектурой ДО устройств в данной

соте и в соседних сотах является нетривиальной задачей и представляет собой актуальную научную проблему. Одним из инструментов ее решения является использование сетевого позиционирования, т. е. данных о местоположении устройств для реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи; в зарубежной литературе данный подход получил название LAC (аббр. от англ. Location-Aware Communication) [3]. Примером использования LAC в когнитивных СРД является совместное использование спектра первичными и вторичными источниками радиоизлучения за счет их предварительного позиционирования для исключения помех [4].

Таким образом, ДО на основе местоположения устройств, которое в зарубежных источниках называют LAB (аббр. от англ. Location Aware Beamforming), является актуальным направлением исследований для реализации пространственного уплотнения одновременных передач SDMA в сверхплотных СРД при переходе в диапазон MMB с миниатюризацией устройств massive MIMO [5–7].

1.2. Проблема оценки помех в сверхплотных сетях радиодоступа с диаграммообразованием на основе позиционирования

Тенденция построения сверхплотных СРД заключается в существенном повышении плотности базовых станций gNB и UE по сравнению с сетями предыдущих поколений. Для UDN 5G/B5G поколений характерна плотность территориального распределения базовых станций gNB и подвижных UE – до одного устройства на 1 м². Следствием этого, с точки зрения организации радиосвязи, являются высокая вероятность наличия прямой видимости (LOS, аббр. от англ. Line of Sight) в радиолиниях gNB – UE и/или UE – UE на расстоянии от единиц до нескольких десятков метров, а также высокий уровень внутрисистемных помех из-за близкого расположения одновременно работающих приемопередающих устройств. Серьезной проблемой практической реализации UDN является поддержание допустимого уровня внутрисистемных помех. Компенсация внутрисистемных помех с пространственным уплотнением одновременных передач SDMA в сверхплотных СРД достигается адаптивным формированием ДНА для полезных и мешающих сигналов. Пространственная селекция сигналов при работе на передачу и прием выполняется следующим образом: для источников внутрисистемных помех (SNOI, аббр. от англ. Signal of No Interest) формируются нули ДНА в соответствующих направлениях, а для полезного сигнала (SOI, аббр. от англ. Signal of Interest) – ДНА с максимальным усилением. Условием ДО с провалами ДНА в направлениях SNOI и максимумами ДНА в направлении SOI служит предварительная осведомленность передающего и принимающего устройств, образующих радиолинию,

об относительных угловых расположениях друг друга. Определение направлений прихода AOA/DOA (аббр. от англ. Angle/Direction of Arrival) сигналов SOI/SNOI с последующим ДО на прием и передачу является составной частью ДО на основе местоположения LAB [8–16].

К преимуществам LAB по сравнению с ДО на основе традиционного подхода анализа данных о текущей обстановке в радиоканале (CSI, аббр. от англ. Channel State Information) относится возможность оперативно формировать луч на передачу и/или прием без необходимости предварительного анализа обучающих последовательностей, накладные расходы на обработку которых в условиях сверхплотного распределения как подвижных UE, так и стационарных базовых станций gNB становятся неприемлемо высокими. Дополнительной проблемой LAB на уровне СРД является сложность прогноза степени влияния внутрисистемных помех, обусловленных сверхплотным распределением устройств и их децентрализованным взаимодействием при переходе от сотово-центрической к устройство-центрической распределенной архитектуре. Предварительный анализ степени подавления помех за счет адаптивного ДО при случайном распределении устройств показывает, что сужение ширины ДНА по уровню половинной мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях приводит к существенному повышению радиопокрытия и подавлению помех [8–10].

Изложенные обстоятельства позволяют рассматривать ДО на основе позиционирования устройств, как актуальную научную проблему, значимость решения которой служит цели повышения эффективности построения и функционирования сверхплотной СРД диапазона ММВ 5G/B5G в условиях роста внутрисистемных помех вследствие повышения плотности одновременно работающих приемопередающих устройств до одного устройства на 1 м² без необходимости пропорционального увеличения частотно-временного ресурса.

1.3. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследования

Исследования в области ДО на основе позиционирования уже проводились на протяжении последних лет, однако преимущественно для сценария стационарных устройств [17–45]. Для подвижных устройств проблема оценки помех в радиоприемах с ДО осложняется зависимостью мгновенного отношения сигнал/помеха (SIR, Signal to Interference Ratio) от текущего пространственного разнеса устройств, а также нелинейностью ДНА [46–48].

Более десяти лет назад было опубликовано исследование под руководством T.S. Rappaport [17] по результатам измерений параметров радиоканала диапазона ММВ с использованием AP, работающих

в режиме ДО на передачу и прием, которые в целом подтвердили практическую реализуемость концепции LAB. В [18] авторы обосновали необходимость учета ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях для пространственных сценариев UDN. Современное состояние, проблемы и перспективы использования систем massive MIMO в СРД систематизированы в [19]. В работе [20] впервые был введен термин так называемого трехмерного ДО (англ. 3D Beamforming) для сетей 5G; в частности, показан значительный эффект от управления лучом при его адаптации как по азимуту, так и по углу места. Один из первых программно-аппаратных прототипов гибридного ДО для сетей 5G с результатами экспериментальной апробации описан в [21]. В исследовании [22] помимо преимуществ многоантенных систем massive MIMO обозначены проблемы их практической реализации, в частности, накладные расходы, связанные с CSI. В работе [23] обозначены предпочтительные сценарии режимов работы многоантенных систем, включая SDMA и ДО. Целесообразность использования направлений прихода AOA/DOA и ухода AOD/DOD (аббр. от англ. Angle/Direction of Departure) в многоэлементных AP исследуется в [24]. Фундаментальный обзор по известным моделям и методам диаграммообразования в системах радиосвязи диапазона ММВ, включая ДО по местоположению, представлен в [25]. Модели радиоканала миллиметровых волн, включая широкий спектр сценариев LOS, предпочтительных для систем LAB, систематизированы под руководством T.S. Rappaport в [26]. Фундаментальный обзор моделей и методов пространственной обработки сигналов в MIMO системах диапазона ММВ, в том числе, на основе CSI, представлен в [27]. Перспективы практического использования систем massive MIMO, включая карманный радар, описаны в [28]. Проблемы управления лучом в сверхплотных СРД 5G/B5G сформулированы в [29, 30].

Одним из первых исследований по ДО на основе местоположения является [31], где погрешность местоположения устройства на плоскости связывается с шириной луча в горизонтальной плоскости. Анализируя состояние проблемы в области LAB особо стоит отметить цикл работ под руководством R.W. Heath [32–36], в которых вопросы управления лучом исследуются для сценариев движения устройств в отдельной радиоприеме. Работы [37–43] связаны тем обстоятельством, что в них комплексно исследуется влияние плотности приемопередающих устройств на уровень внутрисистемных помех СРД, образованной совокупностью радиоприемов из устройств, работающих в режиме ДО. Стоит отметить появление не только публикаций, но и зарубежных патентов в области ДО на основе местоположения [44, 45].

Проведенный анализ состояния проблемы в области LAB по открытым зарубежным источникам

показал, что для комплексной разработки методологии управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД необходимо учитывать совокупность условий построения сетей и сценариев функционирования устройств 5G/B5G, в том числе: а) точность и скорость позиционирования устройств; б) конфигурацию АР стационарных и подвижных UE; в) точность и скорость ДО и/или определения направления прихода сигнала; г) географическую протяженность, подвижность и плотность подвижных и стационарных устройств.

Также проведенный анализ показал целесообразность разработки моделей LAB для сценариев: а) отдельной радиолинии; б) двух радиолиний; в) совокупности радиолиний одной соты; г) совокупности сот СРД.

Настоящее исследование посвящено формализации и программной реализации научно-обоснованной методологии управления ДНА на основе позиционирования подвижных устройств UE базовыми станциями gNB сверхплотных СРД 5G/B5G диапазона ММВ для сценария двух радиолиний.

Объектом исследования является сверхплотная СРД 5G/B5G.

Предметом исследования является комплекс моделей и методов управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотной СРД 5G/B5G.

Методом исследования является имитационное моделирование в специальном программном обеспечении Matlab с функциями [49–58] пакета расширения Phased Array System Toolbox [59].

Целью исследования является разработка методологии управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД 5G/B5G.

В настоящей работе впервые формализована и программно реализована научно-обоснованная методология управления ДНА стационарной базовой станции на основе позиционирования UE диапазона ММВ в составе сверхплотных СРД 5G/B5G для сценария двух радиолиний при условии движения устройств UE.

Материал исследования организован далее следующим образом. В разделе 2 выполнена формализация модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования. Раздел 3 содержит описание программной реализации модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования, которая доступна в [60]. Результаты оценки помех в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования систематизированы в разделе 4. Выводы и направления дальнейших исследований сформулированы в разделе 5.

2. Формализация модели двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

2.1. Постановка задачи моделирования двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

Формализуем порядок работы имитационной модели для исследования показателей функционирования двух радиолиний с ДО на основе позиционирования. Рисунок 1 иллюстрирует сценарий оценки помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования.

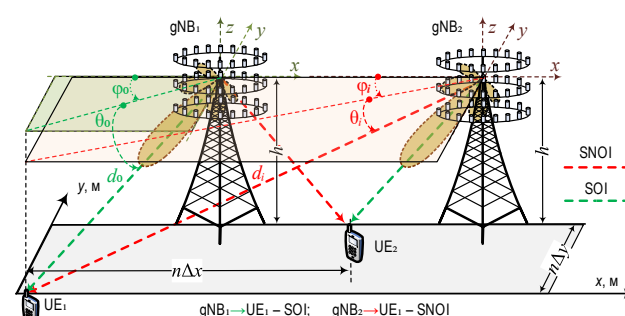


Рис. 1. Сценарий работы имитационной модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования

Fig. 1. Simulation Model Operation Scenario of Two Radio Links with Location-Aware Beamforming

Имитационная модель воспроизводит работу двух стационарных базовых станций gNB₁ и gNB₂ и двух подвижных пользовательских устройств UE₁ и UE₂. Базовые станции gNB работают на передачу в режиме адаптивного ДО на основе позиционирования UE с прямоугольной АР (URA, аббр. от англ. Uniform Rectangular Array); UE при этом работают на прием с ненаправленными антеннами. Первая радиолиния SOI организована между gNB₁ и UE₁, вторая – между gNB₂ и UE₂. При одновременной работе в одном диапазоне частот данные радиолинии создают друг другу взаимные помехи: первая радиолиния SNOI получается вследствие боковых лепестков gNB₁ в направлении UE₂, вторая – вследствие боковых лепестков gNB₂ в направлении UE₁. Необходимость исследования работы двух радиолиний с ДО на основе позиционирования обусловлена нелинейностью диаграммы направленности URA. Для оценки мгновенного отношения SIR при движении UE с учетом коэффициентов усиления АР на базовых станциях gNB необходимо учитывать взаимное мгновенное территориальное распределение передатчика gNB и приемника UE сигналов и помех в радиолиниях SOI и SNOI. Подробно концепция ДО на основе позиционирования в сверхплотных СРД диапазона ММВ изложена в [1, 2]. Далее формализуем сценарии оценки помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования.

2.2. Сценарии оценки помех в модели двух радиолоний с ДО на основе позиционирования

Рисунок 2 иллюстрирует сценарии движения устройств при оценке помех для двух радиолоний с ДО на основе позиционирования. Территориальное распределение двух радиолоний SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ и двух радиолоний SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_2$ и $gNB_2 \rightarrow UE_1$ задается расстоянием между базовыми станциями gNB , расстоянием между базовыми станциями gNB и UE , а также территориальным разномом между UE .

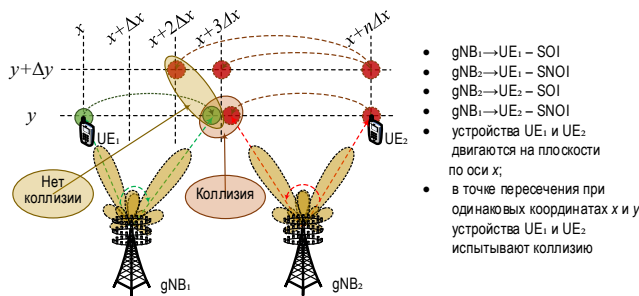


Рис. 2. Сценарии движения устройств в модели двух радиолоний с ДО на основе позиционирования

Fig. 2. Scenarios for Device Movement in the Model of Two Radio Links with Location-Aware Beamforming

Для исследования уровня внутрисистемных помех вследствие взаимного влияния радиолоний SOI и SNOI сценарии территориального распределения и движения задается сеткой точек вероятных местоположений UE на плоскости с территориальным разномом Δx по оси x и территориальным разномом Δy по оси y . UE могут двигаться по дороге/тротуару (по оси x) как в одном направлении с заданным территориальным разномом Δx по оси x и территориальным разномом Δy по оси y , так и в разных направлениях (навстречу друг другу) с заданным территориальным разномом Δy по оси y . Исходя из направленности лучей ДНА базовых станций gNB в радиолониях SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$, а также влияния боковых лепестков лучей ДНА gNB в радиолониях SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_2$ и $gNB_2 \rightarrow UE_1$ можно сделать следующие качественные выводы. Во-первых, если устройства UE_1 и UE_2 оказываются в некоторой точке пересечения на плоскости без территориального разномом Δx по оси x и без территориальным разномом Δy по оси y , то в данной точке местоположения UE наблюдается так называемая коллизия, когда SIR резко снижается. В случае, если между устройствами UE_1 и UE_2 есть территориальный разномом Δx по оси x или территориальный разномом Δy по оси y , то явной коллизии по критерию SIR не наблюдается.

ДО базовых станций gNB в радиолониях SOI осуществляется на основе текущего местоположения UE так, что максимум ДНА (AF, аббр. от англ. Array Factor) основного лепестка-луча gNB_1 ориентиро-

ван на UE_1 , а максимум AF gNB_2 – на UE_2 . Соответствующий местоположению UE коэффициент усиления ДНА базовой станции gNB в текущий момент времени k вычисляется из направляющего вектора согласно [47]:

$$AF(k) = \mathbf{w}^T \mathbf{v}(k), \quad (1)$$

где $\mathbf{w}$ – вектор комплексных весовых коэффициентов AP; $(\cdot)^T$ – оператор транспонирования; $\mathbf{v}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ – направляющий вектор-столбец комплексных весовых коэффициентов; N – число элементов прямоугольной AP.

Выполним оценку помех на входе приемного UE_1 в радиолонии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ при одновременной работе радиолонии SNOI $gNB_2 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 1). Мгновенное $SIR(k)$ в текущий момент времени k для модели двух радиолоний с ДО на основе позиционирования можно оценить по формуле:

$$SIR(k) = \frac{SOI(k)}{SNOI(k)} = \frac{|AF_0(k)|^2 P_0 / L_0(k)}{|AF_i(k)|^2 P_i / L_i(k)}, \quad (2)$$

где P_0 – мощность полезного сигнала от передатчика обслуживающей базовой станции gNB_1 в радиолонии SOI; P_i – мощность помехи от передатчика мешающей базовой станции gNB_2 в радиолонии SNOI; $L_0(k)$ – потери мощности полезного сигнала от передатчика обслуживающей базовой станции gNB_1 в радиолонии SOI при PPB в свободном пространстве на расстоянии $d_0(k)$ между gNB_1 и UE_1 в текущий момент времени k ; $L_i(k)$ – потери мощности помехи от передатчика мешающей базовой станции gNB_2 в радиолонии SNOI при PPB в свободном пространстве на расстоянии $d_i(k)$ между gNB_2 и UE_1 в текущий момент времени k ; $|AF_0(k)|^2$ – КУ полезного сигнала в радиолонии SOI, определяемый максимумом ДНА обслуживающей базовой станции gNB_1 в направлении $\{\varphi_0(k), \theta_0(k)\}$ на UE_1 в текущий момент времени k ; $|AF_i(k)|^2$ – КУ помехи в радиолонии SNOI, определяемый боковыми лепестками ДНА антенной решетки мешающей базовой станции gNB_2 в направлении $\{\varphi_i(k), \theta_i(k)\}$ на UE_1 в текущий момент времени k .

Рассмотрим далее в модели следующие сценарии оценки помех для двух радиолоний с ДО на основе позиционирования: а) два пользовательских устройства UE_1 и UE_2 двигаются друг навстречу другу по оси x с постоянной скоростью без территориального разномом Δy по оси y , UE_1 движется слева направо, а UE_2 движется справа налево, в таком случае коллизия наступает посередине траектории (см. рисунок 2); б) два пользовательских устройства UE_1 и UE_2 двигаются друг навстречу другу по оси x с постоянной скоростью с заданным ненулевым территориальным разномом Δy по оси y , UE_1 движется слева направо, а UE_2 движется справа налево, в таком случае явной коллизии не наступает; в) UE_1 стационарно, UE_2 движется

справа налево по оси x и снизу вверх по оси y (рисунок 3); г) UE₁ движется слева направо по оси x , UE₂ движется справа налево по оси x и снизу вверх по оси y (рисунок 4).

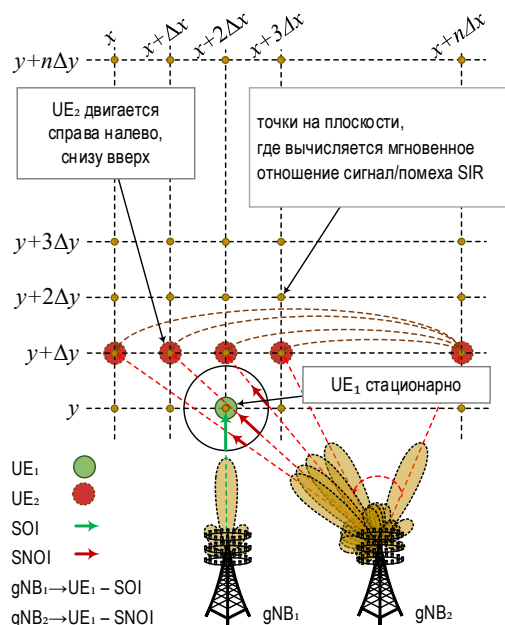


Рис. 3. Сценарий оценки помех для одной стационарной и одной подвижной радиосвязи с ДО на основе позиционирования

Fig. 3. Interference Assessment Scenario for One Fixed and One Mobile Radio Link with Location-Aware Beamforming

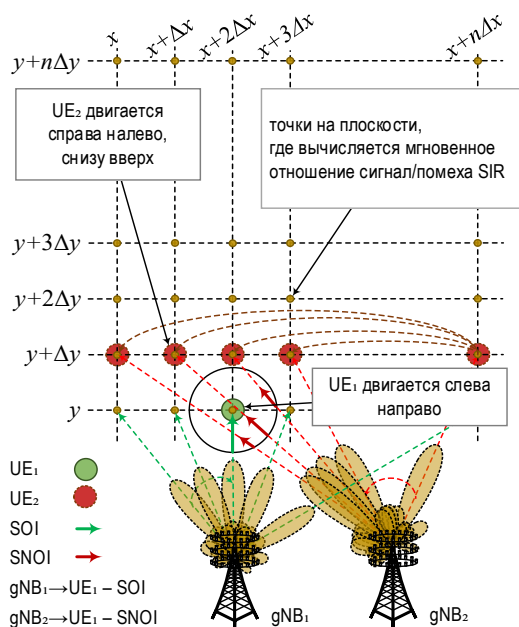


Рис. 4. Сценарий оценки помех для двух подвижных радиосвязей с ДО на основе позиционирования

Fig. 4. Interference Assessment Scenario for Two Mobile Radio Link with Location-Aware Beamforming

Текущий момент времени k в имитационной модели, которую представляют рисунки 1–4 соответствует набору вероятных местоположений UE, за-

даваемых n^2 точками на плоскости с шагом территориального разнosa $\Delta x = \Delta y$. Если в первых двух сценариях оценка SIR выполняется при движении UE₁ и UE₂ по оси x при фиксированном территориальном разнosa по оси y – то есть по набору точек траектории на линии, то в двух последних сценариях оценка SIR выполняется при варьировании территориального разнosa UE₁ и UE₂ как по оси x , так и по оси y – то есть по набору n точек и n траекторий на плоскости.

Данный подход позволяет воспроизвести в имитационной модели сценарий сверхплотного территориального распределения устройств, а также оценить допустимый территориальный разнос между ними по критерию мгновенного SIR в (2).

Отметим также, что в радиосвязи SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ в каждой точке вероятного местоположения UE₁ максимум ДНА обслуживающей базовой станции gNB_1 ориентирован на UE₁ в направлении $\{\varphi_0(k), \theta_0(k)\}$, где $\varphi_0(k)$ – азимут, а $\theta_0(k)$ – угол места между gNB_1 и UE₁ в текущий момент времени k . В то же время максимум ДНА базовой станции gNB_2 в каждой точке вероятного местоположения UE₂ ориентирован на UE₂, а в направлении $\{\varphi_i(k), \theta_i(k)\}$ на UE₁ помеховое влияние оказывают боковые лепестки ДНА gNB_2 , где $\varphi_i(k)$ – азимут, а $\theta_i(k)$ – угол места между gNB_2 и UE₁ в текущий момент времени k (см. рисунок 1).

Далее рассмотрим программную реализацию имитационной модели двух радиосвязей с ДО на основе позиционирования.

3. Программная реализация модели двух радиосвязей с диаграммообразованием на основе позиционирования

3.1. Инициализация параметров модели

3.1.1. Инициализация параметров AP

Скрипт 1 содержит команды инициализации параметров URA на gNB . Моделирование радиосвязи выполняется на несущей частоте $f_c = 30$ ГГц (длина волны 10 мм) нижней границы диапазона ММВ. Выбор URA размерностью 8×8 из 64 элементов с шириной луча ДНА по уровню половинной мощности $\varphi_{3dB} = \theta_{3dB} = 12,8^\circ$ ранее был обоснован в [9, 10]. Рисунок 5 иллюстрирует параметры URA размером 8×8 , в частности: а) массив элементов AP; б) ДНА в 3D; в) ДНА в горизонтальной плоскости по углу азимута φ ; г) ДНА в вертикальной плоскости по углу места θ .

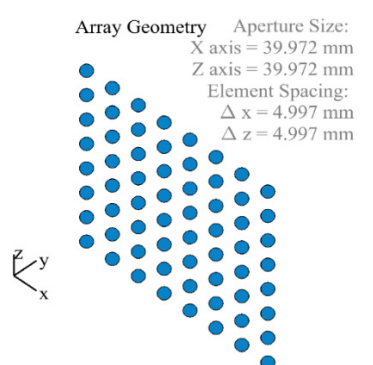
Формирование объекта URA осуществляется с использованием пакета расширения Phased Array System Toolbox (PAST) [59] специального программного обеспечения Matlab посредством встроенной функции-объекта `phased.URA` [49]. Данная функция формирует объект эквидистантной URA из набора 8×8 изотропных элементов (см. скрипт 1);

элементы находятся в узлах прямоугольной решетки в плоскости yz с расстоянием между друг другом в половину длины волны, а основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль положительного направления оси x (см. рисунок 5а). Таблица 1 содержит описание параметров объекта phased.URA.

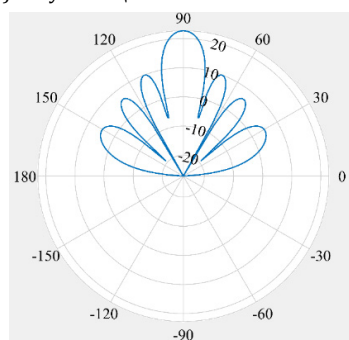
Скрипт 1. Инициализация параметров антенной решетки

```
fc = 30e9; % несущая частота, Гц
c = physconst('LightSpeed'); % скорость света, м/с
lambda = c/fc; % длина волны, м
drow = lambda/2; % расстояние между строками AP, м
dcol = lambda/2; % расстояние между столбцами AP, м
```

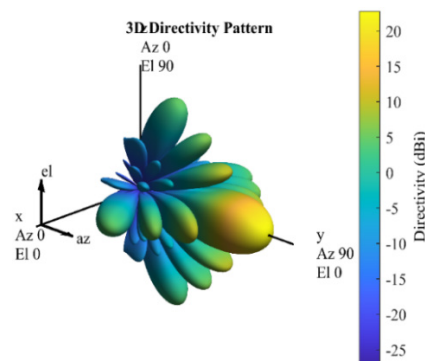
```
nrow = 8; % число строк в массиве AP, штук
ncol = 8; % число столбцов в массиве AP, штук
% формирование прямоугольной AP 8x8 URA1 на gNB1 и gNB2
URA1 = phased.URA(...
    'Size', [nrow ncol], ...
    'ElementSpacing', [drow dcol], ...
    'ArrayNormal', 'y');
URA1.Element.BackBaffled = true;
URA2 = phased.URA(...
    'Size', [nrow ncol], ...
    'ElementSpacing', [drow dcol], ...
    'ArrayNormal', 'y');
URA2.Element.BackBaffled = true;
% beamwidth(URA1,fc); % вычисление/построение ширины луча AP
% pattern(URA1,fc); % построение ДНА
% patternAzimuth(URA1,fc); % ДНА в горизонтальной плоскости
```



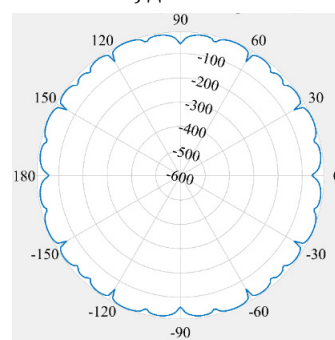
а) визуализация массива элементов AP



с) ДНА в горизонтальной плоскости



б) ДНА в 3D



д) ДНА в вертикальной плоскости

Рис. 5. Параметры прямоугольной AP 8x8

Fig. 5. URA 8x8 Parameters

ТАБЛИЦА 1. Параметры объекта phased.URA

TABLE 1. phased.URA Object Parameters

Параметр	Описание
Element	Модель элемента антенной решетки; по умолчанию используется модель изотропного излучателя
Size	Вектор размера 1x2, который задает размерность [nrow ncol] массива AP из числа строк nrow и числа столбцов ncol; индексация элементов прямоугольной AP осуществляется сначала по столбцам (сверху вниз) и затем по строкам – следующим столбцам (слева направо)
ElementSpacing	Вектор размера 1x2, который задает расстояния [drow dcol] между строками drow и столбцам dcol массива AP в метрах соответственно; если параметр ElementSpacing скаляр, то расстояние между строками равно расстоянию между столбцами
Lattice	Тип решетки может принимать значение 'Rectangular' и 'Triangular'; по умолчанию используется прямоугольный 'Rectangular' тип AP

Параметр	Описание
ArrayNormal	Направление нормали AP может принимать значения 'x', 'y', или 'z'. Элементы массива AP располагаются в плоскости, ортогональной выбранному направлению нормали AP. Основное (boresight) направление излучения элементов AP ориентировано вдоль нормали. По умолчанию принимает значение 'x'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'x', элементы массива AP лежат в плоскости 'yz'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'x'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'y', элементы массива AP лежат в плоскости 'zx'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'y'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'z', элементы массива AP лежат в плоскости 'xy'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'z'.
Taper	Матрица, вектор или скаляр комплексных весовых коэффициентов для применения к элементам AP

Для оценки и визуализации параметров AP могут использоваться следующие функции пакета PAST [59]. Функция `beamwidth` [50] служит для построения ширины луча ДНА по заданному уровню; например, ширина луча ДНА рассматриваемой URA по уровню половинной мощности минус 3 дБ в горизонтальной и вертикальной плоскости одинакова и равна $\varphi_{3\text{дБ}} = \theta_{3\text{дБ}} = 12,8^\circ$. Функция `viewArray` [51] позволяет визуализировать геометрическое расположение элементов массива AP в пространстве (см. рисунок 5a). Функция `pattern` [52] используется для построения ДНА в пространстве (см. рисунок 5b). `patternAzimuth` [53] вызывается для построения ДНА в горизонтальной плоскости по азимуту (см. рисунок 5c). Функция `patternElevation` [54] позволяет построить ДНА в вертикальной плоскости по углу места (см. рисунок 5d).

Далее рассмотрим параметры территориального распределения устройств, образующих две радиолинии.

3.1.2. Инициализация параметров территориального распределения

Скрипт 2 содержит команды инициализации параметров территориального распределения базовых станций gNB₁ и gNB₂ и двух подвижных пользовательских устройств UE₁ и UE₂. Для целей визуализации AP на объектах базовых станций располагается на объекте светофора `traffic_light_h`.

Скрипт 2. Инициализация параметров территориального распределения

```
% инициализация параметров распределения gNB и UE
% коэффициенты 3D STL объекта светофора
traffic_light_h = [0; 0; 0];
% координаты URA, начальные азимуты и углы места
% координаты AP URA1 на gNB1
URA1_pos = [10; 0; 3] + traffic_light_h;
% координаты AP URA2 на gNB2
URA2_pos = [20; 0; 3] + traffic_light_h;
% инициализация траектории движения UE1, м
% шаг сетки местоположений UE1 и UE2 по оси x и y, м
dstep = 0.1;
% начальная точка траектории движения UE1 по оси x, м
dstart1 = 0;
% конечная точка траектории движения UE1 по оси x, м
dstop1 = 30;
% вектор точек траектории UE1 по оси x, м
UE1_x_vec = dstart1:dstep:dstop1;
% число точек траектории UE1 по оси x
UE1_x_vec_len=length(UE1_x_vec);
UE1_z = 1.5; % высота подвеса антенны UE1, м
UE1_y = 5; % координата y, по которой движется UE1, м
% инициализация траектории движения UE2, м
dstart2 = 30; % начальная точка траектории движения UE2, м
dstop2 = 0; % конечная точка траектории UE1 по оси x, м
% вектор точек траектории UE2 по оси x, м
UE2_x_vec=dstart2:-dstep:dstop2;
% число точек траектории UE2 по оси x
UE2_x_vec_len=length(UE2_x_vec);
UE2_z = 1.5; % высота подвеса антенны UE2, м
% UE2_y_vec=UE1_y; % сценарий без разноса по оси y
% координата y, по которой начинает двигаться UE2, м
UE2_y = 0;
% вектор точек траектории UE2 по оси y, м
UE2_y_vec=UE2_y:dstep:UE2_y+10.0;
% число точек траектории движения по оси y
UE2_y_vec_len=length(UE2_y_vec);
```

Пространственные координаты $[x; y; z]$ AP gNB₁ и gNB₂ фиксированы и содержатся в векторах столбцах `URA1_pos` и `URA2_pos`, соответственно; высоты подвеса AP одинаковы и равны $h = 3$ м (см. рисунок 1). Текущие координаты $[x; y; z]$ ненаправленных антенн UE₁ и UE₂ варьируются и содержатся в векторах столбцах `UE1_pos = [UE1_x; UE1_y; UE1_z]` и `UE2_pos = [UE2_x; UE2_y; UE2_z]`. Координаты z – высоты подвеса устройств `UE1_z = UE2_z` фиксированы и равны $h = 1,5$ м. Координата y устройства UE₁ фиксирована и равна `UE1_y = 5`. Координата y устройства UE₂ может варьироваться и задается вектором `UE2_y_vec` с шагом `dstep`. Координаты x устройств UE₁ и UE₂ варьируются и задаются векторами `UE1_x_vec` и `UE2_x_vec`, соответственно, с тем же шагом. При имитационном моделировании взаимного влияния двух радиолиний оценка помех выполняется в двойном цикле по набору точек на плоскости xy с шагом `dstep` по осям x и y .

3.1.3. Инициализация объектов диаграммообразования антенной решетки

Скрипт 3 содержит команды инициализации объектов ДО для антенных решеток URA1 и URA2, размещенных на базовых станциях gNB₁ и gNB₂, соответственно.

Скрипт 3. Инициализация объектов диаграммообразования антенной решетки

```
% формирование объекта направляющего вектора
% для управления лучом AP
steervvec_URA1 = ...
phased.SteeringVector('SensorArray', URA1); % для URA1
steervvec_URA2 = ...
phased.SteeringVector('SensorArray', URA2); % для URA2
% формирование объекта вычисления КУ AP
% при ДО в зависимости от весов направляющего вектора
gain_URA1 = phased.ArrayGain('SensorArray', URA1,...
'WeightsInputPort', true);
gain_URA2 = phased.ArrayGain('SensorArray', URA2,...
'WeightsInputPort', true);
```

Для реализации ДО в радиолинии на основе текущего местоположения UE на базовой станции формируется функция-объект `steervvec_URA1` направляющего вектора для управления лучом антенной решетки URA1 и функция-объект `steervvec_URA2` направляющего вектора для управления лучом антенной решетки URA2. Формирование объекта направляющего вектора осуществляется с использованием пакета расширения PAST [59] посредством функции-объекта `phased.SteeringVector` [55]; таблица 2 содержит описание параметров. Данная функция формирует вектор комплексных весовых коэффициентов для управления ДНА.

Для вычисления усиления полезного сигнала в радиолинии SOI и помехи в радиолинии SNOI на базовой станции формируется объект `gain_URA1` оценки КУ антенной решетки URA1 и объект `gain_URA2` оценки КУ антенной решетки URA2. Формирование объекта оценки КУ осуществляется с

использованием пакета расширения PAST [59] посредством объекта phased.ArrayGain [56], который вычисляет КУ в дБн для инициализированной АР в заданном угловом направлении. Таблица 3 содержит описание параметров phased.ArrayGain.

ТАБЛИЦА 2. Параметры объекта phased.SteeringVector

TABLE 2. phased.SteeringVector Object Parameters

Параметр	Описание
SensorArray	Объект АР пакета расширения Phased Array System Toolbox, например, объект линейной эквидистантной АР phased.ULA (по умолчанию) или объект прямоугольной эквидистантной АР phased.URA
PropagationSpeed	Скорость распространения сигнала, по умолчанию равна скорости света physconst('LightSpeed')
IncludeElementResponse	Опция учета отклика индивидуальных элементов в направляющем векторе комплексных весовых коэффициентов АР; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) направляющий вектор вычисляется, исходя из того, что все элементы АР являются изотропными излучателями
NumPhaseShifterBits	Число бит квантования для фазовращателя; при инициализации данного параметра 0 (по умолчанию) квантование для фазовращателя не выполняется
EnablePolarization	Опция учета поляризации; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) поляризация не учитывается

ТАБЛИЦА 3. Параметры объекта phased.ArrayGain

TABLE 3. phased.ArrayGain Object Parameters

Параметр	Описание
SensorArray	Объект АР пакета расширения Phased Array System Toolbox, например, объект линейной эквидистантной АР phased.ULA (по умолчанию) или объект прямоугольной эквидистантной АР phased.URA
PropagationSpeed	Скорость распространения сигнала, по умолчанию равна скорости света physconst('LightSpeed')
WeightsInputPort	Опция учета вектора комплексных весовых коэффициентов для оценки КУ; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) КУ вычисляется по заданному направлению [азимут; угол места] в пространстве; в режиме true КУ вычисляется по паре направляющих векторов комплексных весовых коэффициентов, сформированных в направлении [азимут; угол места]

Опишем далее основные вычислительные процедуры имитационной модели для исследования взаимного влияния двух радиолоний.

3.2. Вычислительные процедуры имитационной модели

Скрипт 4 содержит вычислительные процедуры основного цикла имитационной модели двух радиолоний с ДО на основе позиционирования, которая реализует вычисление мгновенного SIR в формализованных ранее сценариях оценки помех.

Скрипт 4. Вычислительные процедуры имитационной модели двух радиолоний

```
% вектор SIR для UE1
URA1UE1_SIR_vec = zeros(1,UE2_x_vec_len);
% вектор SIR для UE2
URA2UE2_SIR_vec = zeros(1,UE2_x_vec_len);
% матрица SIR UE1
URA1UE1_SIR_mtx = zeros(UE2_y_vec_len, UE2_x_vec_len);
% матрица SIR UE2
URA2UE2_SIR_mtx = zeros(UE2_y_vec_len, UE2_x_vec_len);
for UE2_y_idx=1:UE2_y_vec_len % цикл по координате y
    for d=1:UE2_x_vec_len % цикл по координате x
        if UE1_x_vec_len==1
            UE1_x = UE1_x_vec;
        else
            UE1_x = UE1_x_vec(d);
        end
        UE2_x = UE2_x_vec(d);
        UE2_y = UE2_y_idx;
        % текущие координаты UE
        UE1_pos = [UE1_x; UE1_y; UE1_z];
        UE2_pos = [UE2_x; UE2_y; UE2_z];
        % оценка расстояния для вычисления
        % потерь и углов между URA и UE
        [URA1 UE1_range, URA1 UE1_angle] = ...
            rangeangle(URA1_pos,UE1_pos);
        [URA2 UE2_range, URA2 UE2_angle] = ...
            rangeangle(URA2_pos,UE2_pos);
        [URA1 UE2_range, URA1 UE2_angle] = ...
            rangeangle(URA1_pos,UE2_pos);
        [URA2 UE1_range, URA2 UE1_angle] = ...
            rangeangle(URA2_pos,UE1_pos);
        % азимуты и углы места от URA
        % до UE для направляющего вектора
        URA1 UE1_az=URA1 UE1_angle(1)+180;
        URA1 UE1_el=-URA1 UE1_angle(2);
        URA2 UE2_az=URA2 UE2_angle(1)+180;
        URA2 UE2_el=-URA2 UE2_angle(2);
        URA1 UE2_az=URA1 UE2_angle(1)+180;
        URA1 UE2_el=-URA1 UE2_angle(2);
        URA2 UE1_az=URA2 UE1_angle(1)+180;
        URA2 UE1_el=-URA2 UE1_angle(2);
        % вычисление направляющих векторов
        % SOI для AP gNB1 и gNB2
        sv_URA1= steervc_URA1(fc,...
            [URA1 UE1_az;URA1 UE1_el]); % gNB1-UE1
        sv_URA2= steervc_URA2(fc,...
            [URA2 UE2_az;URA2 UE2_el]); % gNB2-UE2
        % вычисление КУ для оценки отношения SIR
        % gNB1-UE1 SOI
        gain_URA1 UE1 = gain_URA1(fc,...
            [URA1 UE1_az; URA1 UE1_el],sv_URA1);
        % gNB2-UE2 SOI
        gain_URA2 UE2 = gain_URA2(fc,...
            [URA2 UE2_az; URA2 UE2_el], sv_URA2);
        % gNB1-UE2 SNOI
        gain_URA1 UE2 = gain_URA1(fc,...
            [URA1 UE2_az; URA1 UE2_el], sv_URA1);
        % gNB2-UE1 SNOI
        gain_URA2 UE1 = gain_URA2(fc,...
            [URA2 UE1_az; URA2 UE1_el], sv_URA2);
        % заполнение вектора SIR для UE1
        URA1UE1_SIR_vec(d)=(gain_URA1 UE1 -
            fspl(URA1 UE1_range, lambda)) ...
            - (gain_URA2 UE1 -
            fspl(URA2 UE1_range, lambda));
        % заполнение вектора SIR для UE2
        URA2UE2_SIR_vec(d)=(gain_URA2 UE2 -
            fspl(URA2 UE2_range, lambda))...
            - (gain_URA1 UE2 -
            fspl(URA1 UE2_range, lambda));
    end % for d=1:dist_vec_len
% матрица SIR для UE1 и UE2
URA1UE1_SIR_mtx(UE2_y_idx, :) = URA1UE1_SIR_vec;
URA2UE2_SIR_mtx(UE2_y_idx, :) = URA2UE2_SIR_vec;
end % for UE2_y_idx=1:UE2_y_vec_len
```


Основной цикл имитационной модели реализует перебор вероятных местоположений UE₁ и UE₂ на плоскости по координате x и координате y согласно заданному ранее сценарию территориального распределения. Внутри цикла анализ производится для заданных координат URA1_pos и URA2_pos базовых станций gNB₁ и gNB₂ и текущего (мгновенного) местоположения UE1_pos и UE2_pos пользовательских устройств UE₁ и UE₂.

Вначале производится вычисление расстояний d_0 , азимутов φ_0 и углов места θ_0 для двух радиолиний SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂; вместе с этим производится оценка расстояний d_i , азимутов φ_i и углов места θ_i для двух радиолиний SNOI gNB₁ → UE₂ и gNB₂ → UE₁ (см. рисунок 1). Данные вычисления выполняются с использованием пакета расширения PAST [59] функцией rangeangle [57].

Далее на основе известных на базовых станциях gNB₁ и gNB₂ направлений азимутов URA1 UE1_az, URA2 UE2_az и углов места URA1 UE1_e1, URA2 UE2_e1 выполняется вычисление направляющих векторов комплексных весовых коэффициентов sv_URA1 и sv_URA2 антенных решеток для двух радиолиний SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂, соответственно.

Затем по заданным векторам sv_URA1, sv_URA2 и известным направлениям азимутов URA1 UE1_az, URA2 UE2_az и углов места URA1 UE1_e1, URA2 UE2_e1 выполняется оценка КУ полезных сигналов gain_URA1 UE1 и gain_URA2 UE2 в радиолиниях SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂, соответственно. Одновременно по заданным векторам sv_URA1, sv_URA2 и текущим направлениям азимутов URA1 UE2_az, URA2 UE1_az и углов места URA1 UE2_e1, URA2 UE1_e1 выполняется оценка КУ помех в радиолиниях SNOI gNB₁ → UE₂ и gNB₂ → UE₁, соответственно.

Затем по вычисленным расстояниям выполняется оценка потерь при PPB в свободном пространстве (FSPL, аббр. от англ. Free Space Path Loss) с использованием пакета расширения PAST [59] функцией fsp1 [58].

Итоговая оценка SIR выполняется согласно формуле (2) при условии одинаковых мощностей передачи $P_0 = P_i$ базовых станций:

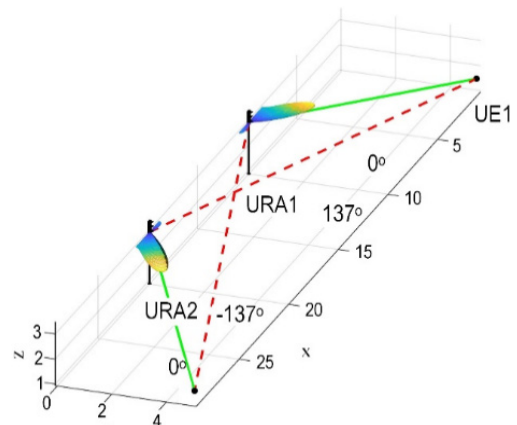
$$SIR(k) = \frac{SOI(k)}{SNOI(k)} = \frac{AF_0(k)/L_0(k)}{AF_i(k)/L_i(k)}. \quad (3)$$

В имитационной модели вычисление по формуле (3) выполняется в децибелах, поэтому деление заменяется вычитанием (см. скрипт 4). Проанализируем далее результаты оценки помех в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования для формализованных сценариев.

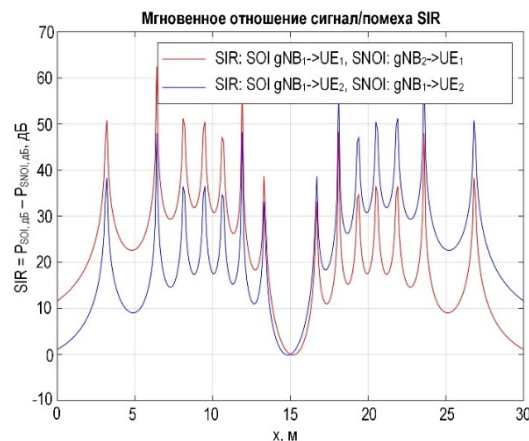
4. Результаты оценки помех в модели двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

4.1. Оценка помех в сценарии без территориального разнеса подвижных устройств

Рисунок 6 иллюстрирует сценарий и результаты оценки мгновенного значения SIR при движении UE друг навстречу другу без разнеса по оси y .



а) Сценарий без разнеса по оси y



б) SIR без разнеса по оси y

Рис. 6. Оценка помех в сценарии без разнеса по оси y

Fig. 6. Interference Assessment in a Scenario without y -Spacing

Антенная решетка URA₁ базовой станции gNB₁ размещена в точке с пространственными координатами (10, 0, 3) м; антенная решетка URA₂ базовой станции gNB₂ размещена в точке с координатами (20, 0, 3) м (см. рисунок 6а). Высота подвеса ненаправленных антенн устройств UE₁ и UE₂ равна 1,5 м. Устройство UE₁ движется на плоскости по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м; устройство UE₂ движется на плоскости по оси x справа налево из точки (30, 5) м в точку (0, 5) м также с аналогичным шагом (см. рисунок 6а).

Анализ графиков мгновенного SIR как функции текущего местоположения UE₁ и UE₂ на оси x , представленных на рисунке 6б, позволяет сделать следующие выводы:

– зависимости SIR для радиолинии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ симметричны относительно точки пересечения устройств UE в центре с координатой $x = 15$ м вследствие одинаковых мощностей передачи на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , одинаковых антенных решетках URA_1 и URA_2 , а также равномерности траекторий движения UE ;

– нелинейный характер зависимости мгновенного SIR обусловлен нелинейной диаграммой направленности URA при оценке влияния помех радиолинии $SNOI$ $gNB_2 \rightarrow UE_1$ на радиолинию SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и оценке влияния помех радиолинии $SNOI$ $gNB_1 \rightarrow UE_2$ на радиолинию SOI $gNB_2 \rightarrow UE_2$;

– минимальное значение мгновенного $SIR = 0$ дБ при равенстве мощности полезного сигнала P_{SOI} и мощности помехи P_{SNOI} наблюдается в точке пересечения UE_1 и UE_2 в центре с координатой $x = 15$ м вследствие ориентации лучей базовых станций gNB_1 и gNB_2 в одну точку при ненулевой ширине ДНА по уровню половинной мощности; в частности, для моделируемой прямоугольной АР $\varphi_{3дБ} = \theta_{3дБ} = 12,8^\circ$;

– в начале траектории движения UE мгновенное $SIR > 10$ дБ; с удалением UE от обслуживающих их базовых станций SIR в среднем уменьшается, при этом его минимальные значения наблюдаются в конце траектории движения UE при максимальном их удалении от обслуживающих gNB , что обуславливает необходимость переключения лучей UE с одной обслуживающей базовой станции gNB на другую.

4.2. Оценка помех в сценарии с фиксированным территориальным разномом подвижных устройств

Рисунок 7 иллюстрирует сценарий и результаты оценки мгновенного значения SIR при UE на плоскости с фиксированным разномом по оси y . Антенные решетки URA_1 и URA_2 на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , соответственно, размещены аналогично рисунку 6а; высота подвеса ненаправленных антенн устройств UE равна 1,5 м; UE_1 движется по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м аналогично рисунку 6а. Далее формализуем сценарий фиксированного разнома по оси y : UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 6) м в точку (0, 6) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разномом $\Delta y = 1$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7а); UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 7) м в точку (0, 7) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разномом $\Delta y = 2$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7с); UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 8) м в точку (0, 8) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разномом $\Delta y = 3$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7е).

Анализ графиков мгновенного SIR как функции текущего местоположения UE_1 и UE_2 на оси x , представленных на рисунках 7б, 7д, 7е, позволяет для

радиолиний SOI сделать вывод о том, что минимальное значение мгновенного $SIR = 0$ дБ смещается из центра траектории вправо в сторону начала движения UE_2 по оси x .

Таким образом, подтверждается наличие неочевидной зависимости SIR от территориального разнома устройств UE_1 и UE_2 по оси y . Для установления такой зависимости рассмотрим далее оценку помех в сценарии с варьируемым территориальным разномом подвижных UE_1 и UE_2 по оси y .

4.3. Оценка помех в сценарии с варьируемым территориальным разномом подвижных устройств

4.3.1. Сценарий одного стационарного и одного подвижного устройства

Рисунок 8 иллюстрирует результаты оценки мгновенного SIR в сценарии с варьируемым территориальным разномом одного стационарного и одного подвижного устройства. Антенные решетки URA_1 и URA_2 на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , соответственно, размещены аналогично рисунку 6а. Высота подвеса ненаправленных антенн устройств UE_1 и UE_2 равна 1,5 м. Устройство UE_1 стационарно и располагается на плоскости в точке с координатами (10, 5, 1,5) м – напротив обслуживающей базовой станции gNB_1 с координатами (10, 0, 3) м. Устройство UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 0) м в точку (0, 0) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м при координате $y = 0$ м; затем выполняется инкремент разнома Δy по оси y и устройство UE_2 продолжает движение по оси x справа налево: так, например, при $\Delta y = 0,1$ м UE_2 продолжит движение из точки (30, 0,1) м в точку (0, 0,1) м с тем же шагом Δx . Моделирование варьируемого территориального разнома по оси y выполняется на интервале от 0 до 10 м с шагом $\Delta y = 0,1$ м.

Анализ карт мгновенного SIR как функции текущего взаимного местоположения UE_1 и UE_2 на рисунке 8 позволяет сделать следующие выводы:

– карты SIR в радиолиниях SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 8а) и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ (см. рисунок 8б) неочевидны и определяются электронным сканированием нелинейными ДНА прямоугольных АР на gNB по текущему местоположению UE ; более удобной трактовке поддаются области, в которых SIR оказывается выше заданного порога (см. рисунок 8с–8ф);

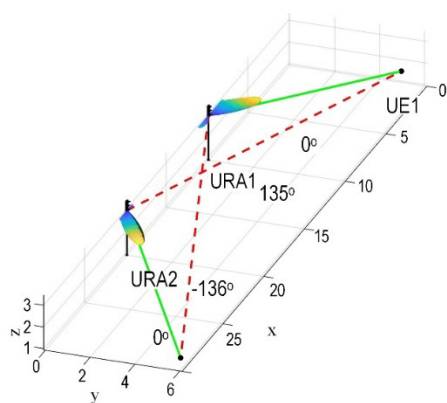
– область допустимых помех с $SIR > 10$ дБ в радиолинии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 8с) в целом отражает стационарный характер размещения UE_1 , когда напротив UE_1 в точке с координатами (10, 5, 1,5) располагается обслуживающая базовая станция gNB_1 в точке с координатами (10, 0, 3) м ориентирует свой луч на UE_1 ;

– область допустимых помех с $SIR > 10$ дБ в радиолинии SOI $gNB_2 \rightarrow UE_2$ (см. рисунок 8д) в целом также отражает помеховое влияние стационарной

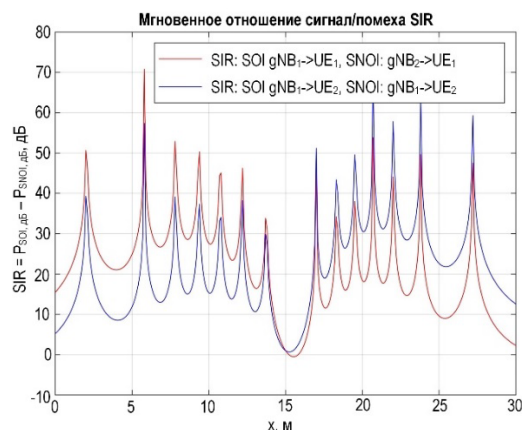
радиолинии SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$: области, где SIR опускаются ниже заданного порога, находятся по оси y напротив мешающей базовой станции gNB_1 , при этом форма областей с $SIR < 10$ дБ отражает форму ДНА прямоугольной AP, мешающей gNB_1 в горизонтальной плоскости;

– при увеличении порогового SIR с 10 до 20 дБ области допустимых помех ожидаемо уменьшаются;

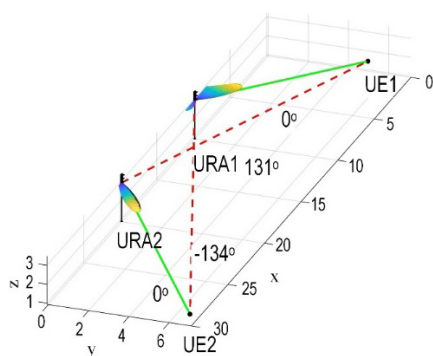
– области допустимых помех с мгновенным SIR могут служить для обоснования территориального разнеса устройств и потенциальных областей переключения лучей обслуживающих базовых станций.



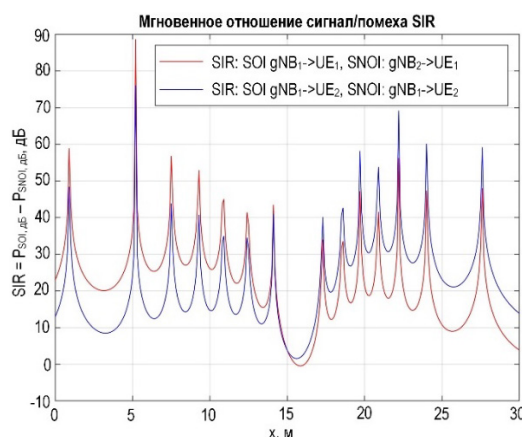
а) Сценарий с $\Delta y = 1$ м



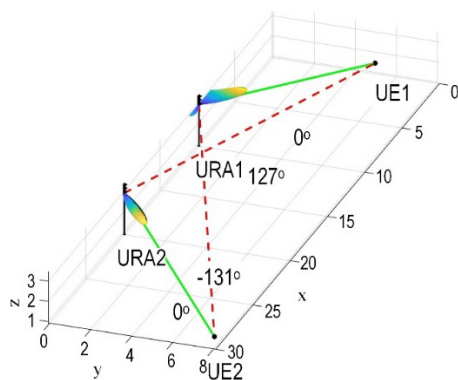
б) SIR с $\Delta y = 1$ м



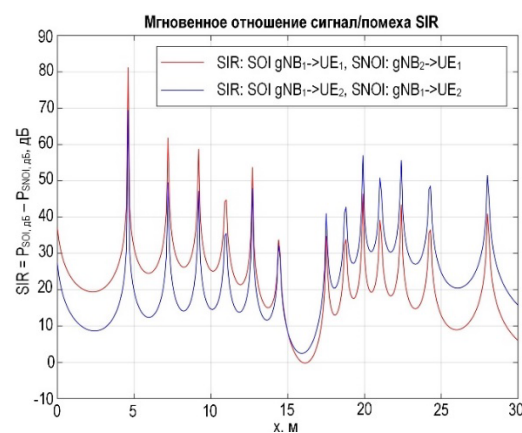
с) Сценарий с $\Delta y = 2$ м



д) SIR с $\Delta y = 2$ м



е) Сценарий с $\Delta y = 3$ м



ф) SIR с $\Delta y = 3$ м

Рис. 7. Оценка помех в сценарии с фиксированным разнесом по оси y

Fig. 7. Interference Assessment in a Fixed y -Spacing Scenario

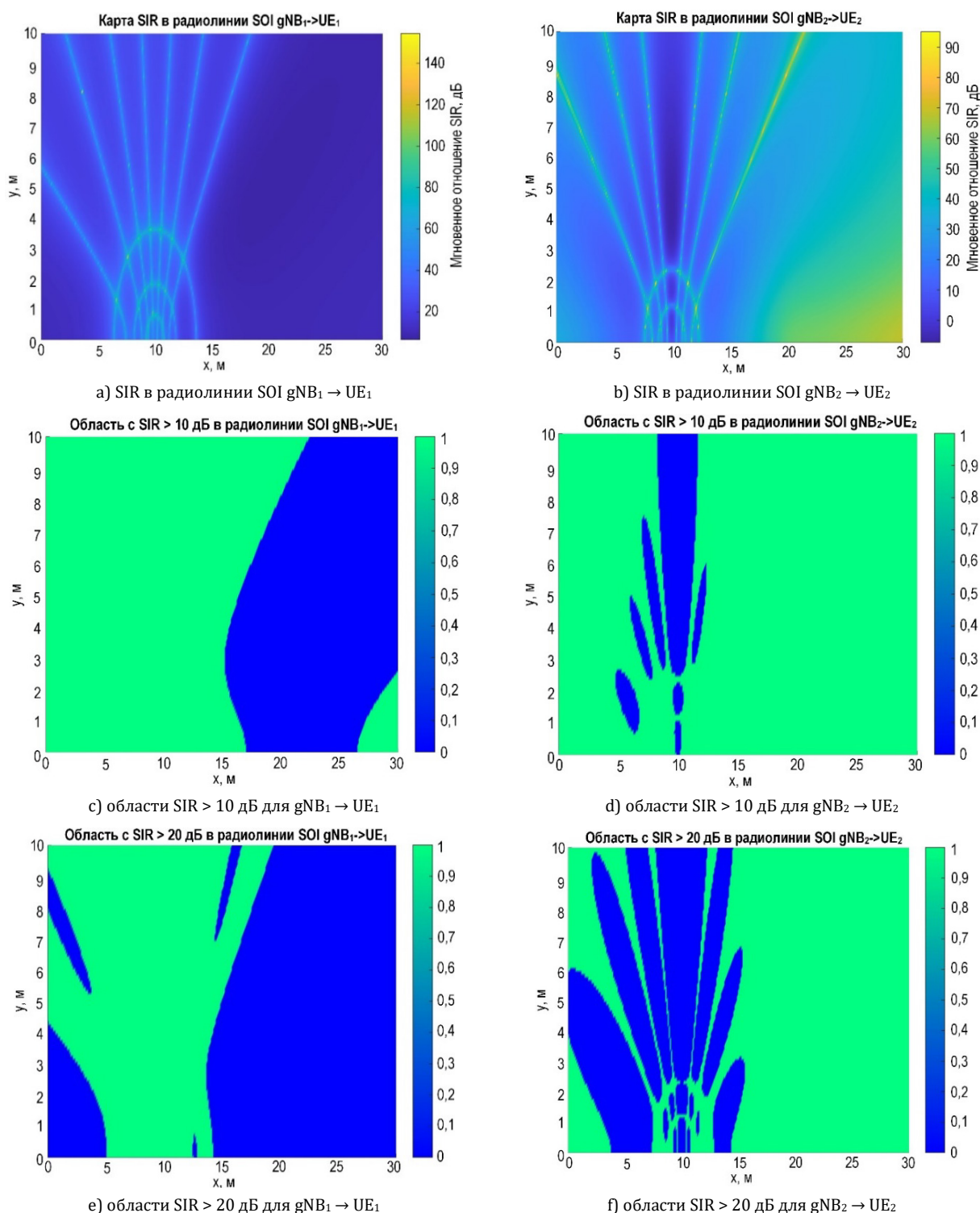


Рис. 8. Оценка помех в сценарии с варьируемым разномом одного стационарного и одного подвижного устройства

Fig. 8. Interference Assessment in a Scenario with Varying Separation of One Fixed and One Mobile Device

4.3.2. Сценарий двух подвижных устройств

Рисунок 9 иллюстрирует результаты оценки мгновенного SIR в сценарии с варьируемым территориальным разномом двух подвижных устройств.

Размещение антенных решеток URA₁ и URA₂ на gNB₁ и gNB₂, соответственно, а также сценарий дви-

жения UE₁ на плоскости по оси x слева направо из точки (0,5) м в точку (30,5) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м соответствует описанному ранее сценарию, представленному на рисунке 6. Сценарий движения устройства UE₂ на плоскости справа налево и снизу вверх соответствует описанному ранее сценарию, представленному на рисунке 7.

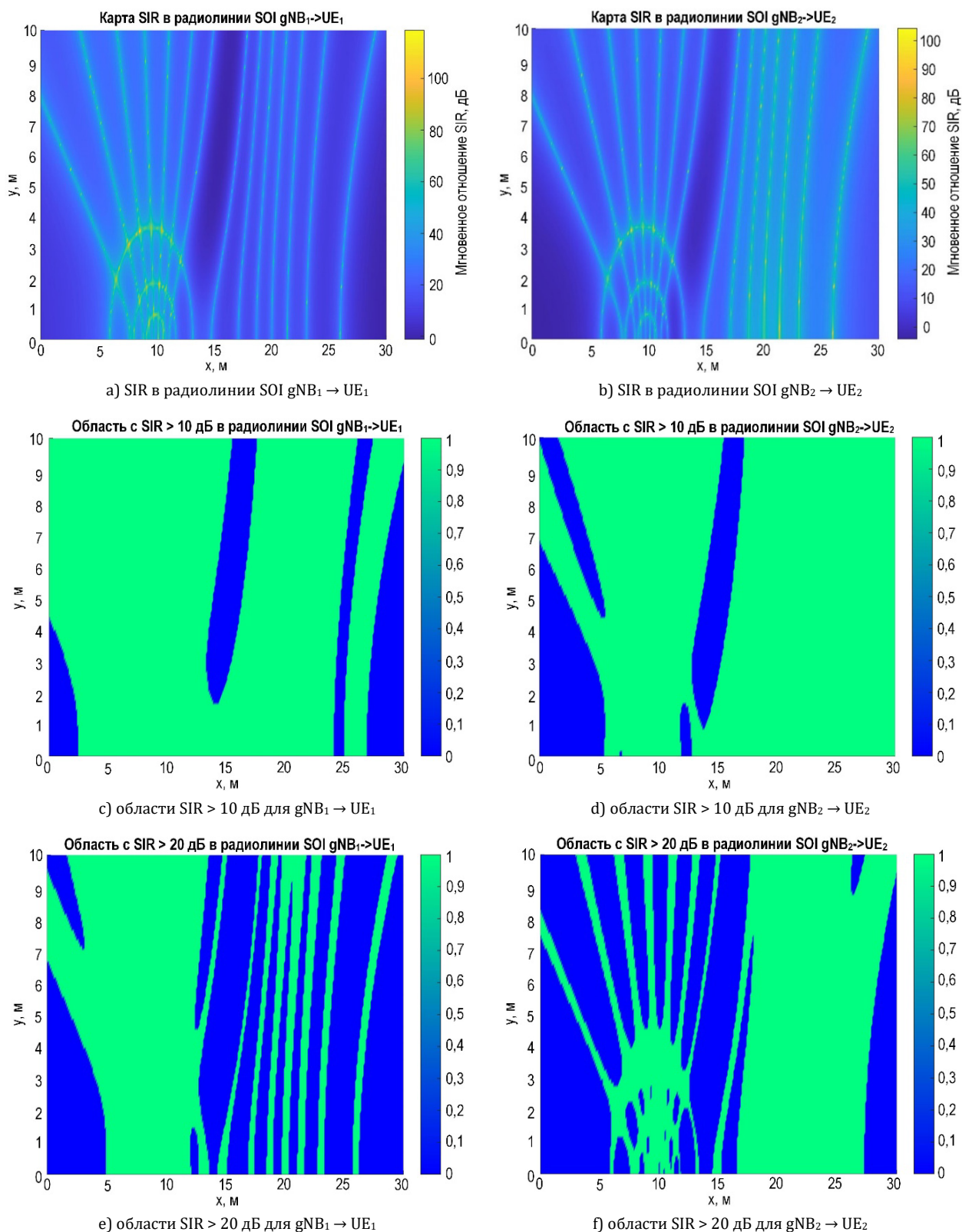


Рис. 9. Оценка помех в сценарии с варьируемым разномом двух подвижных устройств

Fig. 9. Interference Assessment in a Scenario with Varying Separation between Two Mobile Devices

Сравнивая рисунки 9б и 7б, можно сделать вывод о том, что мгновенное значение SIR в радиолинии SOI gNB₂ → UE₂ на траектории движения UE₂ по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м, есть срез рисунка 9б при фиксированном разноме $\Delta y = 1$ м (рисунок 10).

относительно траектории движения UE₁ по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м, есть срез рисунка 9б при фиксированном разноме $\Delta y = 1$ м (рисунок 10).

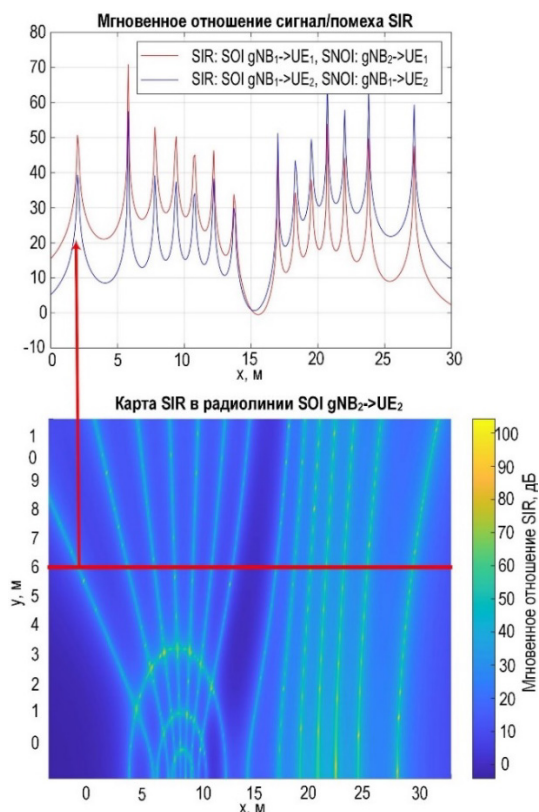


Рис. 10. Мгновенное значение SIR на траектории при фиксированном разноте как срез карты SIR с варьируемым разнотом

Fig. 10. Instantaneous SIR Value along the Trajectory at a Fixed Spacing as a Slice of the SIR Map with Variable Spacing

Анализ карт мгновенного SIR как функции текущего взаимного местоположения подвижных устройств UE₁ и UE₂ на рисунке 9 позволяет сделать следующие выводы:

- области допустимых помех в радиолиниях SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂ различаются вследствие того, что устройство UE₁ движется слева направо с фиксированной координатой $y = 5$ м, а UE₂ – справа налево с варьируемой координатой y ; вместе с тем для обеих радиолиний различимы обла-

сти допустимых помех вблизи обслуживающих базовых станций, выходя за пределы которых пороговое отношение SIR оказывается ниже требуемого, что в очередной раз служит основанием для переключения лучей обслуживающих базовых станций примерно на середине траектории движения устройств;

- при увеличении порогового SIR с 10 до 20 дБ области допустимых помех в обеих радиолиниях уменьшаются так, что инициировать процедуру переключения луча (с предпочтительным использованием более узкой ДНА) необходимо до того, как устройства достигнут середины траектории движения.

5. Выводы

Результаты моделирования показали существенный разброс (десятки дБ) мгновенного SIR в зависимости от территориального разнота устройств. Разработанная математическая и имитационная модель оценки мгновенного SIR для частного случая двух UE и двух стационарных устройств радиодоступа, оборудованных адаптивными антеннами, которые осуществляют ДО на основе текущего местоположения подвижных устройств в процессе их перемещения показала, что для эффективного решения проблемы управления ДНА необходимо выделить и проводить исследования и разработки на четырех уровнях абстракции: 1) сценарий отдельной радиолинии; 2) сценарий взаимного влияния двух радиолиний; 3) сценарий совокупности радиолиний одной соты; 4) сценарий совокупности сот СРД.

Разработанная модель оценки внутрисистемных помех доступна по ссылке [60].

Настоящее исследование является первым этапом разработки комплекса моделей управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД. Следующим этапом исследования является разработка модели учета взаимного влияния совокупности радиолиний одной соты и совокупности сот СРД.

Список источников

1. Фокин Г.А. Концепция диаграммообразования на основе позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2022. № 10. С. 1–7.
2. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // Российский научный фонд. URL: <https://rscf.ru/project/22-29-00528> (дата обращения 10.09.2023)
3. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
4. Фокин Г.А. Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
5. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 2021. 499 с.
6. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
7. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
8. Фокин Г.А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 4–21. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-5-4-21
9. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 1. Оценка помех // Первая мила. 2021. № 3(95). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73
10. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 2. Оценка разнота устройств // Первая мила. 2021. № 4(96). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72

11. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
12. Фокин Г.А. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая миля. 2022. № 1(101). С. 42–49. DOI:10.22184/2070-8963.2022.101.1.42.49
13. Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая миля. 2022. № 3(103). С. 62–69. DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.62.68
14. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63
15. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99
16. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Программный модуль для оценки взаимного влияния радиолиний двух адаптивных антенн при диаграммообразовании. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021662103 от 14.07.2021. Опул. 22.07.2021.
17. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. Iss. 4. PP. 1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
18. Nam Y.-H., Ng B.L., Sayana K., Li Y., Zhang J., Kim Y., et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. Iss. 6. PP. 172–179. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525612
19. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2014. Vol. 8. Iss. 5. PP. 742–758. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2317671
20. Razavizadeh S.M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks // IEEE Signal Processing Magazine. 2014. Vol. 31. Iss. 6. PP. 94–101. DOI:10.1109/MSP.2014.2335236
21. Roh W., Seol J.-Y., Park J., Lee B., Lee J., Kim Y., et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
22. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 186–195. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736761
23. Sun S., Rappaport T.S., Heath R.W., Nix A., Rangan S. MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both? // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 12. PP. 110–121. DOI:10.1109/MCOM.2014.6979962
24. Han S., I C.-l., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. Iss. 1. PP. 186–194. DOI:10.1109/MCOM.2015.7010533
25. Kutty S., Sen D. Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 2. PP. 949–973. DOI:10.1109/COMST.2015.2504600
26. Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G.R., Molisch A.F., Mellios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks – With a Focus on Propagation Models // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65. Iss. 12. PP. 6213–6230. DOI:10.1109/TAP.2017.2734243
27. Heath R.W., González-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2016. Vol. 10. Iss. 3. PP. 436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924
28. Björnson E., Sanguinetti L., Wymeersch H., Hoydis J., Marzetta T.L. Massive MIMO is a reality – What is next? Five promising research directions for antenna arrays // Digital Signal Processing. 2019. Vol. 94. PP. 3–20. DOI:10.1016/j.dsp.2019.06.007
29. Heng Y., Andrews J.G., Mo J., Va V., Ali A., Ng B.L., et al. Six Key Challenges for Beam Management in 5.5G and 6G Systems // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 7. PP. 74–79. DOI:10.1109/MCOM.001.2001184
30. Bang J., Chung H., Hong J., Seo H., Choi J., Kim S. Millimeter-Wave Communications: Recent Developments and Challenges of Hardware and Beam Management Algorithms // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 8. PP. 86–92. DOI:10.1109/MCOM.001.2001010
31. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming // Proceedings of the 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel (Eilat, Israel, 17–20 November 2010). IEEE, 2010. PP. 000184–000187. DOI:10.1109/EEEI.2010.5661954
32. Alkhateeb A., Ayach O.El., Leus G., Heath R.W. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2014. Vol. 8. Iss. 5. PP. 831–846. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2334278
33. Va V., Zhang X., Heath R.W. Beam Switching for Millimeter Wave Communication to Support High Speed Trains // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 06–09 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390855
34. Va V., Heath R.W. Basic Relationship between Channel Coherence Time and Beamwidth in Vehicular Channels // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 06–09 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390852
35. Va V., Choi J., Heath R.W. The Impact of Beamwidth on Temporal Channel Variation in Vehicular Channels and Its Implications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 6. PP. 5014–5029. DOI:10.1109/TVT.2016.2622164
36. Va V., Shimizu T., Bansal G., Heath R.W. Beam design for beam switching based millimeter wave vehicle-to-infrastructure communications // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–27 May 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511414

37. Andrews J.G., Zhang X., Durgin G.D., Gupta A.K. Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss. 10. PP. 184–190. DOI:10.1109/MCOM.2016.7588290
38. Chiaraviglio L., Turco S., Bianchi G., Blefari-Melazzi N. "Cellular Network Densification Increases Radio-Frequency Pollution": True or False? // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21. Iss. 4. PP. 2608–2622. DOI:10.1109/TWC.2021.3114198
39. Thors B., Furuskär A., Colombi D., Törnevik C. Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 19711–19719. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2753459
40. Chiaraviglio L., Rossetti S., Saida S., Bartoletti S., Blefari-Melazzi N. "Pencil Beamforming Increases Human Exposure to ElectroMagnetic Fields": True or False? // IEEE Access. 2021. Vol. 9. PP. 25158–25171. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3057237
41. Ali A., Karabulut U., Awada A., Viering I., Tirkkonen O., Barreto A.N., et al. System Model for Average Downlink SINR in 5G Multi-Beam Networks // Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC, Istanbul, Turkey, 08–11 September 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
42. Awada A., Lobinger A., Enqvist A., Talukdar A., Viering I. A simplified deterministic channel model for user mobility investigations in 5G networks // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Paris, France, 21–25 May 2017). IEEE, 2017. DOI:10.1109/ICC.2017.7997079
43. Yu B., Yang L., Ishii H. Load Balancing With 3-D Beamforming in Macro-Assisted Small Cell Architecture // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. Vol. 15. Iss. 8. PP. 5626–5636. DOI:10.1109/TWC.2016.2563430
44. Velazquez S.R., Broadstone S.R., Chiang A.M. Communication system using geographic position data. Patent U.S., no. 20040104839. 2004.
45. Wu W.R., Wang, Y.K. Localization-based beamforming scheme for systems with multiple antennas. Patent U.S., no. 9755797. 2017.
46. Gross F. Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB. McGraw-Hill Professional, 2005. 288 p.
47. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
48. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. Artech House, 2017. 691 p.
49. phased.URA. Uniform rectangular array // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
50. beamwidth. Beamwidth of antenna // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/beamwidth.html> (дата обращения 19.09.2023)
51. viewArray. View array geometry // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.viewarray.html> (дата обращения 19.09.2023)
52. pattern. Plot URA array pattern // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern.html> (дата обращения 19.09.2023)
53. patternAzimuth. Plot URA array directivity or pattern versus azimuth // MathWorks. URL: <https://uk.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternazimuth.html> (дата обращения 19.09.2023)
54. patternElevation. Plot URA array directivity or pattern versus elevation // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternelevation.html> (дата обращения 19.09.2023)
55. phased.SteeringVector. Sensor array steering vector // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.steeringvector-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
56. phased.ArrayGain. Sensor array gain // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.arraygain-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
57. rangeangle. Range and angle calculation // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/rangeangle.html> (дата обращения 19.09.2023)
58. fspl. Free space path loss // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/fspl.html> (дата обращения 19.09.2023)
59. Phased Array System Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased> (дата обращения 19.09.2023)
60. LAB Link Level Simulator with Phased Array System Toolbox // GitHub. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_link_level_past_rus (дата обращения 19.09.2023)

References

1. Fokin G.A. Concept of Location-Aware Beamforming in 5G Networks. *Vestnik Ssviazy*. 2022;10:1–7.
2. Russian Science Foundation. *Location aware beamforming in mm-wave band ultra-dense radio access networks*. URL: <https://rscf.ru/en/project/22-29-00528> [Accessed 10.09.2023]
3. Fokin G.A., Koucheryavy A.E. Network positioning in the 5G ecosystem. *Electrosvyaz*. 2020;9:51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
4. Fokin G.A. Utilization of Network Positioning Methods in the 5G Ecosystem. *Elektrosvyaz*. 2020;11:29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
5. Fokin G.A. *A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Fifth-Generation Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 499 p.
6. Fokin G.A. *Technologies of Network Positioning*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p.
7. Fokin G.A. *5G Network Positioning Technologies*. Moscow: Hot Line - Telecom Publ.; 2021. 456 p.
8. Fokin G.A. Simulation of ultra dense 5G radio access networks with beamforming. *T-Comm*. 2021;15(5):4–21. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-5-4-21

9. Fokin G.A. Beamforming models in ultra-dense 5G radio access networks. Part 1: Interference evaluation. *First mile*. 2021;3(95):66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73
10. Fokin G.A. Beamforming models in ultra-dense 5G radio access networks. Part 2: Device separation evaluation. *First mile*. 2021;4(96):66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72
11. Fokin G.A. Beam alignment procedures for 5G NR devices. *Elektrosvyaz*. 2022;2:26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
12. Fokin G.A. Beam management models in 5G NR networks. Part 1. Beam alignment during link establishment. *First mile*. 2022;1(101):42–49. DOI:10.22184/2070-8963.2022.101.1.42.49
13. Fokin G.A. Beam management models in 5G NR networks. Part 2. Beam alignment during radio communication. *First mile*. 2022;3(103):62–69. DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.62.68
14. Fokin G. Simulation Model of 5G NR PRS Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 1. PRS Signals Configuration. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2022;8(2):48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63
15. Fokin G. Simulation Model of 5G NR Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 2. PRS Signals Processing. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2022;8(3):80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99
16. Fokin G.A., Lazarev V.O. *Software Module for Assessing the Mutual Influence of Radio Links of Two Adaptive Antennas During Beamforming*. Patent RF, no. 2021662103, 14.07.2021.
17. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013;61(4):1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
18. Nam Y.-H., Ng B.L., Sayana K., Li Y., Zhang J., Kim Y., et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(6):172–179. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525612
19. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2014;8(5):742–758. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2317671
20. Razavizadeh S.M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2014;31(6):94–101. DOI:10.1109/MSP.2014.2335236
21. Roh W., Seol J.-Y., Park J., Lee B., Lee J., Kim Y., et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(2):106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
22. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(2):186–195. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736761
23. Sun S., Rappaport T.S., Heath R.W., Nix A., Rangan S. MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both? *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(12):110–121. DOI:10.1109/MCOM.2014.6979962
24. Han S., I C.-I., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G. *IEEE Communications Magazine*. 2015;53(1):186–194. DOI:10.1109/MCOM.2015.7010533
25. Kutty S., Sen D. Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(2):949–973. DOI:10.1109/COMST.2015.2504600
26. Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G.R., Molisch A.F., Mellios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks – With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017;65(12):6213–6230. DOI:10.1109/TAP.2017.2734243
27. Heath R.W., González-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016;10(3):436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924
28. Björnson E., Sanguinetti L., Wymeersch H., Hoydis J., Marzetta T.L. Massive MIMO is a reality – What is next? Five promising research directions for antenna arrays. *Digital Signal Processing*. 2019;94:3–20. DOI:10.1016/j.dsp.2019.06.007
29. Heng Y., Andrews J.G., Mo J., Va V., Ali A., Ng B.L., et al. Six Key Challenges for Beam Management in 5.5G and 6G Systems. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(7):74–79. DOI:10.1109/MCOM.001.2001184
30. Bang J., Chung H., Hong J., Seo H., Choi J., Kim S. Millimeter-Wave Communications: Recent Developments and Challenges of Hardware and Beam Management Algorithms. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(8):86–92. DOI:10.1109/MCOM.001.2001010
31. Maiburger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming. *Proceedings of the 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 17–20 November 2010, Eilat, Israel*. IEEE; 2010. p.000184–000187. DOI:10.1109/EEEL.2010.5661954
32. Alkhateeb A., Ayach O.El., Leus G., Heath R.W. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2014;8(5):831–846. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2334278
33. Va V., Zhang X., Heath R.W. Beam Switching for Millimeter Wave Communication to Support High Speed Trains. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 06–09 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390855
34. Va V., Heath R.W. Basic Relationship between Channel Coherence Time and Beamwidth in Vehicular Channels. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 06–09 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390852
35. Va V., Choi J., Heath R.W. The Impact of Beamwidth on Temporal Channel Variation in Vehicular Channels and Its Implications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017;66(6):5014–5029. DOI:10.1109/TVT.2016.2622164
36. Va V., Shimizu T., Bansal G., Heath R.W. Beam design for beam switching based millimeter wave vehicle-to-infrastructure communications. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 22–27 May 2016, Kuala Lumpur, Malaysia*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511414
37. Andrews J.G., Zhang X., Durgin G.D., Gupta A.K. Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? *IEEE Communications Magazine*. 2016;54(10):184–190. DOI:10.1109/MCOM.2016.7588290

38. Chiaraviglio L., Turco S., Bianchi G., Blefari-Melazzi N. "Cellular Network Densification Increases Radio-Frequency Pollution": True or False? *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022;21(4):2608–2622. DOI:10.1109/TWC.2021.3114198
39. Thors B., Furuskär A., Colombi D., Törnevik C. Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO. *IEEE Access*. 2017;5:19711–19719. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2753459
40. Chiaraviglio L., Rossetti S., Saida S., Bartoletti S., Blefari-Melazzi N. "Pencil Beamforming Increases Human Exposure to ElectroMagnetic Fields": True or False? *IEEE Access*. 2021;9:25158–25171. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3057237
41. Ali A., Karabulut U., Awada A., Viering I., Tirkkonen O., Barreto A.N., et al. System Model for Average Downlink SINR in 5G Multi-Beam Networks. *Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 08–11 September 2019, Istanbul, Turkey*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
42. Awada A., Lobinger A., Enqvist A., Talukdar A., Viering I. A simplified deterministic channel model for user mobility investigations in 5G networks. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 21–25 May 2017, Paris, France*. IEEE; 2017. DOI:10.1109/ICC.2017.7997079
43. Yu B., Yang L., Ishii H. Load Balancing With 3-D Beamforming in Macro-Assisted Small Cell Architecture. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016;15(8):5626–5636. DOI:10.1109/TWC.2016.2563430
44. Velazquez S.R., Broadstone S.R., Chiang A.M. *Communication system using geographic position data*. Patent U.S., no. 20040104839, 2004.
45. Wu W.R., Wang, Y.K. *Localization-based beamforming scheme for systems with multiple antennas*. Patent U.S., no. 9755797, 2017.
46. Gross F. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. McGraw-Hill Professional; 2005. 288 p.
47. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons; 2016. 1104 p.
48. Mailloux R.J. *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House; 2017. 691 p.
49. MathWorks. *phased.URA. Uniform rectangular array*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
50. MathWorks. *beamwidth. Beamwidth of antenna*. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/beamwidth.html> [Accessed 10.09.2023]
51. MathWorks. *viewArray. View array geometry*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.view-array.html> [Accessed 10.09.2023]
52. MathWorks. *pattern. Plot URA array pattern*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern.html> [Accessed 10.09.2023]
53. MathWorks. *patternAzimuth. Plot URA array directivity or pattern versus azimuth*. URL: <https://uk.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternazimuth.html> [Accessed 10.09.2023]
54. MathWorks. *patternElevation. Plot URA array directivity or pattern versus elevation*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern-elevation.html> [Accessed 10.09.2023]
55. MathWorks. *phased.SteeringVector. Sensor array steering vector*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.steeringvector-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
56. MathWorks. *phased.ArrayGain. Sensor array gain*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.arraygain-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
57. MathWorks. *rangeangle. Range and angle calculation*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/rangeangle.html> [Accessed 10.09.2023]
58. MathWorks. *fspl. Free space path loss*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/fspl.html> [Accessed 10.09.2023]
59. MathWorks. *Phased Array System Toolbox*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased> [Accessed 10.09.2023]
60. GitHub. *LAB Link Level Simulator with Phased Array System Toolbox*. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_link_level_past_rus [Accessed 10.09.2023]

Статья поступила в редакцию 19.07.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted 19.07.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 04.09.2023.

Информация об авторе:

**ФОКИН
Григорий Алексеевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

**2.3.1 – Системный анализ,
управление и обработка
информации**

**2.3.6 – Методы и системы защиты
информации, информационная
безопасность**

Научная статья

УДК 004.057

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74



Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно- технических систем

Сергей Иванович Макаренко¹, mak-serg@yandex.ru

Алексей Альбертович Нестеров²✉, nesterov.aa@sut.ru

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В современных условиях при интеграции организационно-технических систем (ОТС) возрастает актуальность обеспечения интероперабельности в таких системах. В данной работе рассмотрены вопросы формирования структурно-функциональной модели интероперабельности ОТС. Выделены процессы, категории и объекты, входящие в ОТС, проведена их классификация. Выявлены факторы, влияющие на интероперабельность на семантическом, организационном и техническом уровнях. Рассмотрена интероперабельность основных процессов, категорий и объектов в составе модели интероперабельности. Представлены рекомендации по дальнейшему направлению исследований в целях повышения качества интероперабельности при взаимодействии ОТС.

Ключевые слова: интероперабельность, организационная интероперабельность, техническая интероперабельность, организационно-техническая система, техническая подсистема

Ссылка для цитирования: Макаренко С.И., Нестеров А.А. Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно-технических систем // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 65–74. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74

Structural and Functional Model of Organizational and Technical Systems Interoperability

Sergey Makarenko¹, mak-serg@yandex.ru

Alexey Nesterov²✉, nesterov.aa@sut.ru

¹Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'

Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,

Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: In modern conditions, with the integration of organizational and technical systems (OTS), the relevance of ensuring interoperability in such systems is increasing. In this paper, the issues of forming a structural-functional model of OTS interoperability are considered. The processes, categories and objects included in the OTS are singled out, their classification is carried out. The factors influencing interoperability at semantic, organizational and technical levels are revealed. The interoperability of the main processes, categories and objects as part of the

interoperability model is considered. Recommendations are presented for the further direction of research in order to improve the quality of interoperability in the interaction of OTS.

Keywords: *interoperability, organizational interoperability, technical interoperability, technical subsystem, organizational and technical system*

For citation: Makarenko S., Nesterov A. Structural and Functional Model of Organizational and Technical Systems Interoperability. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):65–74. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74

Введение

К настоящему времени в отечественной науке развернут широкий фронт работ в области исследования интероперабельности, под которой понимается «способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и использованию информации, полученной в результате обмена. Отметим, что в ряде отечественных исследований термин «интероперабельность» заменяется понятием «функциональная совместимость». При этом понятие «функциональная совместимость» является семантическим эквивалентом термина «интероперабельность», что подчеркивается в соответствующих стандартах в этой области (ГОСТ Р 57377, ГОСТ Р 58538, ПНСТ 644-2022).

Исследования в области интероперабельности были начаты в 1990-х годах при активном участии: академика Российской академии наук (РАН) Ю.В. Гуляева в рамках исследований [1–3], посвященных открытым системам; лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники, профессора Л.А. Калининко, в рамках исследований [4–7], посвященных разработке методов интеграции неоднородных информационных и программных ресурсов в распределенных системах, композиционных методов проектирования распределенных систем из компонентов, методов и средств организации решения задач в инфраструктурах множественных неоднородных информационных ресурсов; профессора В.К. Батоврина, чьи работы [3, 8], посвящены исследованию проблем развития открытых систем с точки зрения теории и методов системной и программной инженерии и IT-стандартизации. При этом одной из передовых в области исследования интероперабельности является отечественная научная школа интероперабельности, возглавляемая сотрудником Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН профессором А.Я. Олейниковым. В основу этих исследований положено развитие и комплексирование передовых зарубежных результатов в области обеспечения интероперабельности, обзор которых представлен в работе [9]. Под руководством и при непосредственном участии А.Я. Олейникова в период 1995–2019 гг. были получены значимые частные результаты в области интероперабельности для информационных систем самого широкого

класса и назначения – в здравоохранении [10], в электронной коммерции [11], в образовательном процессе [12], в научных исследованиях [13], в облачных вычислениях [14], в промышленности [15], в области обеспечения обороноспособности нашей страны [16–18], а также в области интеграции космических систем [19]. Основным интегральным результатом этого периода исследований можно считать ГОСТ Р 55062, где дано определение интероперабельности, а также впервые зафиксирована отечественная эталонная модель интероперабельности и методика ее достижения. В соответствии с эталонной моделью взаимодействие информационных систем формализуется на трех иерархических уровнях интероперабельности (рис. 1): техническом, семантическом, организационном» [20].

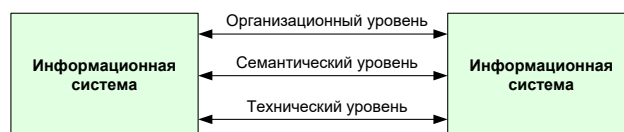


Рис. 1. Отечественная эталонная модель интероперабельности

Fig. 1. Domestic Reference Model of Interoperability

Уровень интероперабельности – степень абстракции, детализации и специфики описания процесса обмена информацией и использования информации, полученной в результате такого обмена.

На организационном уровне описываются цели организаций, их бизнес-процессов, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия.

Семантический уровень интероперабельности описывает стандарты, нормы и правила единообразной и правильной интерпретации смысла информации. Семантическая интероперабельность позволяет системам комбинировать полученную информацию с другими информационными ресурсами и обрабатывать ее смысловое содержание.

Технический уровень описывает процессы информационного взаимодействия между техническими системами, техническими средствами, аппаратными и программными комплексами с учетом особенностей реализации их интерфейсов и протоколов обмена информацией, а также форм и форматов представления информации.

Исследования интероперабельности представителями научной школы А.Я. Олейникова продолжают, и среди значимых результатов можно выделить работы [21–26]. Некоторые аспекты проблемы интероперабельности исследуются и специалистами в других областях, в том числе в области здравоохранения – В.А. Дрогозовом [27–29] и в области государственного управления – Ю.М. Акаткиным и Е.Д. Ясиновской [30], Е.В. Франгуловой [31]. Однако большая часть вышеперечисленных работ в области интероперабельности относится к информационному взаимодействию конкретных технических систем, то есть к технической интероперабельности. В этих работах не ставится задача формирования единой общей модели интероперабельности произвольных организационно-технических систем (ОТС) одновременно на организационном, семантическом и техническом уровнях, также в них не ставится задачи по обобщению полученных результатов на более широкий класс систем – больших/сложных открытых информационных ОТС. Из этого можно сделать вывод, что эталонная модель интероперабельности, представленная в ГОСТ Р 55062 [20], а также материал известных публикаций в области интероперабельности не в достаточной степени конкретизирует процессы, категории и объекты ОТС по уровням интероперабельности. Таким образом, актуальной целью исследований является формирование структурно-функциональной модели интероперабельности ОТС, чему и посвящена настоящая статья.

Она продолжает цикл работ авторов, посвященных проблематике обеспечения интероперабельности [32–36]. Разрабатываемая в данной статье модель носит обобщенный, в наименьшей степени формализованный характер. Однако, несмотря на свою общность, эта модель охватывает основные взаимодействующие процессы, категории, объекты и уровни интероперабельности, что позволяет распространить ее на широкий класс реальных ОТС. В дальнейшем авторы планируют продолжить исследования, в ходе которых будут рассмотрены задачи обеспечения повышения качества интероперабельности при взаимодействии различных ОТС и их компонентов.

Схема модели, основные процессы, категории и объекты

Структурно-функциональная модель интероперабельности ОТС, «де-юре», ранее была представлена в ГОСТ Р ИСО 11354-1-2012 «Усовершенствованные автоматизированные технологии и их применение. Требования к установлению интероперабельности процессов промышленных предприятий» [37]. Однако в связи с тем, что этот ГОСТ по своей сути является прямым переводом

международного стандарта ISO 11354-1:2011 «Advanced automation technologies and their applications – Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability – Part 1: Framework for enterprise interoperability» [38], представленную в нем модель необходимо модифицировать путем терминологического и структурного согласования с эталонной отечественной моделью интероперабельности, представленной в ГОСТ Р 55062-2012 [20], а также с новыми стандартами по интероперабельности сетевых и сложных систем – ГОСТ Р 70569-2022 [39] и ГОСТ Р 59797-2021 [40].

При формировании структурно-функциональной модели самой ОТС можно представить как совокупность организационной и технической подсистем.

Организационная подсистема ОТС – совокупность: персонала, иерархии подчиненности, структуры и принципов управления структурой, принципов информационного взаимодействия между людьми.

Техническая подсистема ОТС – совокупность технических подсистем, комплексов или средств, построенных на основе принципов механики, автоматики, электроники, радиотехники, программной инженерии или робототехники, выполняющих автоматические и автоматизированные функции по реализации информационных процессов или процессов управления в системе.

Вариант такой модифицированной структурно-функциональной модели интероперабельности ОТС представлен на рисунке 2: взаимодействующие ОТС, их организационная и техническая подсистемы, а также те процессы, категории и объекты ОТС, которые входят в порядок регламентации организационного, семантического и технического уровней интероперабельности. Необходимо отметить следующее: несмотря на то, что на рисунке 2 представлены две ОТС, указанная на рисунке логика взаимодействия может быть распространена не только на целые системы (для внешней интероперабельности), но и на взаимодействие отдельных организационных подразделений внутри одной и той же системы (для внутренней).

В составе модели представлены следующие процессы, категории и объекты:

1) *цели и задачи организации* – общая направленность организации на удовлетворение социально-значимых потребностей общества, получение коммерческой выгоды, производства продукции (изделий, товаров и услуг) т. д. *Цели организации* – результаты, которых стремится достичь организация, и на достижение которых направлена ее деятельность, например, получение прибыли. *Задачи организации* – частные цели, которые необходимо достичь, или трудности, которые необходимо преодолеть в рамках планового периода, для достижения глобальных целей организации;

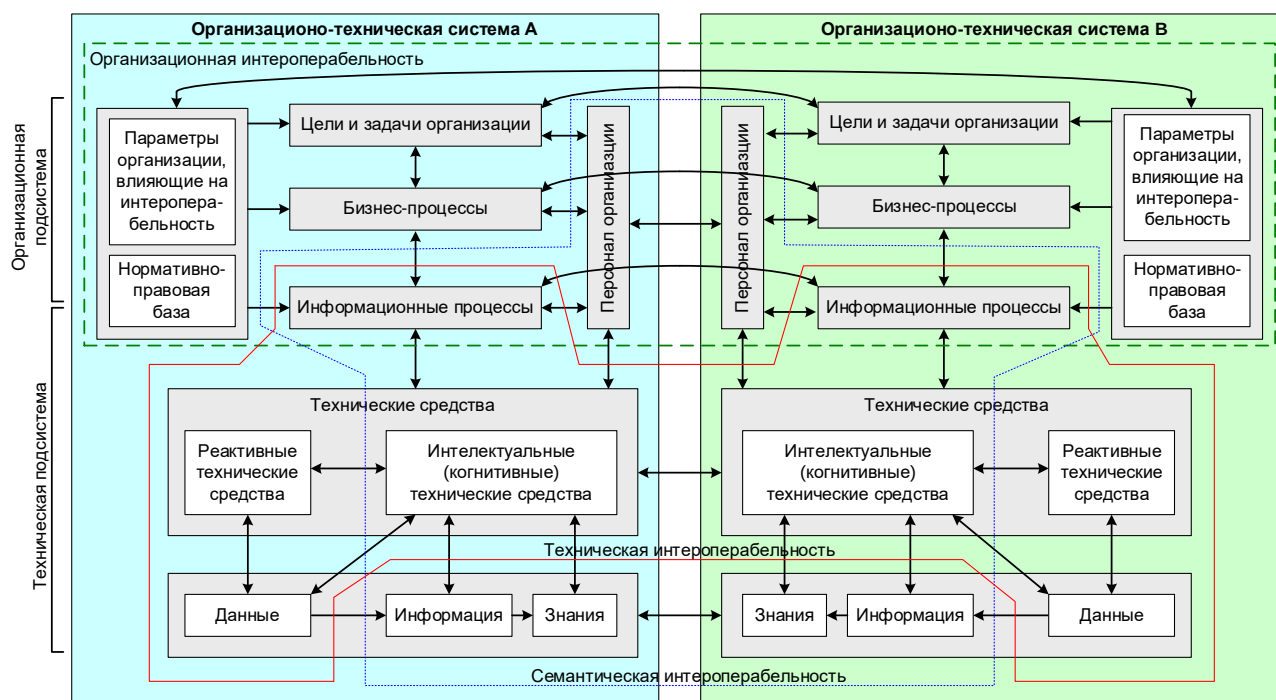


Рис. 2. Структурно-функциональная модель интероперабельности ОТС

Fig. 2. Structural-Functional Model of OTS Interoperability

2) *бизнес-процессы* – совокупность взаимосвязанных мероприятий или работ, направленных на достижение целей организации;

3) *персонал организации* – совокупность: лиц, принимающих решения, менеджеров, командиров и начальников; пользователей; специалистов различного профиля, вовлеченных в бизнес-процессы организации в интересах достижения ее целей;

4) *информационные процессы* – это процедуры и операции, проводимые над информацией, которые включают в себя формирование, сбор и передачу, хранение и архивацию, обработку, использование, представление и уничтожение информации;

5) *технические средства* (ТС) – в рамках данной модели: совокупность технических подсистем, комплексов или средств, построенных на основе принципов механики, автоматики, электроники, радиотехники, программной инженерии или робототехники, выполняющих автоматические и автоматизированные функции по реализации информационных процессов или процессов управления в системе; в составе технических средств можно выделить:

– *интеллектуальные технические средства* (ИТС) – технические подсистемы, комплексы или средства, в которых реализована собственная модель знаний и система интеллектуальных функций, в том числе функций взаимодействия, выполнение которых традиционно считаются прерогативой человека, а именно: осознание новых ситуаций; обучение и запоминание на основе предыдущего опыта; понимание и применение абстрактных концепций; познание и формирова-

ние знаний; использование знаний для решения проблем и управления окружающей средой;

– *реактивные технические средства* (РТС) – технические подсистемы, комплексы или средства, построенные по принципу «входная информация – реакция»; в таких средствах отсутствует собственная модель знаний, а взаимодействие с таким типом средств формируется на основе некоторого набора типовых выходных реакций, которые зависят от входных данных и состояния; как правило, РТС реализуются в виде механической или автоматной системы, выполняющей простейшие неинтеллектуальные функции в ОТС;

6) *данные* – поддающееся многократной интерпретации представление информации в формализованном знаково-символьном виде, пригодном для формирования, сбора, хранения, передачи, обработки или представления в информационных системах [41]; информационные процессы над данными могут выполнять все виды технических средств и персонал организации;

7) *информация* – сведения, независимо от формы их представления, относительно фактов, событий, вещей, идей и понятий, которые в определенном контексте имеют конкретный смысл (семантическое значение) и интерпретацию [41]; в обобщенном виде можно записать в виде выражения: «информация» = «данные» + «смысл»; (информационные) процессы над информацией могут производить только персонал организации и ИТС; РТС не могут извлекать и обрабатывать смысл информации из совокупности данных;

6) *знания* – совокупность информации о некоторой предметной области, хранящаяся в формально-упорядоченном виде и пригодной для решения какой-либо задачи или достижения определенной цели; проверенный практикой и удостоверяемый логикой результат познания действительности, отраженный в виде представлений, понятий, суждений и теорий [41]; в обобщенном виде можно записать в виде выражения: «знания» = «информация» + «цель ее использования»; информационные процессы над знаниями могут производить только люди и ИТС; РТС не могут извлекать знания из информации и применять их для решения новых задач;

7) *нормативно-правовая база* – в рамках данной модели: совокупность нормативно-правовых актов и документов, регламентирующих вопросы интероперабельности;

8) *параметры организации, влияющие на интероперабельность* – в рамках данной модели это разнообразные параметры, факторы и аспекты организационной подсистемы ОТС, прямо или косвенно влияющие на степень достижения интероперабельности ОТС в целом; к таким параметрам можно отнести тип и размер организации, принятая в ней система управления и структура информационных связей, наличие барьеров интероперабельности на организационном уровне и т. д.

Интероперабельность основных процессов, категорий и объектов в составе модели

На организационном уровне формализуются совместимость или совместность целей организаций, их бизнес-процессов, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия.

Организационная интероперабельность – совместимость или совместность целей организаций, их бизнес-процессов, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия. В составе организационной интероперабельности рассматриваются не только параметры, относящиеся непосредственно к организационной подсистеме ОТС (например, такие как тип организации, особенности организации бизнес-процессов, структура, масштаб и плотность информационных связей и т. д.), но и нормативно-правовой базис (законы, стандарты, рекомендации и т. д.), регламентирующий обеспечение интероперабельности на всех ее уровнях – организационном, семантическом и техническом.

Организационная интероперабельность зависит от:

1) совместности целей и задач ОТС – наличия на организационном уровне общих и взаимно-вложенных целей и задач в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных

подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней); наличие общих целей и задач является первопричиной, запускающей процесс информационного взаимодействия в интересах организации совместных действий; отсутствие общих целей и задач соответствует случаю, когда у ОТС нет причин в каком-либо информационном взаимодействии вследствие того, что они работают в разных областях;

2) взаимосвязанности бизнес-процессов ОТС – наличия на организационном уровне общих или взаимосвязанных бизнес-процессов в рамках достижения общих целей и решения совместных задач в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней);

3) необходимости информационного взаимодействия персонала ОТС – наличия на организационном уровне потребности в процессах информационного обмена между должностными лицами ОТС по принципам «человек – человек», «человек – ТС – человек» в рамках обеспечения реализации общих или взаимосвязанных бизнес-процессов в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней);

4) взаимосвязанности информационных процессов ОТС – наличия на организационном уровне общих или взаимосвязанных информационных процессов по принципам «человек – человек», «человек – ТС – человек» и «человек – ТС» в рамках обеспечения реализации общих или взаимосвязанных бизнес-процессов в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней);

5) совместности нормативно-правовых баз ОТС – наличия на организационном уровне общих или юридически совместимых нормативно-правовых актов и документов, регламентирующих информационное взаимодействие в рамках обеспечения реализации общих или взаимосвязанных бизнес-процессов в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней);

6) общности или совместности других параметров ОТС, влияющих на интероперабельность.

На семантическом уровне формализуются стандарты, нормы и правила единообразной и правильной интерпретации смысла информации.

Семантическая интероперабельность – способность взаимодействующих объектов правильно и одинаковым образом интерпретировать смысл информации, которой они обмениваются.

Семантическая интероперабельность зависит от:

1) однозначной трактовки смысла сообщений, передаваемых в процессах информационного обмена между должностными лицами ОТС по прин-

ципам «человек – человек», «человек – ТС – человек», в рамках обеспечения реализации общих или взаимосвязанных бизнес-процессов в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней), а также от влияния факторов культурного базиса, национальности, религии, социальной роли, используемого языка, образования, опыта и индивидуальных врожденных способностей, таких как интеллект, физические особенности речи, слуха, зрения, обоняния, осязания и т. д. на интерпретацию смысла сообщений;

2) однозначной трактовки смысла сообщений, передаваемых в процессах информационного обмена между персоналом и ТС, особенно – ИТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в различных подразделениях одной и той же ОТС (для внутренней);

3) семантической совместимости сообщений по смыслу, целям, предметной области и контексту в рамках информационных процессов, протекающих по направлениям «человек – ИТС», «ИТС – ИТС» и «ИТС – РТС» в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

4) семантической совместимости процессов извлечения ИТС смысла информации из совокупности данных, а также знаний из совокупности информации;

5) совместимости и переносимости баз знаний и обмена знаниями между отдельными ИТС.

На *техническом уровне* формализуются процессы информационного взаимодействия между техническими системами, техническими средствами, аппаратными и программными комплексами с учетом особенностей реализации их интерфейсов и протоколов обмена информацией, а также форм и форматов представления информации.

Техническая интероперабельность – способность к обмену информацией между участвующими в нем системами с использованием технических средств.

Техническая интероперабельность зависит от:

1) совместимости и переносимости данных в рамках информационных процессов между ТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

2) совместимости сетевых протоколов, интерфейсов и требований по качеству обслуживания в рамках информационных процессов между ТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

3) совместимости процедур формирования, поиска, передачи, хранения, обработки и представления информации в рамках информационных процессов между ТС в различных ОТС (для внеш-

ней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

4) совместимости процедур автоматизации сетевого взаимодействия и принятия решений в рамках информационных процессов между ТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

5) совместимости процедур обеспечения информационной безопасности в рамках информационных процессов между ТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней);

6) совместимости и эргономики человеко-машинных интерфейсов в рамках информационных процессов между человеком и ТС в различных ОТС (для внешней интероперабельности) или в одной и той же ОТС (для внутренней).

Межуровневая связь интероперабельности через совместные процессы, категории и объекты

Как было показано на рисунке 2, различные процессы, категории и объекты по-разному распределены по уровням интероперабельности – организационному, семантическому и техническому. Некоторые объекты и процессы одновременно включены в несколько уровней. Такая межуровневая «включенность» соответствует так называемым «межуровневым медиаторам интероперабельности» (*от лат. mediator – посредник*) т. е. совместным процессам, категориям и объектам ОТС, которые связывают воедино различные уровни интероперабельности, при этом различные аспекты этих объектов рассматриваются отдельно на различных уровнях.

Так, информационные процессы включены во все три уровня интероперабельности. Это обусловлено их универсальностью, а также тем, что различные аспекты информационных процессов по-разному рассматриваются на различных уровнях интероперабельности. На организационном уровне информационные процессы рассматриваются как часть бизнес-процессов, а также как часть процессов информационного взаимодействия между персоналом. На семантическом уровне рассматриваются вопросы правильной интерпретации смысла информации во взаимодействиях «человек – человек», «человек – ТС» и «ТС – ТС», вопросы извлечения из информации ее смысла и знаний ИТС, а также обмен информацией между РТС и ИТС, а также между ними и человеком. На техническом уровне уже рассматриваются вопросы конкретной реализации информационных процессов в виде конечных функций аппаратно-электронных или программных средств в составе информационно-управляющих систем.

Персонал организации на организационном уровне рассматривается в аспектах вовлеченности в документооборот и в информационное взаимодействие по управленческой иерархии в своей и в других организациях. На семантическом уровне люди, как «элементы персонала», рассматриваются в аспектах влияния различных факторов (способностей, знания языков и профессиональной терминологии, уровня образования, отношения к определенной культуре, национальности, религии и т. д.) на интерпретацию смысла информации. Здесь же учитываются особенности информационного взаимодействия «человек – человек», «человек – ТС» и «человек – ТС – человек» в аспектах правильной интерпретации смысла передаваемой/получаемой информации, в том числе – проходящей многократную ретрансляцию и обработку ТС.

ИТС на семантическом уровне рассматриваются в аспектах взаимодействия «человек – ИТС», извлечения из информации ее смысла и знаний автоматизированными интеллектуальными способами, а также обмен информацией между ИТС и РТС. На техническом уровне рассматриваются вопросы конкретной реализации ИТС в виде интеллектуальных функций аппаратно-электронных или программных средств в составе систем поддержки принятия решений или информационно-управляющих систем.

Данные на семантическом уровне рассматриваются в аспектах извлечения из них информации, интерпретации ее смысла и формирования знаний со стороны ИТС. На техническом уровне рассмат-

риваются вопросы формирования, сбора и передачи, хранения и архивации, обработки, использования и представления данных, как информации в формализованной знаково-символьной форме в виде конечных функций аппаратно-электронных или программных средств в составе информационно-управляющих систем.

Заключение

В данной работе представлена структурно-функциональная модель интероперабельности ОТС, охватывающая основные взаимодействующие процессы, категории, объекты и уровни интероперабельности. В модели выделены факторы, влияющие на интероперабельность на семантическом, организационном и техническом уровнях. Рассмотрена интероперабельность основных процессов, категорий и объектов в составе структурно-функциональной модели. Представленная модель отражает с необходимой полнотой взаимодействие ОТС в основных содержательных аспектах, но при этом носит обобщенный и в наименьшей степени формализованный характер. Однако эта модель может служить базой для дальнейших исследований, проводимых в целях повышения качества интероперабельности при взаимодействии ОТС на семантическом, организационном и техническом уровнях. В ходе дальнейших исследований целесообразно рассмотреть задачи разработки элементов научно-методического аппарата, обеспечивающих повышение качества интероперабельности при взаимодействии различных ОТС и их компонентов.

Список источников

1. Гуляев Ю.В., Олейников А.Я., Филинов Е.Н. Развитие и применение открытых систем в Российской Федерации // Информационные технологии и вычислительные системы. 1995. № 1. С. 32–43.
2. Гуляев Ю.В., Олейников А.Я. Технология открытых систем – основное направление информационных технологий // Информационные технологии и вычислительные системы. 1997. № 3. С. 4–14.
3. Батоврин В.К., Васютювич В.В., Гуляев Ю.В., Козлов В.А. Технология открытых систем. М.: Янус-К, 2004. 288 с.
4. Калинин Л.А., Брюхов Д.О., Коголовский М.Р., Кравченко Д.В., Романов В.Ю., Рябов Ю.Ф., Рябошапка А.А., Сухомлин В.А., Чабан И.А. Обеспечение информационной и научно-методической поддержки проектов РФФИ на основе объектных технологий для создания открытых интероперабельных информационных и вычислительных ресурсов для фундаментальной науки и образования. Отчет о НИР № 97-07-90369. РФФИ. 1997.
5. Брюхов Д.О., Задорожный В.И., Калинин Л.А., Куршов М.Ю., Шумилов С.С. Интероперабельные информационные системы: архитектуры и технологии // Системы управления базами данных. 1995. № 4. URL: <https://www.osp.ru/dbms/1995/04/13031453> (дата обращения 04.08.2023)
6. Калинин Л.А. СИНТЕЗ – язык определения, программирования и проектирования интероперабельных сред неоднородных информационных ресурсов. М.: ИПИ РАН, 1993. 113 с.
7. Kalinichenko L. A declarative framework for capturing dynamic behaviour in heterogeneous interoperable information resource environment // Proceedings of the 3rd International Workshop on Research Issues in Data Engineering: Interoperability in Multidatabase Systems (RIDE-IMS 1993, Vienna, Austria, 19–20 апреля 1993). IEEE, 1993. PP. 249–252. DOI:10.1109/RIDE.1993.281913
8. Батоврин В.К. Использование принципов открытых систем в системной инженерии // Информационные технологии и вычислительные системы. 2006. № 3. С. 19–41.
9. Макаренко С.И., Олейников А.Я., Черницкая Т.Е. Модели интероперабельности информационных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 215–245. DOI:10.24411/2410-9916-2019-10408
10. Анциперов В.Е., Каменщиков А.А., Кочуков А., Никитов Д.С., Олейников А.Я. Функциональная стандартизация при создании медицинских информационных систем // Врач и информационные технологии. 2006. № 4. С. 15–18.
11. Олейников А.Я., Разинкин Е.И. Профиль интероперабельности в области электронной коммерции // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 74–79.

12. Олейников А.Я., Меркулова А.В. К вопросу о построении интегрированной корпоративной информационной среды вуза // Журнал радиоэлектроники. 2005. № 5. С. 4.
13. Батоврин В.К., Васютин В.В., Журавлев Е.Е., Олейников А.Я., Петров А.Б., Соколов С.А., Теряев Е.Д. Построение профиля информационных, вычислительных и телекоммуникационных ресурсов для обеспечения фундаментальных исследований // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 11. С. 8.
14. Журавлев Е.Е., Иванов С.В., Каменщиков А.А., Олейников А.Я., Разинкин Е.И., Рубан К.А. Интероперабельность в облачных вычислениях // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 9. С. 14.
15. Олейников А.Я., Егоров Г.А., Журавлев Е.Е., Королев А.С., Кочуков А.Н., Широбокова Т.Д. Применение технологии открытых систем для создания интегрированных информационных систем промышленных предприятий // Радиопромышленность. 2006. № 2. С. 90–107.
16. Башлыкова А.А., Каменщиков А.А., Олейников А.Я. О подходах к разработке профилей интероперабельности в военной области // Информационные технологии и вычислительные системы. 2017. № 4. С. 112–121.
17. Каменщиков А.А., Олейников А.Я., Чусов И.И., Широбокова Т.Д. Проблема интероперабельности в информационных системах военного назначения // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 16.
18. Башлыкова А.А., Каменщиков А.А., Олейников А.Я. Обеспечение интероперабельности как средства бесшовной интеграции функциональных подсистем в составе перспективных автоматизированных систем военного назначения // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 18.
19. Макаренко С.И., Карутин А.Н. Перспективы и проблемные вопросы обеспечения интероперабельности интегрированных космических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 228–247. DOI:10.24412/2410-9916-2021-4-228-247
20. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
21. Олейников А.Я., Растягаев Д.В., Фомин И.А. Основные положения концепции обеспечения интероперабельности сетевых информационных управляющих систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 3. С. 122–131. DOI:10.25586/RNU.V9187.20.03.P.122
22. Олейников А.Я. Актуальное состояние проблемы интероперабельности // ИТ-Стандарт. 2020. № 2(23). С. 37–42.
23. Козлов С.В. Процессные аспекты интероперабельности интегрированных систем управления // ИТ-Стандарт. 2019. № 1(18). С. 25–30.
24. Башлыкова А.А., Зацаринный А.А., Каменщиков А.А., Козлов С.В., Олейников А.Я., Чусов И.И. Интероперабельность как научно-методическая и нормативная основа бесшовной интеграции информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28. № 4. С. 61–72. DOI:10.14357/08696527180407
25. Башлыкова А.А., Гаджикулиев Т.А., Олейников А.Я. Решение проблемы интероперабельности в проектах «умного города» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15. № 3. С. 767–774. DOI:10.25559/SITITO.15.201903.767-774
26. Макаренко С.И. Интероперабельность человеко-машинных интерфейсов. СПб.: Научные технологии, 2023. 185 с.
27. Дроговоз В.А. Совершенствование оценки показателей интероперабельности сложных систем при помощи сценарного моделирования // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (Воронеж, Россия, 18–20 апреля 2023). Т. 5. Воронеж: ВГУ, 2023. С. 361–369.
28. Дроговоз В.А. Обеспечение интероперабельности электронного здравоохранения в условиях цифровой трансформации экономики России // Сборник трудов XII Международной научной конференции «ИТ-Стандарт 2023» (18–19 апреля 2023, Москва, Россия). М.: Издательство «Проспект», 2023. С. 89–97.
29. Дроговоз В.А. Концептуальные аспекты обеспечения интероперабельности электронного здравоохранения в условиях цифровой трансформации экономики России // ИТ-стандарт. 2023. № 2. С. 51–61.
30. Акаткин Ю.М., Ясиновская Е.Д. Цифровая трансформация государственного управления: Датацентричность и семантическая интероперабельность. М.: URSS, 2019. 724 с.
31. Франгулова Е.В. Классификация подходов к интеграции и интероперабельности информационных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 176–180.
32. Макаренко С.И., Соловьева О.С. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетевых информационных систем // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 4. DOI:10.30898/1684-1719.2021.4.10
33. Макаренко С.И., Соловьева О.С. Семантическая интероперабельность взаимодействия элементов в сетевых информационных системах // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. DOI:10.30898/1684-1719.2021.6.3
34. Макаренко С.И. Семантическая совместимость человеческих агентов при обеспечении интероперабельности в сетевых информационных системах // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 1. DOI:10.30898/1684-1719.2022.1.1
35. Макаренко С.И. Семантическая интероперабельность человеко-машинных интерфейсов в сетевых информационных системах // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 2. DOI:10.30898/1684-1719.2022.2.4
36. Макаренко С.И. Совместимость и переносимость данных при обеспечении технической интероперабельности сетевых информационных систем // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 7. DOI:10.30898/1684-1719.2022.7.1
37. ГОСТ Р ИСО 11354-1-2012. Усовершенствованные автоматизированные технологии и их применение. Требования к установлению интероперабельности процессов промышленных предприятий. Часть 1. Основа интероперабельности предприятий. М.: Стандартинформ, 2014.
38. ISO 11354-1:2011 (2011-09). Advanced automation technologies and their applications – Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability – Part 1: Framework for enterprise interoperability.

39. ГОСТ Р 70569-2022. Информационные технологии. Сетецентрические информационно-управляющие системы. Интероперабельность. М.: Российский институт стандартизации, 2022.
40. ГОСТ Р 59797-2021. Информационные технологии. Сложные системы. Интероперабельность. Основные положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.
41. Макаренко С.И. Справочник научных терминов и обозначений. СПб.: Научные технологии, 2019. 254 с.

References

1. Gulyaev Yu.V., Oleinikov A.Ya., Filinov E.N. Development and application of open systems in the Russian Federation. *Information Technologies and Computing Systems*. 1995;1:32–43.
2. Gulyaev Yu.V., Oleinikov A.Ya. Open systems technology – the main direction of information technology. *Information Technologies and Computing Systems*. 1997;3:4–14.
3. Batovrin V.K., Vasyutovich V.V., Gulyaev Yu.V., Kozlov V.A. *Open Systems Technology*. Moscow: Janus-K Publ.; 2004. 288 p.
4. Kalinichenko L.A., Bryukhov D.O., Kogalovsky M.R., Kravchenko D.V., Romanov V.Yu., Ryabov Yu.F., Ryaboshapko A.A., Sukhomlin V.A., Chaban I.A. *Providing information and scientific and methodological support for RFBR projects based on object technologies for creating open interoperable information and computing resources for fundamental science and education*. Research Report No. 97-07-90369. RFFI. 1997.
5. Bryukhov D.O., Zadorozhny V.I., Kalinichenko L.A., Kuroshev M.Yu., Shumilov S.S. Interoperable information systems: architectures and technologies. *Database management systems*. 1995;4 URL: <https://www.osp.ru/dbms/1995/04/13031453> [Accessed 08.04.2023]
6. Kalinichenko L.A. SYNTHESIS – language for defining, programming and designing interoperable environments of heterogeneous information resources. Moscow: IPI RAN Publ.; 1993. 113 p.
7. Kalinichenko L. A declarative framework for capturing dynamic behaviour in heterogeneous interoperable information resource environment. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Research Issues in Data Engineering: Interoperability in Multidatabase Systems, RIDE-IMS 1993, 19–20 апреля 1993, Vienna, Austria*. IEEE; 1993. p.249–252. DOI:10.1109/RIDE.1993.281913
8. Batovrin V.K. Using the principles of open systems in system engineering. *Information Technologies and Computing Systems*. 2006;3:19–41.
9. Makarenko S.I., Oleynikov A.Y., Chernitskaya T.E. Models of interoperability assessment for information systems. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019;4:215–245. DOI:10.24411/2410-9916-2019-10408
10. Antsiperov V.E., Kamenshchikov A.A., Kochukov A., Nikitov D.S., Oleinikov A.Ya. Functional standardization in the creation of medical information systems. *Medical doctor and information technologies*. 2006;4:15-18.
11. Oleynikov A.Ya., Razinkin E.I. The interoperability profile in the electronic commerce. *Computer Science and Control*. 2013;4:74–79.
12. Oleynikov A.Y., Merkulova A.V. On the issue of building an integrated corporate information environment of the university. *Journal of Radio Electronics*. 2005;5:4.
13. Batovrin V.K., Vasyutovich V.V., Zhuravlev Ye.Ye., Oleynikov A.Y., Petrov A.B., Sokolov S.A., Teryayev Ye.D. Building a profile of information, computing and telecommunications resources to support fundamental research. *Journal of Radio Electronics*. 2001;11:8.
14. Zhuravlev Ye.Ye., Ivanov S.V., Kamenshchikov A.A., Oleynikov A.Y., Razinkin E.I., Ruban K.A. Interoperability in cloud computing. *Journal of Radio Electronics*. 2013;9:14.
15. Oleynikov A.Ya., Yegorov G.A., Zhuravlev Ye.Ye., Korolev A.S., Kochukov A.N., Shirobokova T.D. Application of open systems technology to create integrated information systems of industrial enterprises. *Radiopromyshlennost*. 2006;2:90–107.
16. Bashlykova A.A., Kamenshchikov A.A., Oleynikov A.Ya. On approaches to the development of interoperability profiles in the military field. *Computer Science and Control*. 2017;4:112–121.
17. Kamenshchikov A.A., Oleynikov A.Y., Chusov I.I., Shirobokova T.D. The problem of interoperability in military information systems. *Journal of Radio Electronics*. 2016;1:16.
18. Bashlykova A.A., Kamenshchikov A.A., Oleynikov A.Y. Ensuring interoperability as a means of seamless integration of functional subsystems as part of advanced automated military systems. *Journal of Radio Electronics*. 2018;9:18.
19. Makarenko S.I., Karutin A.N. Prospects and problematic issues of ensuring the interoperability of integrated space systems. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021;4:228–247. DOI:10.24412/2410-9916-2021-4-228-247
20. GOST R 55062-2012. *Information technologies. Industrial automation systems and integration. Interoperability. Basic principles*. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 12 p.
21. Oleynikov A.Ya., Rastyagayev D.V., Fomin I.A. Basic provisions of the concept of ensuring the interoperability of the network information and control systems. *Bulletin of RosNII*. 2020;3:122–131. DOI:10.25586/RNU.V9187.20.03.P.122.
22. Oleynikov A.Ya. Current status of the interoperability problem. *IT-Standart*. 2020;2(23):37–42.
23. Kozlov S.V. Process aspects of interoperability integrated control systems. *IT-Standart*. 2019;1(18):25–30.
24. Bashlykova A.A., Zatsarinnyy A.A., Kamenshchikov A.A., Kozlov S.V., Oleynikov A.Ya., Chusov I.I. Interoperability as a scientific, methodical, and regulatory base of information and telecommunication systems seamless integration. *Systems and Means of Informatics*. 2018;28(4):61–72. DOI:10.14357/08696527180407
25. Bashlykova A.A., Gadzhikuliyeu T.A., Oleynikov A.Ya. Solution of interoperability problems in smart city projects. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2019;15(3):767–774. DOI:10.25559/SITITO.15.201903.767-774
26. Makarenko S.I. *Interoperability of human-machine interfaces*. St. Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii Publ.; 2023. 185 p.

27. Drogozov V.A. Improving the assessment of interoperability indicators of complex systems using scenario modeling. *Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference on Radar, Navigation, Communication, Voronezh, Russia, 18–20 April 2023, vol.5*. Voronezh: VGU Publ.; 2023. p.361–369.
28. Drogozov V.A. Ensuring the interoperability of e-health in the context of the digital transformation of the Russian economy. *Proceedings of the XII International Scientific Conference on IT Standard 2023*. Moscow: Prospekt Publ.; 2023. p.89–97.
29. Drogozov V.A. Conceptual aspects of ensuring the interoperability of e-health in the context of digital transformation of the Russian economy. *IT-Standart*. 2023;2:51–61.
30. Akatkin Yu.M., Yasinovskaya E.D. *Digital Transformation of Public Administration: Datacentricity and Semantic Interoperability*. Moscow: URSS Publ.; 2019. 724 p.
31. Frangulova E.V. Classification of approaches to integration and interoperability of information systems. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and informatics*. 2010;2:176–180.
32. Makarenko S.I., Solovieva O.S. The main provisions of the concept of semantic interoperability of network-centric systems. *Journal of Radio Electronics*. 2021;4. DOI:10.30898/1684-1719.2021.4.10
33. Makarenko S.I., Solovieva O.S. Semantic interoperability of interaction of elements in network-centric systems. *Journal of Radio Electronics*. 2021;6. DOI:10.30898/1684-1719.2021.6.3
34. Makarenko S.I. Semantic interoperability human agents in net-centric systems. *Journal of Radio Electronics*. 2022;1. DOI:10.30898/1684-1719.2022.1.1
35. Makarenko S.I. Semantic interoperability of human-machine interfaces in net-centric systems. *Journal of Radio Electronics*. 2022;2. DOI:10.30898/1684-1719.2022.2.4
36. Makarenko S.I. Data compatibility and portability for ensuring technical interoperability of network-centric systems. *Journal of Radio Electronics*. 2022;7. DOI:10.30898/1684-1719.2022.7.1
37. GOST R ISO 11354-1-2012. *Advanced automation technologies and their applications. Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability. Part 1. Framework for enterprise interoperability*. Moscow: Standartinform Publ.; 2014.
38. ISO 11354-1:2011. *Advanced automation technologies and their applications – Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability – Part 1: Framework for enterprise interoperability*; 2011-09.
39. GOST R 70569-2022. *Information technologies. Network-centric information-control systems. Interoperability*. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii Publ.; 2022.
40. GOST R 59797-2021. *Information technology. Complex systems. Interoperability. Basic provisions*. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii Publ.; 2021. 11 p.
41. Makarenko S.I. *Reference book of scientific terms and notation*. St. Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii Publ.; 2019. 254 p.

Статья поступила в редакцию 31.07.2023; одобрена после рецензирования 23.08.2023; принята к публикации 06.09.2023.

The article was submitted 31.07.2023; approved after reviewing 23.08.2023; accepted for publication 06.09.2023.

Информация об авторах:

**МАКАРЕНКО
Сергей Иванович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
 <https://orcid.org/0000-0001-9385-2074>

**НЕСТЕРОВ
Алексей Альбертович**

начальник управления организации научной работы и подготовки научных кадров Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0006-0793-9549>

Научная статья

УДК 04.77

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85



Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа

Анастасия Вячеславовна Марочкина✉, anastasiy1996@mail.ru

Александр Иванович Парамонов, alex-in-spb@yandex.ru

Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 123232, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи:* эволюция инфокоммуникационной системы сопровождается развитием технологий и услуг связи. Общие тенденции этого процесса выражаются в трех основных направлениях: повышении пропускной способности, уменьшении задержки доставки данных и массовых коммуникациях. Последнее характеризуется развитием Интернета вещей (ИВ). Сети ИВ строятся с использованием различных технологий. Большое количество подключенных устройств требует применения новых подходов к моделированию и методов построения и управления такими сетями. Для моделирования сетей с высокой плотностью устройств часто недостаточно применения плоских моделей, а приходится прибегать к построению моделей в трехмерном пространстве. Для функционирования сетей с большим количеством узлов необходимы эффективные методы выбора их структуры, такие как выбор головных узлов, кластеризация и выбор маршрутов доставки трафика. Задача маршрутизации является классической задачей построения логической структуры сети связи, однако в условиях сетей высокой плотности необходимо использовать дополнительные возможности повышения эффективности ее решения. Классические методы и алгоритмы маршрутизации оперируют, как правило, одним критерием выбора, что может оказаться не эффективным решением в таких условиях. В беспроводных сетях ИВ высокой плотности необходимо учитывать большее количество параметров, так как качество маршрута в них зависит от многих факторов. Таким образом, для повышения эффективности сетей ИВ актуальна разработка метода маршрутизации по ряду критериев. Этой задаче и посвящена настоящая работа. **Целью работы** является разработка метода многокритериальной маршрутизации трафика в сети ИВ высокой плотности. Для достижения цели в работе предлагается подход к использованию серого реляционного анализа, позволяющего эффективно решать задачу многокритериальной оптимизации маршрута, в том числе при малом объеме исходных данных. **Объектом исследования** является сеть Интернета вещей высокой плотности. **Предметом исследования** является метод многокритериальной маршрутизации, реализованный с использованием серого реляционного анализа. Результаты имитационного моделирования показали эффективность предложенного метода по сравнению с методами однокритериального выбора маршрутов. **Используемым методом** является метод серого реляционного анализа, позволяющего решать задачи многокритериальной оптимизации. **Новизна работы** заключается в предложенном методе применения серого реляционного анализа для решения многокритериальной задачи маршрутизации в сети ИВ высокой плотности. **Результатом** работы является метод применения серого реляционного анализа в задаче многокритериальной маршрутизации трафика в сети ИВ высокой плотности. **Теоретическая/Практическая значимость.** Теоретическая значимость полученных результатов состоит в описании нового метода применения серого реляционного анализа в задаче маршрутизации и подтверждении результатами имитационного моделирования его эффективности. Практическая значимость состоит в том, что данный метод может быть использован в протоколах маршрутизации трафика в сетях ИВ высокой плотности.

Ключевые слова: сети интернета вещей высокой плотности, многокритериальная маршрутизация, серый реляционный анализ

Источник финансирования: Научное исследование в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-12-2023-1137.

Ссылка для цитирования: Марочкина А.В., Парамонов А.И. Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 75–85. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85

A Method for Routing Traffic in a Three-Dimensional High-Density IoT Network Using Gray Relational Analysis

 Anastasia Marochkina[✉], anastasiy1996@mail.ru

 Alexander Paramonov, alex-in-spb@yandex.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: *Statement of the problem:* the development of the infocommunication system is accompanied by the development of communication technologies and services. The general trends of this process are expressed in three main directions: the growth of throughput, reducing the delay in data delivery and mass communications. The latter is characterized by the development of the Internet of Things (IoT). IoT networks are built using various technologies. A large number of connected devices requires the use of new approaches to modeling and methods for building and managing such networks. To model networks with a high density of devices, it is often not enough to use flat models, but you have to resort to building models in three-dimensional space. For the functioning of networks with a large number of nodes, effective methods for choosing their structure are needed, such as choosing head nodes, clustering, and choosing traffic delivery routes. The task of routing is a classic task of building a logical structure of a communication network, however, in conditions of high density networks, it is necessary to use additional opportunities to increase the efficiency of its solution. Classical routing methods and algorithms operate, as a rule, with one selection criterion, which may not be an effective solution in such conditions. In high-density IoT wireless networks, more parameters must be taken into account, since the quality of the route in them depends on many factors. Thus, to improve the efficiency of IoT networks, it is important to develop a routing method according to a number of criteria. This problem is the subject of the present work. **The aim** of the work is to develop a method for multi-criteria traffic routing in a high-density IoT network. To achieve the goal, the paper proposes an approach to the use of Gray Relational Analysis, which makes it possible to effectively solve the problem of multi-criteria route optimization, including with a small amount of initial data. **The object** of the study is the Internet of Things network. The subject of the study is the multi-criteria routing method implemented using Gray Relational Analysis. The results of simulation modeling showed the effectiveness of the proposed method in comparison with the methods of single-criteria route selection. **The method** used is the method of Gray Relational Analysis, which allows solving problems of multicriteria optimization. **The novelty** of the work lies in the proposed method of applying Gray Relational Analysis to solve a multicriteria routing problem in a high-density IoT network. **The result** of the work is a method of applying Gray Relational Analysis in the problem of multi-criteria traffic routing in a high-density IoT network. **Theoretical/Practical significance.** The theoretical significance of the obtained results lies in the description of a new method of applying Gray Relational Analysis in the routing problem and confirmation of its effectiveness by simulation results. The practical significance lies in the fact that this method can be used in traffic routing protocols in high-density IoT networks.

Keywords: high-density IoT networks, multi-objective routing, Gray Relational Analysis

Funding: The studies at St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruevich were supported by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation by the grant 075-15-2022-1137

For citation: Marochkina A., Paramonov A. A Method for Routing Traffic in a Three-Dimensional High-Density IoT Network Using Gray Relational Analysis. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):75–85. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-75-85

Введение

Интернет вещей (ИВ) стал неотъемлемой частью сетей связи, а количество интернет-устройств превысило численность жителей Земли. Сети ИВ становятся сетями высокой плотности [1], в которых в

малом объеме сосредоточено большое количество интернет-устройств. Часто для таких сетей уже нельзя применять простые плоские модели, а следует прибегать к моделям в трехмерном пространстве [2].

При организации сетей ИВ высокой плотности с применением технологий и протоколов сетей ad hoc требуется решить задачу построения логической структуры сети, которая бы в наибольшей степени эффективно решала задачу доставки данных. Под эффективностью здесь следует понимать достижение поставленной цели минимальными средствами. Целью является повышение вероятности доставки в заданный срок.

Эту задачу следует решать, снижая вероятности потерь и задержек на участках маршрутов доставки данных. Структура сети высокой плотности может быть весьма разнообразна и определяется выбором головных узлов кластеров [3] и маршрутов доставки данных до них. При этом различные участки оказываются в неравных условиях: некоторые из них обслуживают большую долю трафика, некоторые имеют большую протяженность, количество транзитов и др.

Логическая структура сети определяется выбираемыми в ней маршрутами (в большинстве случаев на основании количества участков/транзитов/скачков) [4]. Также авторы предлагают использовать и иные критерии, позволяющие повысить стабильность или другие качества соединения.

Наиболее распространенными протоколами маршрутизации в сетях ad hoc являются протоколы OLSR [5] и AODV [6] – проактивный и интерактивный протоколы, соответственно. Оба эти протокола осуществляют поиск маршрутов по массовой рассылке служебных сообщений узлам-соседям. По результатам рассылки может быть найдено множество маршрутов, выбирается один, который используется для передачи данных. Критерием выбора является количество участков (транзитных узлов) в маршруте. Однако не всегда такое правило позволяет выбрать лучший (наиболее качественный) маршрут. В большинстве случаев качество маршрута определяется не единственным критерием.

В сетях с высокой плотностью устройств велика вероятность перегрузки узлов трафиком из-за высокой их концентрации в пространстве [7]. Во многих приложениях узлы сети оснащены автономными (не возобновляемыми) источниками энергии, которые имеют ограниченный ресурс. Узлы с малым запасом энергии нежелательно использовать в качестве транзитных, так как это может привести к сокращению времени их функционирования, что, в свою очередь, приведет к сокращению времени «жизни» маршрута.

Значительный уровень взаимных влияний в сети высокой плотности приводит к росту вероятности потерь пакетов в разной степени на различных участках сети.

От протяженности участка маршрута зависит уровень сигнала, следовательно, скорость передачи данных и задержка. Без учета этого фактора

маршрут с меньшим числом участков может оказаться хуже маршрута с большим числом участков.

В качестве особенности сетей с высокой плотностью узлов стоит отметить ее положительное качество, которое заключается в том, что в такой сети велика вероятность найти узел рядом с любой выбранной точкой. Эта вероятность существенно выше, чем в обычной сети. Такая особенность несколько расширяет возможности по формированию структуры сети.

Выбор маршрута с учетом различных влияющих факторов является достаточно сложной задачей, для решения которой требуется осуществить его многокритериальную оптимизацию [8–10]. Решение осложняется еще тем, что объем исходных данных для его принятия ограничен и не достаточен для применения методов статистического анализа.

Целью данной работы является разработка метода, применимого для выбора маршрута в беспроводной сети высокой плотности, построенного на основе нескольких критериев с целью повышения эффективности функционирования сети связи.

Модель сети и постановка задачи

Будем полагать, что сеть ad hoc состоит из n узлов, имеющих равные функциональные возможности. Модель сети задана неориентированным взвешенным графом $G(V, E)$, где множество вершин $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ассоциируется с узлами сети, а множество ребер $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – со связями между ними. Каждое из ребер характеризуется весом $W = \{w_1, \dots, w_m\}$. Будем полагать, что вес ребра задается вектором (набором из S) а сеть определена в трехмерном пространстве координатами узлов $V_C = \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}$.

Для иллюстрации фрагментов сети будем использовать проекцию узлов сети на горизонтальную плоскость. На рисунке 1а приведена модель трехмерной сети в пространстве, ограниченном кубом. Точки соответствуют узлам, в данном случае равномерно распределенным в трехмерном пространстве. На рисунке 1б приведена проекция фрагмента этой сети на горизонтальную плоскость, в которой изображен маршрут между двумя узлами этой сети.

Полагаем, что ребро графа существует между парой узлов, если они находятся в зоне связи друг друга, а зона связи представляет собой сферу радиуса R . Тогда условие существования ребра может быть записано в виде выражения:

$$d_{i,j} = \begin{cases} d(i,j) & d(i,j) \leq R \\ \infty & d(i,j) > R \end{cases}, \quad (1)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между узлами i и j .

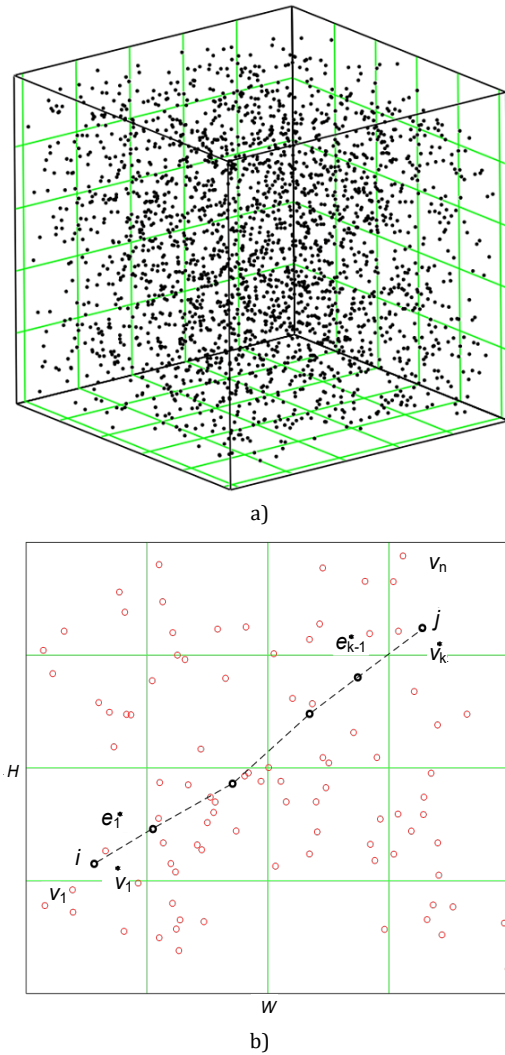


Рис. 1. Модель сети высокой плотности в трехмерном пространстве

Fig. 1. High Density Network Model in 3D Space

Требуется найти путь между вершинами i и j , $i, j = 1, \dots, n$, который характеризуется рядом показателей, определяющими его качество Q :

$$P_{i,j} = \{e_r, v_r^*, e_{r+1}, \dots, e_{k-1}, v_k^*\}, \\ e_r \in E, v_r^* \in V, r = 1, \dots, k.$$

Длина пути L определяется количеством входящих в него ребер или на единицу меньше количества входящих в него вершин $L = k - 1$.

Качество пути определяется как некоторая функция от весов ребер, входящих в него:

$$Q_{i,j}(W_{i,j}) = f(W_{i,j}),$$

где $W_{i,j} = \{w_1, \dots, w_{k-1}\}$.

Если вес задается вектором, состоящим из S показателей $w_r = (w_r^{(1)}, \dots, w_r^{(S)})$, $r = 1, \dots, k - 1$, тогда решение задачи выбора пути можно формально описать как решение задачи оптимизации целевой функции $Q(W_{i,j})$:

$$R_{i,j} = \arg \max_{R_{i,j} \in H} Q(W_{i,j}), \quad (2)$$

$$\phi_z(\cdot) = \text{true}, \quad z = 1, \dots, S,$$

где $H_{i,j} = \{h_1, \dots, h_N\}$ множество всех возможных путей между вершинами i и j ; $\phi_i(\cdot)$ ограничения для показателей качества $W_{i,j}$.

Задачу (2) можно решать, как задачу поиска кратчайшего пути на графе с использованием известных из теории алгоритмов [11, 12]. Однако для их использования необходим метод, позволяющий учесть множество критериев.

Метод многокритериального выбора пути

Решение задачи (2) заключается в выборе наилучшего, с позиции оценки его качества, пути. Для случая, когда качество пути определяется скалярными коэффициентами ребер, применимы классические методы теории графов, реализуемые алгоритмами поиска кратчайших путей [12]. В данном случае их нельзя применить напрямую, без приведения показателей качества ребер к скалярной форме. В общем случае задача (2) является многокритериальной.

Будем использовать пять показателей качества: количество участков, уровень сигнала (RSSI, от англ. Received Signal Strength Indicator), остаточный запас энергии, коэффициент потерь и задержку. Определим правила агрегирования показателей участков. Будем исходить из тех соображений, что качество маршрута во многом определяется «наихудшим» участком (в зарубежной литературе часто используют фразеологизм – бутылочное горлышко). «Наихудшим» участком обозначается пропускная способность (достижимая скорость передачи), следовательно, задержка также во многом определяется «наихудшим» звеном: надежность маршрута меньше, чем надежность самого ненадежного звена.

Исходя из сказанного выше, будем использовать в качестве значения для таких показателей как уровень сигнала, запас энергии, вероятность потерь пакета и длина очереди «наихудшие» показатели, имеющие место на участках маршрута. В таблице 1 приведены выбранные показатели и правила их вычисления.

ТАБЛИЦА 1. Правила вычисления показателей

TABLE 1. Rules for Calculating Indicators

Показатель	Значения на участках	Значение для маршрута
w_1 (количество участков)	1	k
w_2 (уровень сигнала)	$s_1, \dots, s_k$	$\min(s_1, \dots, s_k)$
w_3 (запас энергии)	$e_1, \dots, e_k$	$\min(e_1, \dots, e_k)$
w_4 (коэффициент потерь)	$p_1, \dots, p_k$	$\max(p_1, \dots, p_k)$
w_5 (размер очереди)	$L_1, \dots, L_k$	$\max(L_1, \dots, L_k)$

Применяемые на практике алгоритмы выбора маршрутов основаны на известных из теории графов алгоритмах выбора кратчайших путей, которые выстроены на одном критерии – условной длине маршрута (стоимости или весе). Для того, чтобы перейти к нескольким критериям необходимо реализовать метод преобразования вектора показателей к единичному коэффициенту, который позволит сделать выбор в пользу того или иного маршрута.

Следует отметить, что существенным моментом приведения коэффициентов к скалярной форме является то, что они являются случайными числами, т. е. оценками, полученными по конечным выборкам. Размер этих выборок может быть недостаточно велик, чтобы получить надежные статистические оценки, а также различными являются размерность и диапазон принимаемых значений. Для этой цели применим серый реляционный анализ (GRA, *аббр. от англ.* Gray Relational Analysis) [13–16], разработанный Дэнг Джулуном из Хуачжунского университета науки и технологий в Китайской Народной Республике. Название «Серый» происходит из теории «серых» систем, т. е. систем с неполной информацией. Данный метод можно сравнить с методом нечетких множеств в задачах управления, которые также позволяют принимать решения при малом объеме исходных данных.

Модель GRA удобна, когда по некоторым причинам применение статистических методов затруднено. Кроме того, вычислительная сложность метода невелика, он может быть реализован практически на любых вычислительных средствах. Идея GRA заключается в использовании степени подобия последовательностей данных для определения степени их сходства. Модель GRA также является популярным методом оптимизации по многим критериям. Перечисленные качества дают основания предположить возможность применения GRA для решения задачи маршрутизации.

GRA включает в себя следующие основные этапы: нормирование исходных данных, вычисление последовательности отклонений, серых реляционных коэффициентов, серых реляционных оценок (GRG, *аббр. от англ.* Gray Relational Grade), на основании которых может быть произведен выбор. Как вспомогательный этап, можно произвести ранжирование полученных оценок.

Этап нормирования параметра w заключается в следующем. Если увеличение значения параметра w приводит к повышению качества Q (например, для RSSI *аббр. от англ.* Receiving Signal Strength Indicator или SNR *аббр. от англ.* Signal to Noise Ratio), или его уменьшение – к повышению качества Q , то нормализованное значение параметра определяется как:

$$\bar{w}_{i,j} = \begin{cases} \frac{w_{i,j} - \min_j(w_i)}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & |\uparrow w \rightarrow Q \uparrow \\ \frac{\max_j(w_i) - w_{i,j}}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & |\downarrow w \rightarrow Q \uparrow \end{cases}, \quad (3)$$

где $w_{\max}$ и $w_{\min}$ – максимально и минимально возможные значения параметра w , соответственно.

Последовательность отклонений для нормализованных данных:

$$\delta_{i,j} = \max_i \bar{w}_{i,j} - \bar{w}_{i,j}. \quad (4)$$

Серые реляционные коэффициенты $\gamma_{i,j}$ оцениваются как:

$$\gamma_{i,j} = \frac{\max_i \delta_{i,j} + \zeta \min_i \delta_{i,j}}{w_{i,j} + \zeta \max_i \delta_{i,j}}, \quad (5)$$

где ζ – коэффициент различия или идентификации; $\zeta \in [0, 1]$, в большинстве случаев используется значение 0,5 [13].

На основе (5) вычисляются серые реляционные оценки:

$$G_i = \sum_{j=1}^s \eta_j \gamma_{i,j}, \quad (6)$$

где $\eta_j \in [0, 1]$ – весовые коэффициенты значимости соответствующих параметров, характеризующих качество маршрута, $\sum_{j=1}^s \eta_j = 1$. Значения этих коэффициентов могут быть получены методами экспертных оценок или иными методами. В рассмотренных примерах они были выбраны равнозначными $\eta_j = \frac{1}{s}$, $j = 1, \dots, S$.

Большинство известных алгоритмов поиска кратчайшего пути/путей (алгоритмы Дейкстры, Беллмана – Форда, Флойда – Уоршелла и др.) циклически выполняют трехместную операцию [12], которая в общем виде может быть записана как:

$$d_{i,j} = \text{opt}\{d_{i,j}, d_{i,k} \otimes d_{k,j}\}, \quad (7)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между вершинами i и j ; opt – операция взятия минимума или максимума, а символ $\otimes$ обозначает операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер.

С учетом описанного выше метода GRA трехместная операция будет иметь следующий вид:

$$w_{i,j} = \text{GRA}\{w_{i,j}, w_{i,k} \otimes w_{k,j}\}, \quad (8)$$

где $w_{i,j}$ – элемент матрицы показателей; GRA – операция выбора с использованием метода серого реляционного анализа; символ $\otimes$ – операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер, согласно таблице 1.

Данная модификация алгоритма не изменяет его сложности, в смысле количества выполняемых при поиске пути операций.

Пример решения

Ниже приведен пример выбора варианта маршрута на основе данных о количестве транзитов, уровне сигнала, остаточной энергии, коэффициенте потерь пакетов и задержке. Для агрегирования показателей используются правила из таблицы 1. Для уровня сигнала выбирается наименьшее значение из тех, которые имеют место на

участках маршрута. Аналогично в качестве показателя остаточной энергии используется наименьший уровень из тех, которые имеются в узлах маршрута. В качестве показателя задержки может принято среднее значение длины очереди в узлах маршрута или значение задержки, если его возможно измерить. Исходные данные приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Исходные данные

TABLE 2. Initial Data

№ п/п	Количество транзитов	RSSI, дБм	Запас энергии, %	Коэффициент потерь	Длина очереди
1	10	-58	100	0,009	9
2	10	-13	11	0,192	0
3	1	-32	29	0,009	5
4	8	-74	100	0,134	8
5	9	-38	82	0,481	15
6	1	-26	42	0,259	14
7	4	-64	77	0,344	8
8	9	-49	55	0,459	14
9	3	-57	26	0,334	9
10	1	-13	58	0,232	6
11	7	-54	87	0,265	17
12	8	-22	8	0,198	20
13	10	-35	12	0,275	10
14	10	-59	64	0,107	15
15	4	-52	16	0,014	1

В таблице 3 приведены нормализованные данные, полученные с использованием выражения (3), а также (через дробь) отклонения, вычисленные с помощью (4). Данные в этой таблице характеризуют разброс полученных параметров, которые могут быть сравнимы из-за того, что построены по нормализованным данным. Наименования полей отличаются от предшествующей таблицы, так как они уже не имеют того натурального выражения, а лишь характеризуют соответствующую величину.

В таблице 4 приведены значения серых реляционных коэффициентов, вычисленных, согласно (5), и серых реляционных оценок (колонка серого цвета), вычисленных, согласно (6), а также приведены значения ранга оценки (колонка голубого цвета).

Серые реляционные коэффициенты необходимы для сравнения полученных результатов.

Количество оценок равно количеству сравниваемых наборов данных. Величина оценки характеризует, насколько данный набор близок к желаемому результату. Для выбора лучшего варианта следует выбрать набор данных, соответствующий наибольшему значению оценки.

Значения ранга оценки показывают порядковый номер соответствующего набора данных, если эти наборы отсортировать от наиболее предпочтительных к наименее. Данные результаты могут быть полезны при использовании многопутевой маршрутизации, так как позволяют охарактеризовать группу известных маршрутов степенью их предпочтительности. Из таблицы 4 видно, что наилучшим является вариант 3, с серой оценкой 0,739.

На рисунках 2а и 2б приведены иллюстрации примеров построения маршрута в сети при различных условиях моделирования с использованием маршрутизации по количеству транзитов (рисунок 2а) и с использованием предложенного метода (рисунки 2б–2д). Результат выбора маршрута, приведенный на рисунке 2б, получен при увеличении количества узлов с малым запасом энергии. При построении маршрута предпочтение было отдано узлам с относительно высоким запасом энергии, при этом длина маршрута существенно выросла с 5 до 18 участков. Результат, приведенный на рисунке 2с, получен при увеличении обслуживаемого узлами трафика (средней длины очереди) в условиях малого запаса энергии. Длина маршрута также возросла до 20 участков.

ТАБЛИЦА 3. Нормализованные данные и последовательность отклонений

TABLE 3. Normalized Data and Sequence of Deviations

№ п/п	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка
1	0,000/1,000	0,262/0,738	1,000/1,000	1,000/0,000	0,550/0,450
2	0,000/1,000	1,000/0,000	0,110/0,890	0,612/0,388	1,000/0,000
3	1,000/0,000	0,689/0,311	0,290/0,710	0,999/0,001	0,750/0,250
4	0,222/0,778	0,000/1,000	1,000/0,000	0,734/0,266	0,600/0,400
5	0,111/0,889	0,590/0,410	0,820/0,180	0,000/1,000	0,250/0,750
6	1,000/0,000	0,787/0,213	0,420/0,580	0,469/0,531	0,300/0,700
7	0,667/0,333	0,164/0,836	0,770/0,230	0,289/0,711	0,600/0,400
8	0,111/0,889	0,410/0,590	0,550/0,450	0,047/0,953	0,300/0,700
9	0,778/0,222	0,279/0,721	0,260/0,740	0,310/0,690	0,550/0,450
10	1,000/0,000	1,000/0,000	0,580/0,420	0,527/0,473	0,700/0,300
11	0,333/0,667	0,328/0,672	0,870/0,130	0,456/0,544	0,150/0,850
12	0,222/0,778	0,852/0,148	0,080/0,920	0,600/0,400	0,000/1,000
13	0,000/1,000	0,639/0,361	0,120/0,880	0,436/0,564	0,500/0,500
14	0,000/1,000	0,246/0,754	0,640/0,360	0,791/0,209	0,250/0,750
15	0,667/0,333	0,361/0,639	0,160/0,840	0,989/0,011	0,950/0,050

ТАБЛИЦА 4. Серые реляционные коэффициенты и оценки

TABLE 4. Gray Relational Coefficients and Scores

№ п/п	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка	GRG	Ранг
1	0,333	0,404	0,333	1,000	0,526	0,519	8
2	0,333	1,000	0,360	0,563	1,000	0,651	4
3	1,000	0,616	0,413	0,999	0,667	0,739	1
4	0,391	0,333	1,000	0,653	0,556	0,587	6
5	0,360	0,550	0,735	0,333	0,400	0,476	13
6	1,000	0,701	0,463	0,485	0,417	0,613	5
7	0,600	0,374	0,685	0,413	0,556	0,526	7
8	0,360	0,459	0,526	0,344	0,417	0,421	15
9	0,692	0,409	0,403	0,420	0,526	0,490	10
10	1,000	1,000	0,543	0,514	0,625	0,737	2
11	0,429	0,427	0,794	0,479	0,370	0,500	9
12	0,391	0,772	0,352	0,555	0,333	0,481	12
13	0,333	0,581	0,362	0,470	0,500	0,449	14
14	0,333	0,399	0,581	0,705	0,400	0,484	11
15	0,600	0,439	0,373	0,979	0,909	0,660	3

Полученные результаты ожидаемы и демонстрируют способность предложенного метода выбирать альтернативное решение, в данном случае, ценой увеличения длины маршрута.

Результат, приведенный на рисунке 2d, получен при увеличении потерь на участках маршрута в условиях предыдущего эксперимента, т. е. в еще более худших условиях. Как можно заметить, маршрут близок к исходному (полученному только с учетом критерия длины), его длина снизилась до 10 участков. Такой результат можно объяснить тем, что условия оказались настолько плохи, что иных вариантов «улучшения» маршрута за счет увеличения его длины нет.

Эффективность метода

Для оценки эффективности предложенного метода необходимо определить само понятие эффективности и определить ряд условий, согласно которым будет возможно выбрать способ оценки. Следует отметить, что рассматриваемый метод является приближенным решением задачи оптимизации. Для сравнения получаемых результатов с оптимальными значениями пришлось бы выполнить полный перебор всех вариантов, что является слишком сложной задачей, поэтому целесообразно сравнить его с известным методом.

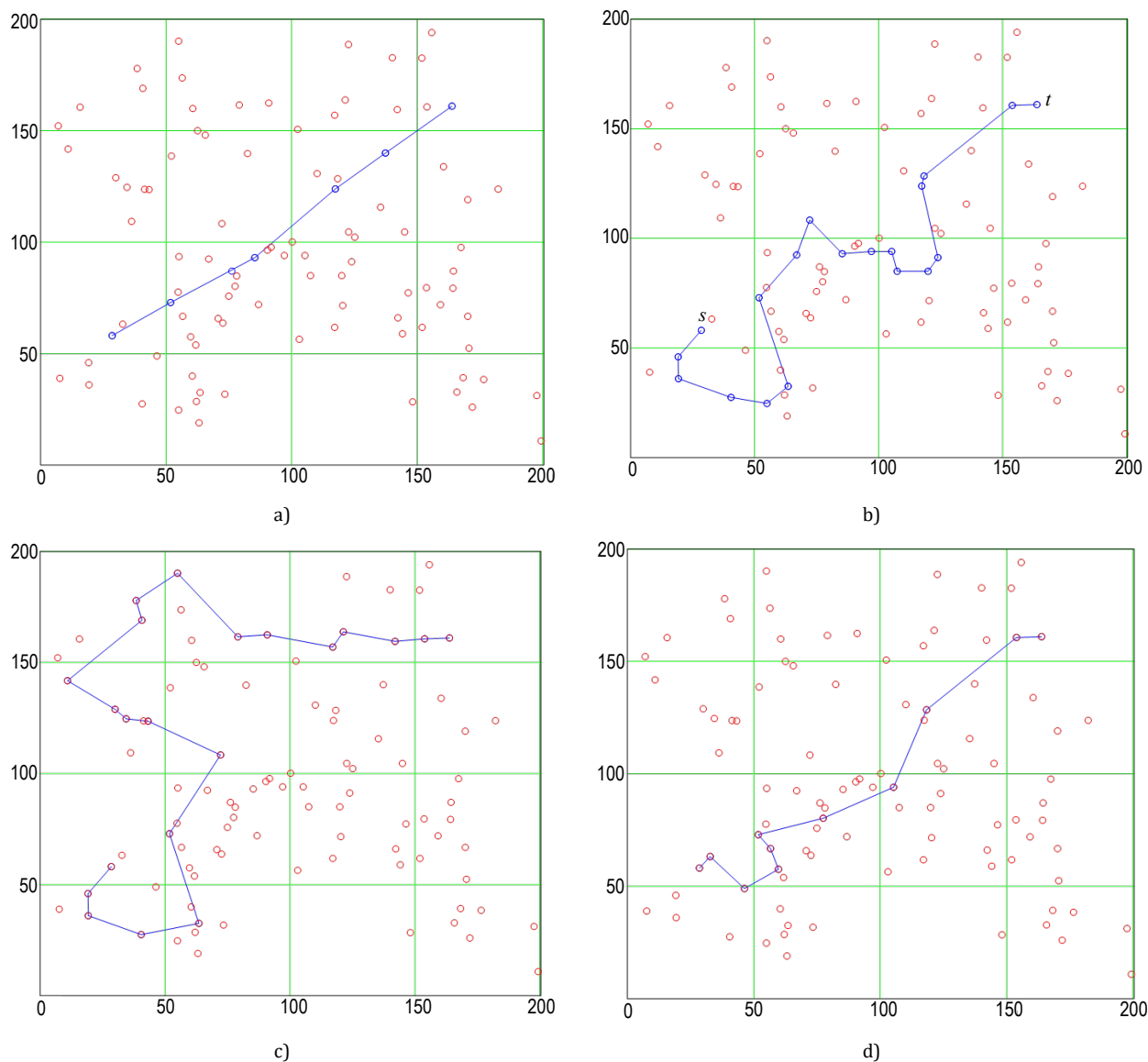


Рис. 2. Пример выбора маршрута по количеству транзитов (а) и с использованием GRA (b, c, d)

Fig. 2. An Example of Route Selection by the Number of Transits (a) and Using GRA (b, c, d).

Под эффективностью метода будем понимать его достоинства по отношению к однокритериальным методам маршрутизации, использующим в качестве критерия количество транзитных участков в маршруте. Под достоинствами метода будем понимать выигрыш в показателях качества, а именно: в коэффициенте потерь, величине задержки, потенциальной устойчивости маршрута. Потенциальную устойчивость будем характеризовать минимальным запасом энергии в узлах маршрута. Значения указанных показателей случайны, поэтому для их оценки необходимо провести серию имитационных экспериментов и сравнить полученные результаты.

Для оценки эффективности метода введем показатель, включающий в себя используемые для выбора параметры качества маршрута:

$$q = \eta_1 \tilde{k} + \eta_2 \tilde{r} + \eta_3 \tilde{e} + \eta_4 \tilde{p} + \eta_5 \tilde{t}, \quad (9)$$

где $\eta_1, \dots, \eta_5 \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^5 \eta_i = 1$, в данном случае все коэффициенты равны 0,2; $\tilde{k}, \tilde{r}, \tilde{e}, \tilde{p}, \tilde{t}$ – нормированные, согласно (3), показатели качества маршрута, полученные в ходе моделирования: количество участков, минимальный уровень сигнала, минимальный запас энергии, коэффициент потерь пакетов и задержка, соответственно.

Значение для однокритериального метода обозначим как q_0 , а для предложенного метода – q^* . В качестве однокритериального метода рассматривается выбор маршрута протоколом AODV. В данном случае величина (9) отражает, насколько выбранный маршрут отвечает желаемым характеристикам при допущении, что они имеют равное значение.

Из полученных результатов, приведенных на рисунке 3, видно, что при использовании в качестве критерия минимума участков распределение q имеет дисперсию и меньшее среднее значение $\bar{q}_0 \approx 0,45$, $\sigma_0 \approx 0,2$. Распределение q при использовании предложенного метода имеет среднее значение $\bar{q}_* \approx 0,69$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_* \approx 0,36$. Применение t -критерия Стьюдена [17] подтверждает гипотезу о том, что средние значения статистически различны с доверительной вероятностью 0,95. Полученные распределения аппроксимированы Нормальным распределением и Бета-распределением с соответствующими параметрами (синяя и красная сплошные линии).

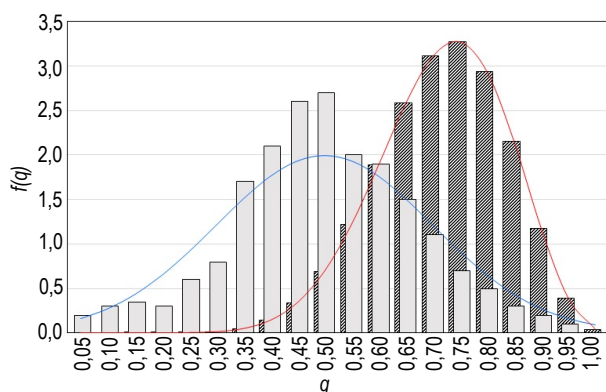


Рис. 3. Распределение показателя качества маршрута при использовании выбора по минимальному количеству участков (синяя кривая) и GRA (красная кривая)

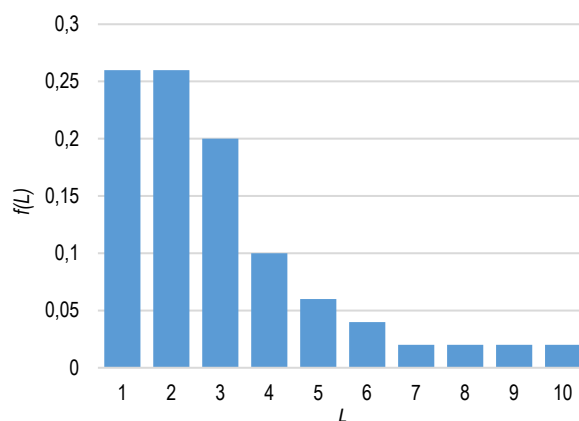
Fig. 3. Distribution of the Route Quality Index When Using Selection by the Minimum Number of Sites (Blue Curve) and When Using GRA (Red Curve)

Оценим эффективность как разницу между средними значениями показателя q :

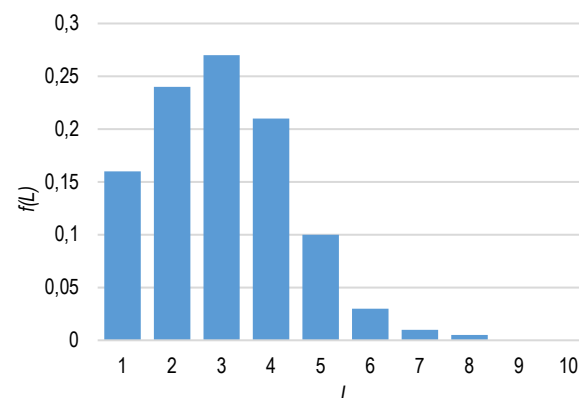
$$e = 100 \frac{\bar{q}_* - \bar{q}_0}{\bar{q}_0} \% \quad (10)$$

По результатам проведенных экспериментов значение составляет $e = 53,3 \%$. Такой результат можно интерпретировать следующим образом: более чем в половине случаев предложенный метод дает более приемлемое решение в части выбора маршрута, чем метод, основанный на выборе самого короткого маршрута.

На рисунке 4 приведено распределение длины пути, полученное по результатам экспериментов. Средняя длина пути L при выборе по количеству транзитов (см. рисунок 4а) равна 2,96, при выборе предложенным методом 3,00 (см. рисунок 4б). Предложенный метод несколько повышает среднее количество транзитов (в данном случае на 1,4 %). Также отличается распределение длины пути, которое имеет более длинный хвост. Максимальная длина пути в первом случае составил 8 участков, а во втором – 10 участков. Максимальная длина пути в данном случае увеличилась на 25 %.



a)



b)

Рис. 4. Распределение длин путей

Fig. 4. Distribution of Path Lengths

Применение нескольких критериев увеличивает объем служебных данных, необходимых для выбора маршрута. Это увеличение зависит от количества используемых критериев. Также следует отметить, что фактического роста объема служебного трафика можно избежать за счет того, что при многокритериальном выборе достигается уменьшение интенсивности перестроения структуры сети, благодаря выбору более стабильных маршрутов. Основное достоинство данного метода, по сравнению с многокритериальным методом [9, 10] состоит в том, что он требует меньшего объема исходных данных и имеет меньшую вычислительную сложность, выигрыш в части качества решения составляет (1–1,5 %).

Следует заметить, что эффективность метода зависит от степени влияния тех факторов, которые учитываются при выборе маршрута и их реальных значений. Например, если все узлы сети имеют равный запас энергии, то эффективность метода, согласно определению (9), меньше.

Выводы

Приведенный выше анализ позволяет сделать вывод, что предложенный метод выбора маршрута

с учетом нескольких параметров качества повышает эффективность функционирования сети и имеет преимущества, по сравнению с методами выбора маршрута по критерию минимума количества участков.

Предложенный метод дает возможность учесть существенные для конкретного случая параметры качества, набор которых может быть расширен по сравнению с использованным в данной работе. Следует отметить, что расширение набора параметров качества также потребует расширение набора правил их вычисления для маршрута.

Эффективность предложенного метода тем выше, чем шире набор значений используемых параметров в конкретной сети (расширяется выбор).

При близости значений параметров для всех участков сети эффективность метода падает из-за снижения возможности выбора. Следует отметить, что она не ниже эффективности метода выбора по одному критерию.

По результатам имитационных экспериментов эффективность метода составила 53 % по отношению к однокритериальному методу.

Недостатками предложенного метода являются необходимость получения исходных данных о показателях качества и выполнения дополнительных вычислений.

Предложенный метод маршрутизации может быть применен при реализации протоколов одно- или многопутевой маршрутизации.

Список источников

1. Кучерявый А.Е. Интернет вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
2. Кучерявый А.Е., Пармонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А. и др. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12. DOI:10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12
3. Марочкина А.В. Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности // Электросвязь. 2023. № 6. С. 60–66. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.008
4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2016. 992 с.
5. RFC 3626. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Network Working Group. October, 2003.
6. RFC 3561. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Network Working Group. July, 2003.
7. Бушеленков С.Н., Пармонов А.И. Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23–28. DOI:10.34832/ELSV.2021.20.7.002
8. Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks // Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference on Technology for the 21st Century (IEEE INMIC 2001, Lahore, Pakistan, 30 December 2001). IEEE Press, 2001. PP. 62–68. DOI:10.1109/INMIC.2001.995315
9. Zhiwei Y., Michael E., Thomas B., Joost K. Multicriteria Inventory Routing by Cooperative Swarms and Evolutionary Algorithms // Proceedings of the International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation (IWINAC 2015, Elche, Spain, 1–5 June 2015). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 9108. Cham: Springer, 2015. PP. 127–137. DOI:10.1007/978-3-319-18833-1_14
10. Tilwari V., Maheswar R., Jayarajan P., Sundararajan T.V.P., Hindia M.H.D.N., Dimyati K., et al. MCLMR: A Multicriteria Based Multipath Routing in the Mobile Ad Hoc Networks // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 112. Iss. 1. PP. 2461–2483. DOI:10.1007/s11277-020-07159-8
11. Берж К. Теория графов и ее приложения. М.: ИЛ, 1962. 320 с.
12. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
13. Liu S., Yang Y., Forrest J.Y.-L. Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications. Singapore: Springer, 2022. DOI:10.1007/978-981-19-6160-1
14. Patil A.N., Walke G., Mahesh G. Grey Relation Analysis Methodology and its Application // Research Review. 2019. Vol. 4. Iss. 2. PP. 409–411. DOI:10.5281/zenodo.2578088
15. Yang W., Wu Y. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Article ID 8761681. DOI:10.1155/2019/8761681
16. Hsiao S.-W., Lin H.-H., Ko Y.-C. Application of Grey Relational Analysis to Decision-Making during Product Development // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. 2017. Vol. 13. Iss. 6. PP. 2581–2600. DOI:10.12973/eurasia.2017.01242a
17. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Издательство Юрайт, 2023. 538 с.

References

1. Koucheryavy A.E. Internet of Things. *Electrosvyaz*. 2013;1:21–24.
2. Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkin A., Muthanna A.S.A., Vybornova A., Dunaytsev R., et al. 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks. *Telecom IT*. 2022;10(3):1–12. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12
3. Marochkina A.V. Modeling and Clustering a 3D Internet of Things Network Using the Fractal Dimension Estimation Method. *Electrosvyaz*. 2023;6:60–66. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.008
4. Olifer V.G., Olifer N.A. *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols*. St. Petersburg: Peter Publ.; 2016. 992 p.
5. RFC 3626. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. Network Working Group. October, 2003.
6. RFC 3561. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Network Working Group. July, 2003.

7. Bushelenkov S.N., Paramonov A.I. Analysis and Formation of the Structure of the Internet of Things Network Based on Lattice Models. *Electrosvyaz*. 2021;7:23–28. DOI:10.34832/ELSV.2021.20.7.002
8. Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. *Proceedings. IEEE International Multi Topic Conference on Technology for the 21st Century, IEEE INMIC 2001, 30 December 2001, Lahore, Pakistan*. IEEE Press; 2001. p.62–68. DOI:10.1109/INMIC.2001.995315
9. Zhiwei Y., Michael E., Thomas B., Joost K. Multicriteria Inventory Routing by Cooperative Swarms and Evolutionary Algorithms. *Proceedings of the International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, IWINAC 2015, 1–5 June 2015, Elche, Spain. Lecture Notes in Computer Science, vol.9108*. Cham: Springer; 2015. p.127–137. DOI:10.1007/978-3-319-18833-1_14
10. Tilwari V., Maheswar R., Jayarajan P., Sundararajan T.V.P., Hindia MHD N., Dimyati K., et al. MCLMR: A Multicriteria Based Multipath Routing in the Mobile Ad Hoc Networks. *Wireless Personal Communications*. 2020;112(1):2461–2483. DOI:10.1007/s11277-020-07159-8
11. Berge K. *Graph theory and its applications*. Paris: Dunod; 1958.
12. Christofides N. *Graph theory*. New York; 1975.
13. Liu S., Yang Y., Forrest J.Y.-L. *Grey Systems Analysis: Methods, Models and Applications*. Singapore: Springer; 2022. DOI:10.1007/978-981-19-6160-1
14. Patil A.N., Walke G., Mahesh G. Grey Relation Analysis Methodology and its Application. *Research Review*. 2019;4(2): 409–411. DOI:10.5281/zenodo.2578088
15. Yang W., Wu Y. A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019;2019:8761681. DOI:10.1155/2019/8761681
16. Hsiao S.-W., Lin H.-H., Ko Y.-C. Application of Grey Relational Analysis to Decision-Making during Product Development. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2017;13(6):2581–2600. DOI:10.12973/eurasia.2017.01242a
17. Kremer N.Sh. *Theory of Probabilities and Mathematical Statistics*. Moscow: Yurait Publ.; 2023. 538 p.

Статья поступила в редакцию 09.08.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 26.08.2023.

The article was submitted 09.08.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 26.08.2023.

Информация об авторах:

МАРОЧКИНА
Анастасия Вячеславовна

ассистент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0001-6446-2237>

ПАРАМОНОВ
Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-4104-3504>

Научная статья

УДК 004.457

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-86-96



Метод повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети с учетом использования средств определения геолокации нарушителя

- ✉ Валерий Алексеевич Липатников, lipatnikovanl@mail.ru
Вадим Александрович Задбоев, zadboev89@mail.ru
Кирилл Витальевич Мелехов, kirill_melehov@bk.ru
Александр Александрович Шевченко, alex_pavel1991@mail.ru

Военная академия связи им. С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация: Известные методы обеспечения информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей с применением анализа их внутреннего трафика в современных условиях недостаточно эффективны, так как используют не все средства обнаружения внешних угроз. В данной статье авторами затрагивается вопрос возможности применения процедуры определения IP-геолокации в рамках обеспечения информационной безопасности сети. **Цель:** обеспечение уровня защищенности информационно-телекоммуникационной сети выше требуемого значения путем эффективности обнаружения внешних нарушителей за счет использования средств определения геолокации нарушителя в процессе обеспечения информационной безопасности. **Результат:** предложен метод повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети за счет внедрения программного обеспечения для определения геолокации нарушителя после обнаружения вторжений.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационно-телекоммуникационная сеть, IP-геолокация, внешние угрозы, сканирование сети.

Ссылка для цитирования: Липатников В.А., Задбоев В.А., Мелехов К.В., Шевченко А.А. Метод повышения защищенности информационно-телекоммуникационной сети с учетом использования средств определения геолокации нарушителя // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 86–96. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-86-96

A Method of Improving the Security of Information and Telecommunications Network Using the Means of Determining Intruder's Geolocation

- ✉ Valery Lipatnikov, lipatnikovanl@mail.ru
Vadim Zadboev, zadboev89@mail.ru
Kirill Melekhov, kirill_melehov@bk.ru
Aleksandr Shevchenko, alex_pavel1991@mail.ru

Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Abstract: Known methods of ensuring information security of information and telecommunication networks with the use in modern conditions are not effective enough, since not all means of detecting external threats are used. In this article, the authors raise the issue of the possibility of using the procedure for determining IP geolocation in the

framework of ensuring the information security of the network. Purpose: to ensure the level of security of the information and telecommunications network above the required value by effectively detecting external intruders through the use of tools for determining the geolocation of the intruder in the process of ensuring information security. Result: a method is proposed for improving the security of an information and telecommunication network, taking into account the introduction of software for determining the geolocation of an intruder after intrusion detection.

Keywords: *information security, information and telecommunications network, IP geolocation, external threats, network scanning.*

For citation: Lipatnikov V., Zadboev V., Melekhov K., Shevchenko A. A method of Improving the Security of Information and Telecommunications Network Using the Means of Determining Intruder's Geolocation. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):86–96. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-86-96

Введение

В наше время, когда сеть Интернет стала неотъемлемой частью жизни большинства людей и бизнес-процессов, вопрос безопасности критической информации, находящейся во внутренней сети, становится все более актуальным. Одним из процессов, позволяющим обеспечить защищенность информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС), является определение геолокации по заданному IP-адресу, который может быть полезным инструментом для расследования инцидентов информационной безопасности (ИБ), выявления нарушителей и предотвращения различных видов мошенничества, хакерских атак, кибершпионажа и других преступлений в сети.

Анализ результатов исследований в области обеспечения информационной безопасности (ИБ) ИТКС показал недостаточную проработку вопросов по определению геолокации нарушителя для повышения защищенности сетей. Так в [1] рассмотрены основные категории IP-адресов и угрозы использования действительных IP-адресов в сети Интернет. Также представлен фрагмент работы программы, позволяющей по IP-адресу пользователя определять его местоположение и некоторые персональные данные.

В статье [2] предложен метод повышения точности определения IP-геолокации, заключающийся в использовании метода простого большинства и вычисления координат с учетом уровня доверия к IP-геосервисам. Авторы предлагают устанавливать уровень доверия за счет сравнительного анализа IP-геосервисов по точности. Отмечая их значительный вклад в обоснование необходимости определения IP-геолокации нарушителя и развитие методов повышения его точности, следует отметить, что авторы не предлагают конкретных решений по внедрению процесса определения геолокации нарушителя в процесс обеспечения защищенности ИТКС и способов отслеживания нарушителей, находящихся вне сети.

В связи с этим **целью исследования** является обеспечение уровня защищенности ИТКС выше требуемого значения за счет разработки метода

его повышения с использованием средств определения геолокации нарушителя.

1. Алгоритм сканирования ИТКС для выявления подозрительных действий внутри сети и алгоритм определения геолокации нарушителя

Основой метода являются алгоритм сканирования ИТКС для выявления подозрительных действий внутри сети (рисунок 1) и алгоритм определения геолокации нарушителя (рисунок 2).

Алгоритм сканирования ИТКС поясняется следующим образом:

- 1) постоянно сканируется сетевой трафик внутренней сети на предмет подозрительных действий пользователя;
- 2) поочередно выбирается каждый адрес для проверки на наличие в списке доверенных IP-адресов;
- 3) в случае обнаружения несоответствия со списком доверенных IP-адресов, при несоответствии данному адресу, блокируется доступ к ИТКС, регистрируется инцидент и определяется географическое местоположение данного IP-адреса;
- 4) по окончании данных мероприятий выводится сформированный отчет о проделанной работе и полученных данных;
- 5) при условии, что полученный IP-адрес находится в списке доверенных, ему предоставляется доступ к ИТКС, однако продолжается постоянное наблюдение за ним на выявление подозрительных действий;
- 6) при обнаружении таких действий для него также доступ блокируется, регистрируется инцидент и определяется географическое местоположение по данному IP-адресу. По окончании данных мероприятий выводится сформированный отчет о проделанной работе и полученных данных [3, 4].

Система определения геолокации осуществляет выявление местоположения по известному IP-адресу нарушителя. Процесс работы программы происходит следующим образом [5, 6]: IP-адрес для повторной отправки запроса, полученные данные записываются во внутреннюю базу данных (БД) и обрабатываются.

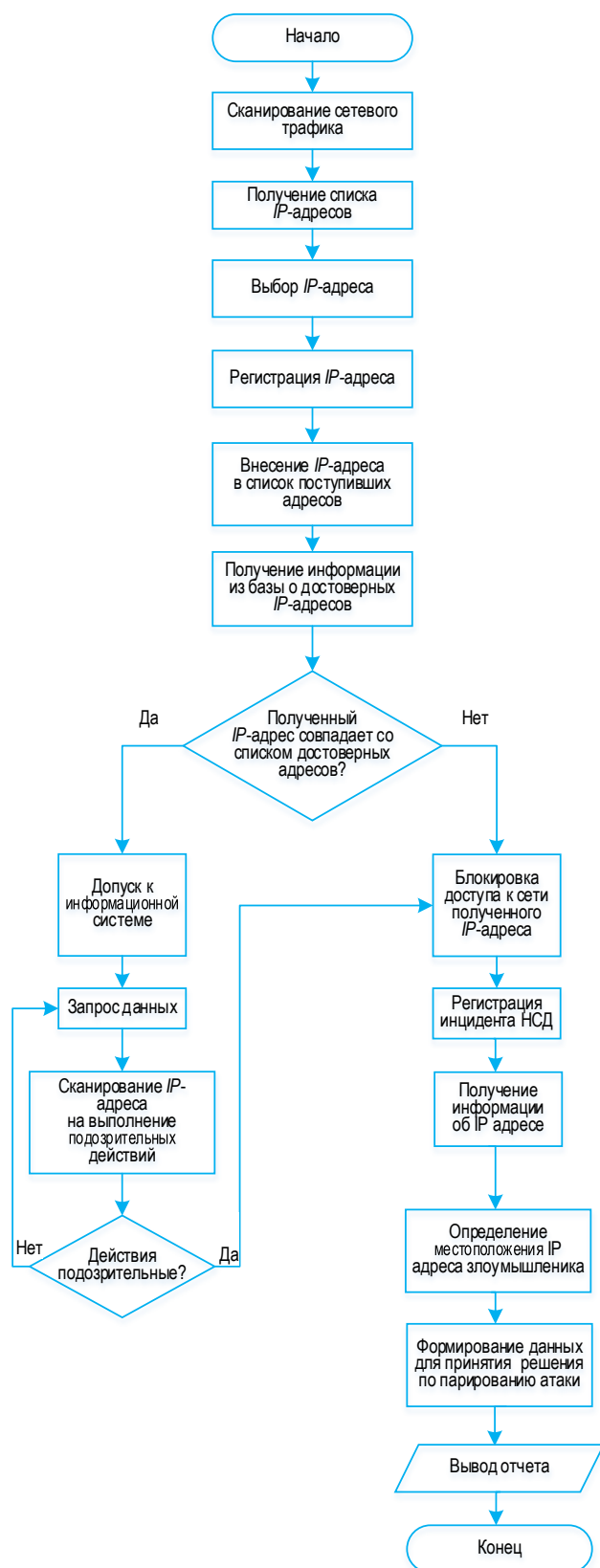


Рис. 1. Алгоритм сканирования ИТКС для выявления подозрительных действий внутри сети

Fig. 1. Enterprise ITCS Algorithm for Suspicious Activities within the Network

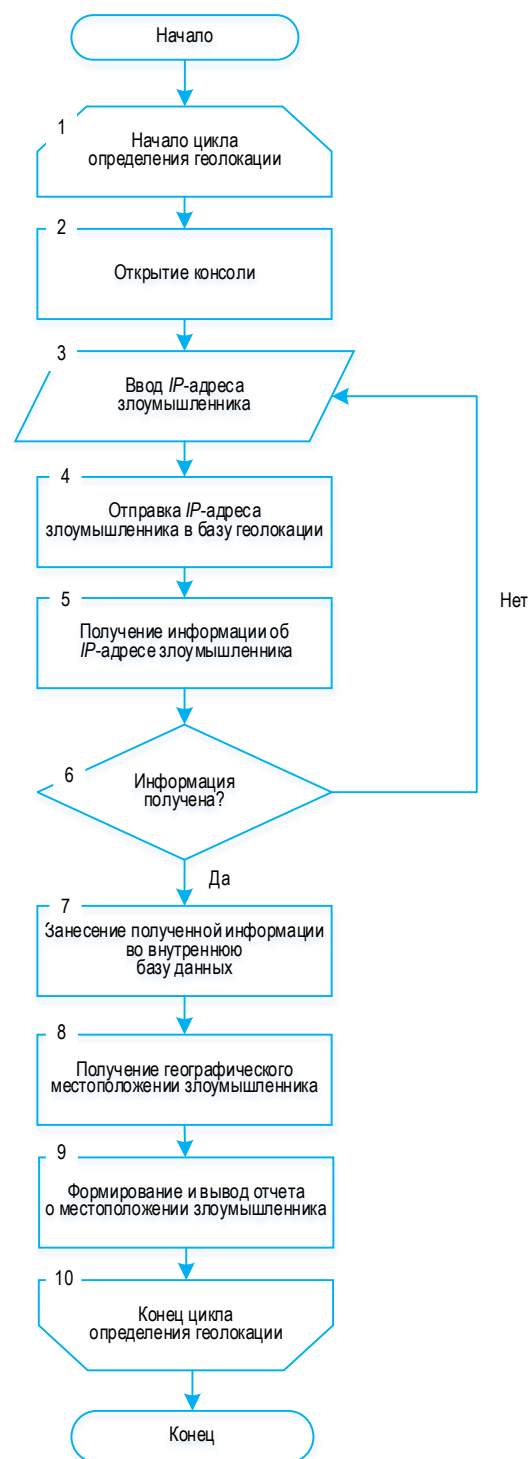


Рис. 2. Алгоритм определения геолокации нарушителя

Fig. 2. Algorithm for Determining the Geolocation of the Intruder

Первоначально открывается консоль программы и в активном окне вводится IP-адрес нарушителя, полученный адрес отправляется в базу IP-геолокации, из которой получают информацию об IP-адресе нарушителя, а в случае, если данные не были получены, программа снова потребует ввести.

По итогу из обработанных данных получают данные о географическом местоположении, а именно: наименование страны, региона, города, координаты, временная зона, наименование провайдера и почтовый код-нарушителя, которому принадлежит адрес. По этим данным формируется и выводится отчет о результатах работы программы [7, 8]

2. Моделирование процесса определения геолокации нарушителя

С целью формирования требований к процессу определения геолокации нарушителя, как к подпроцессу процесса обеспечения ИБ ИТКС было проведено моделирование данного процесса.

В процессе моделирования введен показатель – вероятность успешного определения геолокации нарушителя (P_M) и параметры: λ_0 – интенсивность поступления задач на определение геолокации нарушителя: $\lambda_0 = \frac{1}{\bar{t}_0}$, где $\bar{t}_0$ – среднее время поступления задач на определение геолокации нарушителя; λ_{OK} – интенсивность открытия консоли программы: $\lambda_{OK} = \frac{1}{\bar{t}_{OK}}$, где $\bar{t}_{OK}$ – среднее время открытия консоли программы; λ_{BA} – интенсивность ввода IP-адреса: $\lambda_{BA} = \frac{1}{\bar{t}_{BA}}$, где $\bar{t}_{BA}$ – среднее время ввода IP-адреса; λ_{OA} – интенсивность отправки IP-адреса: $\lambda_{OA} = \frac{1}{\bar{t}_{OA}}$, где $\bar{t}_{OA}$ – среднее время отправки IP-адреса; $\lambda_{ПИ}$ – интенсивность получения информации: $\lambda_{ПИ} = \frac{1}{\bar{t}_{ПИ}}$, где $\bar{t}_{ПИ}$ – среднее время получения информации; $\lambda_{ЗПИ}$ – интенсивность занесения полученной информации во временную БД: $\lambda_{ЗПИ} = \frac{1}{\bar{t}_{ЗПИ}}$, где $\bar{t}_{ЗПИ}$ – среднее время занесения полученной информации во временную БД; $\lambda_{ПГМ}$ – интенсивность получения геолокации: $\lambda_{ПГМ} = \frac{1}{\bar{t}_{ПГМ}}$, где $\bar{t}_{ПГМ}$ – среднее время получения геолокации; λ_{42} – интенсивность перехода к повторному запросу IP-адреса: $\lambda_{42} = \frac{1}{\bar{t}_{42}}$, где $\bar{t}_{42}$ – среднее время перехода к повторному запросу IP-адреса [9, 10].

На рисунке 3 представлен граф возможных состояний системы ИБ в процессе определения геолокации нарушителя в информационной сети [11].

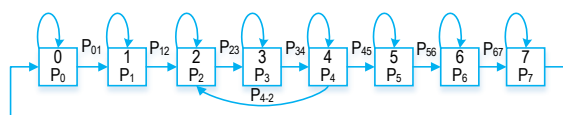


Рис. 3. Граф состояний системы ИБ в процессе определения геолокации нарушителя

Fig. 3. State Graph of the IS System in the Process of Determining the Geolocation of the Intruder

На рисунке 3 представлены следующие состояния системы ИБ.

Состояние «0» соответствует состоянию, когда система ИБ ожидает получение IP-адреса. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_0 . Система ИБ переходит в состояние «1» с вероятностью P_{01} за время t_{0K} .

Состояние «1» соответствует состоянию, когда администратор ИБ, получив задачу по определению геолокации нарушителя, открывает консоль. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_1 . Система ИБ переходит в состояние «2» с вероятностью P_{12} за время t_{0K} .

Состояние «2» соответствует состоянию, когда вводится IP-адрес нарушителя. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_2 . Система ИБ переходит в состояние «3» с вероятностью P_{23} за время t_{BA} .

Состояние «3» соответствует состоянию, когда введенный IP-адрес отправляется в базу геолокации. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_3 . По окончании данного процесса система переходит в состояние «4» с вероятностью P_{34} за время t_{OA} .

Состояние «4» соответствует состоянию, когда введенный IP-адрес проверяется на получение данных. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_4 . Если данные не были получены, то система переходит в состояние «2» с вероятностью P_{42} за время t_{42} . Если данные получены, то система переходит в состояние «5» с вероятностью P_{45} за время $t_{ПИ}$.

Состояние «5» соответствует состоянию, когда полученная информация заносится во внутреннюю БД. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_5 . По окончании данного процесса система переходит в состояние «6» с вероятностью P_{56} за время $t_{ЗПИ}$.

Состояние «6» соответствует состоянию, когда из полученной информации добывается геолокация нарушителя. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_6 . По окончании данного процесса система переходит в состояние «7» с вероятностью P_{67} за время $t_{ПГМ}$.

Состояние «7» соответствует состоянию, когда на основе полученной информации о геолокации формируется отчет, который затем передается администратору ИБ. Вероятность того, что система ИБ находится в этом состоянии, обозначим через P_7 . По окончании данного процесса система переходит в состояние «0» с вероятностью P_{70} за время $t_{ФВО}$.

В процессе моделирования были введены следующие допущения:

- 1) потоки задач на определение геолокации нарушителя и на формирование отчета о ней являются простейшими потоками;
- 2) поток задач на определение геолокации нарушителя является «редким»;

3) время распределено по показательному закону;
4) для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от ее состояния в настоящий момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Исходя из принятых допущений для построения модели процесса определения геолокации нарушителя можно воспользоваться аппаратом Марковских случайных процессов [12], то есть с помощью дифференциальных уравнений, в которых неизвестными функциями являются вероятности нахождения системы ИБ в различных состояниях с P_0 до P_7 . В результате была составлена система дифференциальных уравнений (1), которая преобразована в систему алгебраических уравнений (2) ввиду того, что при достижении стационарного состояния, то есть при $t \rightarrow \infty$ вероятности $P_i(t)$ будут стремиться к постоянным пределам, а и их производные – к нулю.

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_0 P_0(t) - \lambda_0 P_0(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_0 P_0(t) - \lambda_{12} P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12} P_1(t) + \alpha P_4(t) - \lambda_{23} P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{23} P_2(t) - \lambda_{34} P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{34} P_3(t) - \alpha P_4(t) - \beta P_4(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \beta P_4(t) - \lambda_{56} P_5(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{56} P_5(t) - \lambda_{67} P_6(t), \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_{67} P_6(t) - \mu_0 P_7(t), \end{cases} \quad (1)$$

где P_x – возможные состояния графа; λ_x – плотность потока формирования модели перехода из одного состояния в другое; α, β – плотность потока перехода состояний при разных соблюдении условий алгоритма; ϕ_0 – начальное состояние графа.

$$\begin{cases} \mu_0 P_0(t) - \lambda_0 P_0(t) = 0, \\ \lambda_0 P_0(t) - \lambda_{12} P_1(t) = 0, \\ \lambda_{12} P_1(t) + \alpha P_4(t) - \lambda_{23} P_2(t) = 0, \\ \lambda_{23} P_2(t) - \lambda_{34} P_3(t) = 0, \\ \lambda_{34} P_3(t) - \alpha P_4(t) - \beta P_4(t) = 0, \\ \beta P_4(t) - \lambda_{56} P_5(t) = 0, \\ \lambda_{56} P_5(t) - \lambda_{67} P_6(t) = 0, \\ \lambda_{67} P_6(t) - \mu_0 P_7(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему (2) с учетом условия нормировки $\sum_{k=0}^m P_k = 1$, получаем решения (3).

В качестве вероятности успешного определения геолокации нарушителя можно использовать вероятность нахождения системы ИБ в состоянии, когда последняя реализует конечное формирование

и вывод отчета по результатам работы (P_7) [13, 14]. Вероятность P_7 можно принять за вероятность успешного определения геолокации нарушителя, если считать, что после определения геолокации нарушителя по одному IP-адресу система ИБ сразу же приступает к определению геолокации нарушителя по следующему IP-адресу, то есть система ИБ должна эффективно работать и в состоянии штатной работы (P_0) [15, 16]. Таким образом, вероятность успешного выполнения $P_M = P_0 + P_7$, а с учетом (3) P_M принимает вид (4).

После чего проводится верификация разработанной модели; для этого были взяты исходные данные, представленные в таблице 1 [15].

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные верификация модели процесса определения геолокации нарушителя

TABLE 1. Initial Data Verification of the Process Model for Determining the Geolocation of the Intruder

№ п/п	Состояние системы	Параметр	Значение, мин
1.	Ожидание начала работы (О)	t_0	0,01
2.	Открытие консоли (ОК)	$t_{ок}$	0,03
3.	Ввод IP-адреса (ВА) нарушителя	$t_{ва}$	0,05
4.	Отправка IP-адреса (ОА) нарушителя в базу геолокации	$t_{оа}$	0,015 0,05 0,1
5.	Получение информации (ПИ) об IP-адресе нарушителя	$t_{пи}$	10
6.	Занесение полученной (ЗПИ) информации во временную БД	$t_{зпи}$	0,05 5 8
7.	Получение геолокации (ПГМ) нарушителя	$t_{пгм}$	5 10 15
8.	Формирование и вывод отчета (ФВО) о геолокации нарушителя	$t_{фво}$	0,005

Подставляя вышеперечисленные исходные данные в выражение (4), получаем зависимости вероятности успешного определения геолокации нарушителя (P_M) от времени получения информации об IP-адресе ($t_{пи}$) при различном времени получения геолокации нарушителя ($t_{пгм}$) [17, 18], представленные на рисунке 4а. Из рисунка следует, что при увеличении времени получения геолокации нарушителя ($t_{пгм}$), P_M будет опускаться ниже требуемого уровня 0,9. Так, например, при реализации получения геолокации за 5 минут $t_{пи}$ должно быть больше 2,2 минут, при реализации получения геолокации за 10 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1,8 минут, а при реализации получения геолокации за 15 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1 минуты [19].

Далее получаем зависимости вероятности успешного определения геолокации нарушителя (P_M) от времени получения информации об IP-адресе ($t_{пи}$) при различном времени отправки IP-адреса в базу геолокации ($t_{оа}$), представленные на рисунке 4б.

$$\left\{ \begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}}, \\ P_1 &= \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_2 &= \frac{\lambda_0(\lambda + \beta)}{\lambda_{23}\beta} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_3 &= \frac{\lambda_0(\lambda + \beta)}{\lambda_{34}\beta} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_4 &= \frac{\lambda_0}{\beta} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_5 &= \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_6 &= \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right), \\ P_7 &= \frac{\lambda_0}{\mu_0} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0}} \right). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$P_M = \frac{\lambda_0 + \mu_0}{\mu_0 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_{12}} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{23}\beta} + \frac{\lambda_0(\alpha+\beta)}{\lambda_{34}\beta} + \frac{\lambda_0}{\beta} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{56}} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{67}} + \frac{\lambda_0}{\mu_0} \right)}. \quad (4)$$

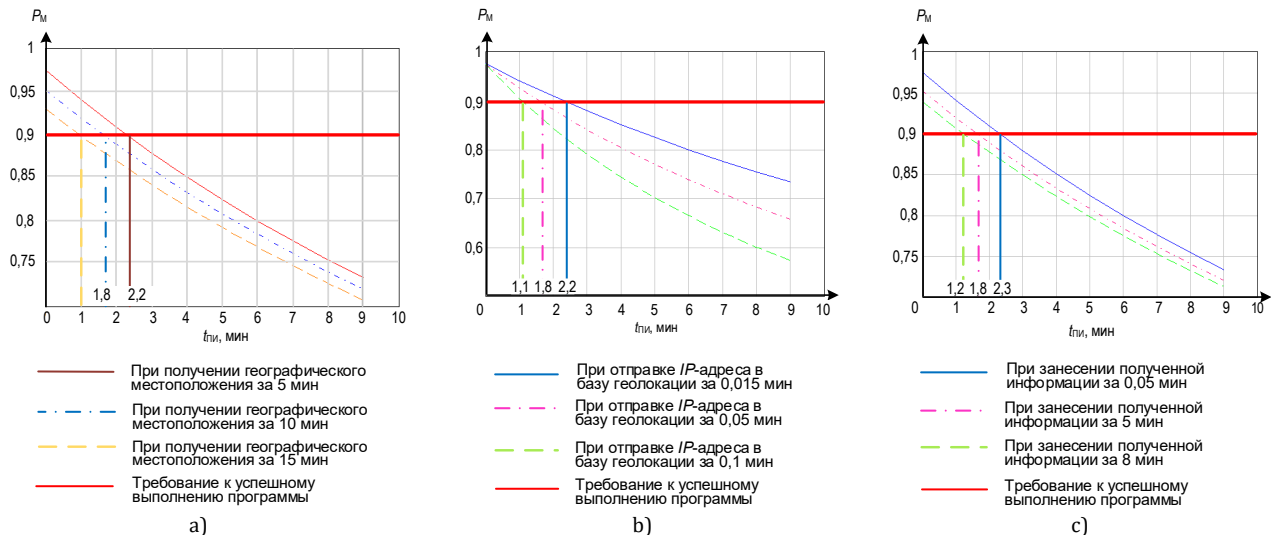


Рис. 4. Зависимости вероятности P_M от времени получения информации об IP-адресе при различном времени:
 а) получения геолокации нарушителя ($t_{ПМ}$); б) отправки IP-адреса в базу данных ($t_{ОД}$);
 в) занесения полученной информации в базу данных ($t_{ЗПИ}$)

Fig. 4. Dependences of the Probability P_M on the Time of Receiving Information about the IP Address at Different Times:
 a) Obtaining the Geolocation of the Intruder ($t_{ПМ}$); b) Sending the IP Address to the Database ($t_{ОД}$);
 c) Entering the Received Information into the Database ($t_{ЗПИ}$)

Из рисунка 4б следует, что при увеличении времени отправки IP-адреса в базу геолокации (t_{0A}) вероятности успешного определения геолокации нарушителя (P_M) будет опускаться ниже требуемого уровня 0,9. Так, например, при реализации отправки IP-адреса в базу геолокации за 0,015 минут $t_{пи}$ должно быть больше 2,2 минут, при реализации отправки IP-адреса в базу геолокации за 0,05 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1,8 минут, а при реализации отправки IP-адреса в базу геолокации за 0,1 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1,1 минуты [20].

Следующим этапом было проведено исследование зависимостей вероятности успешного определения геолокации нарушителя (P_M) от времени получения информации об IP-адресе ($t_{пи}$) при различном времени занесения полученной информации в БД ($t_{зпи}$), представленные на рисунке 4с. Из рисунка следует, что при увеличении времени занесения полученной информации в БД ($t_{зпи}$) вероятность успешного определения геолокации нарушителя (P_M) будет уменьшаться ниже требуемого уровня 0,9.

Так, например, при реализации занесения полученной информации в БД за 0,05 минут $t_{пи}$ должно быть больше 2,3 минут, при реализации занесения полученной информации в БД за 5 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1,8 минут, а при реализации занесения полученной информации в БД за 8 минут $t_{пи}$ должно быть больше 1,2 минуты [21].

Исходя из всего вышеизложенного следует, что администратору ИБ необходимо своевременно реагировать на действия нарушителя в ИТКС. Для этого необходимо разработать средство, позволяющее сократить временные параметры, описанные выше [22, 23].

3. Программное обеспечение определения геолокации нарушителя

Для практической реализации предлагаемого метода повышения защищенности ИТКС принято решение разработать программное обеспечение (ПО) определения геолокации нарушителя с целью повышения оперативности реагирования на внешних нарушителей сети.

Для разрабатываемого ПО предъявляются следующие требования.

1) Завершенность – это насколько полно программа выполняет все заявленные функции и задачи, для которых она была разработана. Если программа имеет высокую завершенность, это означает, что она содержит все функции и возможности, которые были обещаны ее разработчиками.

2) Актуальность – это насколько программа соответствует требованиям и ожиданиям пользователей, а также насколько она удовлетворяет текущим требованиям рынка. Если программа актуальна, она отвечает потребностям пользователей и предоставляет им актуальные функции и возможности.

3) Исполнимость – это насколько эффективно программа выполняет свои функции и задачи. Если программа имеет высокую исполнимость, это означает, что она работает быстро и без ошибок, используя минимальное количество ресурсов компьютера [24, 25].

Важно, чтобы ПО было достаточно завершенным, актуальным и исполнимым, удовлетворяло потребности пользователей и оставалось конкурентоспособным на рынке. Кроме того, эти качественные характеристики помогают удовлетворять требованиям безопасности и надежности ПО.

Для разработки ПО в качестве языка программирования выбран язык – Python [26], преимуществами которого являются:

- простой и понятный синтаксис;
- совместимость с различными операционными системами: Windows, macOS, Linux;
- широкое применение;
- высокая скорость разработки.

В качестве среды программирования выбран Microsoft Visual Code [27], которому свойственна:

- 1) работа со множеством языков программирования, включая Python, JavaScript, C++, C#;
- 2) встроенная поддержка системы контроля версий, таких как Git.
- 3) возможность запускать и отлаживать приложения прямо из редактора, что упрощает процесс разработки.

Алгоритм работы ПО [28] представлен ниже:

- 1) после запуска программы вводится обнаруженный IP-адрес;
- 2) отправляется запрос на службы геолокации, с помощью которых определяется местоположение;
- 3) представляется вывод полученных данных геолокации по заданному IP-адресу в окне программы (рисунок 7).

```
Please enter IP: 15.65.128.255
[IP] : 15.65.128.255
[Int prov] : HP Inc.
[Org] : HP Inc
[Country] : Hesse
[City] : Frankfurt am Main
[ZIP] : 60313
[Lat] : 50.1109
[Lon] : 8.68213
```

Рис. 7. Пример работы программного обеспечения определения IP-геолокации

Fig. 7. An Example of How IP Geolocation Software Works

Вывод программы содержит следующие данные по порядку: введенный IP-адрес, название провайдера, предоставляющего услуги сети Интернет-пользователю, название организации, которой принадлежит IP-адрес, страну, город, почтовый индекс, а также примерную широту и долготу IP-адреса, что позволит оперативно начать расследование по данному факту несанкционированного воздействия на ИТКС предприятия [29, 30].

Заключение

В настоящее время обеспечение ИБ ИТКС основано на реализации реактивных способов защиты, которые не позволяют оперативно получать точную информацию о нахождении нарушителя и не учитывают динамику и стохастическую неопределенность основных процессов защиты информации. Также построенные системы обеспечения ИБ ИТКС на основе известных способов защиты информации не удовлетворяют требованиям нормативно-правовых документов. Поэтому предложен метод повышения защищенности ИТКС с использованием средств определения геолокации нарушителя. В его основе лежит описание способа сканирования сети предприятия, а также разработанные алгоритмы действий в случае обнаружения подозрительных активностей в сети и алгоритм определения геолокации нарушителя. Эти инновации в области кибербезопасности вносят дополнительный уровень защиты, обеспечивая более надежное и усовершенствованное реагирование на потенциальные угрозы в сети ИТКС.

Сравнительный анализ достоинств и недостатков методов моделирования сложнодинамических информационных систем позволяет сделать вывод о том, что процесс определения геолокации нарушителя, с учетом введенных ограничений и допущений, наиболее адекватно моделируется аналитическим методом с использованием основных положений теории принятия статистических решений, теории вероятности, математической статистики, теории Марковских цепей и дифференциального исчисления.

За счет моделирования процесса определения геолокации нарушителя установлены необходимые требования по вероятностно-временным характеристикам данного процесса, выполнение которых позволит оптимизировать выполнение процесса и обеспечить точность и своевременность в

выявлении нарушителей. Эти требования при использовании предлагаемого метода способствуют достижению заданного уровня защищенности ИТКС и обеспечивают более надежную защиту от потенциальных угроз.

Разработанный метод повышения защищенности ИТКС с использованием средств определения геолокации нарушителя позволяет:

1) быстро и эффективно определить геолокацию нарушителя, так как использованы различные способы определения местоположения на основе IP-адреса, что повышает точность и достоверность полученных данных;

2) оптимизировать процесс обеспечения ИБ ИТКС за счет эффективной и быстрой обработки данных о геолокации нарушителя, что позволяет ускорить расследование инцидентов ИБ.

На основе предложенного метода разработано ПО «Средство определения в сети передачи данных цепочки маршрутов до географического местоположения нарушителя» [31], которое получило государственную регистрацию. Разработанное средство позволяет повысить безопасность ИТКС предприятия путем повышения оперативности реагирования на внешние угрозы.

В дальнейшем будут исследоваться возможности по реализации данного метода с точки зрения автоматизации процесса, что позволит полностью на программном уровне принимать самостоятельные решения по реагированию на подозрительные действия в сети для защиты от нарушителя. Развитие метода будет включать в себя анализ эффективности и масштабируемости автоматизированных решений, оптимизацию процесса для более эффективной защиты ИТКС. Этот шаг позволит более эффективно противодействовать потенциальным угрозам и обеспечивать непрерывную защиту информационных систем.

Список источников:

1. Морковкин Е.А., Новичихина А.А., Замулин И.С. IP-адресация и информационная безопасность // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2022. № 1(39). С. 9–12.
2. Иванов М.В., Полунин А.А. Повышение точности IP-геолокации на основе данных, предоставляемых открытыми IP-геосервисами // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 4. С. 758–785. DOI:10.15622/ia.21.4.5
3. Липатников В.А., Шевченко А.А., Мелехов К.В., Задбоев В.А. Способ обнаружения географического местоположения нарушителя безопасности информации в сети передачи данных // II Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "ИТ-технологии"» (Анапа, Россия, 23–24 марта 2023). Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2023. Т. 2. С. 178–183.
4. Aljumaily M. Content Delivery Networks Architecture, Features, and Benefits. 2016. DOI:10.13140/RG.2.1.1762.0722
5. Arif M.J., Karunasekera S., Kulkarni S., Gunatilaka A., Ristic B. Internet Host Geolocation Using Maximum Likelihood Estimation Technique // Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (Perth, Australia, 20–23 April 2010). IEEE, 2010. PP. 422–429. DOI:10.1109/AINA.2010.139
6. Липатников В.А., Шевченко А.А. Способ контроля уязвимостей при масштабировании автоматизированной системы менеджмента предприятия интегрированной структуры // Информационные системы и технологии. 2016. № 2(94). С. 128–140.
7. Williams J. Identification of IP address using fraudulent geolocation data. 2020. URL: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/computing/public/1920-ug-projects/Williams,-James-%28jw1317%29.pdf> (дата обращения 13.09.2023)

8. Wang Z., Li H., Li Q., Li W., Zhu H., Sun L. Towards IP geolocation with intermediate routers based on topology discovery // *Cybersecurity*. 2019. Vol. 2. Article ID 13. DOI:10.1186/s42400-019-0030-2
9. Hufaker B., Fomenkov M., Claffy K. Geocompare: a comparison of public and commercial geolocation databases. 2011. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13521646> (дата обращения 13.09.2023)
10. Pratap U., Canudas-de-Wit C., Garin F. Average state estimation in presence of outliers // *Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC, Jeju, South Korea, 14–18 December 2020)*. IEEE, 2020. PP. 6058–6063. DOI:10.1109/CDC42340.2020.9303809
11. Шевченко А.А. Математическая модель информационного противоборства двух систем в информационно-телекоммуникационном пространстве // *Труды всероссийской научно-практической конференции: Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации (Санкт-Петербург, России, 14–15 октября 2020)*. СПб.: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, 2020. С. 237–241.
12. Zhao F., Luo X., Gan Y., Zu S., Cheng Q., Liu F. IP Geolocation based on identification routers and local delay distribution similarity // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2018. Vol. 31. Iss. 22. DOI:10.1002/cpe.4722
13. Липатников В.А., Шевченко А.А., Яцкин А.Д., Семенова Е.Г. Управление информационной безопасностью организации интегрированной структуры на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 4. С. 67–76. DOI:10.15217/issn1684-8853.2017.4.67
14. Top 10 Best IP Geolocation APIs (in 2022). URL: <https://rapidapi.com/blog/ip-geolocation-api> (дата обращения 21.02.2022)
15. Semiu O.A. Migration of IPv4 to IPv6; Translation Method. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/345727747_Migration_of_IPv4_to_IPv6_Translation_Method (дата обращения 21.02.2022)
16. Taylor J., Devlin J., Curran K. Bringing location to IP Addresses with IP Geolocation // *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*. 2012. Vol. 4. Iss. 3. PP. 273–277.
17. Липатников В.А., Чепелев К.В., Шевченко А.А. Способ защиты информационно-вычислительной сети от вторжений. Патент RU 2705773 C1 от 09.01.2019. Опубл. 11.11.2019.
18. Padmanabhan V.N., Subramanian L. An investigation of geographic mapping techniques for internet hosts // *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM, San Diego, USA, 24–26 October 2023)*. PP. 173–185. New York: ACM, 2001. DOI:10.1145/383059.383073
19. Luckie M., Dhamdhere A., Hufaker B., Clark D., claffy kc. bdrmap: Inference of Borders Between IP Networks // *Proceedings of the Internet Measurement Conference (IMC '16, Santa Monica, USA, 14–16 November 2016)*. New York: ACM, 2016. PP. 381–396. DOI:10.1145/2987443.2987467
20. Липатников В.А., Мелехов К.В., Задбоев В.А. Способ определения локации злоумышленника в сети передачи данных сетевой инфраструктуры // *Международная научно-практическая конференция «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Санкт-Петербург, Россия, 09–10 ноября 2022)*. Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. Т. 2. С. 215–220.
21. Кунашев Д.А., Алакулов А.А., Рахаев А.Х. Адресное пространство IPV4 – IP-геолокация // *Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2021» (Эльбрус, Россия, 23–30 апреля 2021)*. Эльбрус, 2021. Т. III. С. 295–297.
22. Hufaker B., Fomenkov M., claffy kc. Geocompare: a comparison of public and commercial geolocation databases. 2011. URL: https://www.caida.org/catalog/papers/2011_geocompare_tr/geocompare-tr.pdf (дата обращения 13.09.2023)
23. Лизнева Ю.С., Кокорева Е.В., Костюкович А.Е. Прогнозирование местоположения мобильного абонента в сети // *Вестник СибГУТИ*. 2022. № 3(59). С. 101–111. DOI:10.55648/1998-6920-2022-16-3-101-111
24. Gouel M., Vermeulen K., Fourmaux O., Friedman T., Beverly R. IP Geolocation Database Stability and Implications for Network Research. 2021. URL: <https://hal.science/hal-03419874> (дата обращения 13.09.2023)
25. iPapi AP. URL: <https://ipapi.com> (дата обращения 12.04.2023)
26. Сорокин М.А., Курило А.А., Кузин П.И. Модель процесса анализа служебного трафика при управлении безопасностью информационной сети // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2021. № 1–2(151–152). С. 67–73.
27. Медведев Ю.С., Терехов В.В. Особенности построения распределенной корпоративной сети предприятия для обеспечения информационными и вычислительными ресурсами // *XII Международная научно-практическая конференция «Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского» (Краснодар, Россия, 22–23 декабря 2021)* Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом – Юг", 2022. С. 258–260.
28. Measures of distance between samples: Euclidean. URL: <http://www.econ.upf.edu/~michael/stanford/maeb4.pdf> (дата обращения 20.05.2023)
29. Li Z., Levin D., Spring N., Bhattacharjee B. Internet anycast: performance, problems, & potential // *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM '18, Budapest, Hungary, 20–25 August 2018)*. New York: ACM, 2018. PP. 59–73. DOI:10.1145/3230543.3230547
30. Шевченко А.А. Модель процесса защиты информационно-телекоммуникационной сети от несанкционированного воздействия // *Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации» (Санкт-Петербург, Россия, 10–11 октября 2019)*. СПб.: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного МО РФ, 2019. С. 166–173.
31. Задбоев В.А., Мелехов К.В., Петренко М.И., Комов А.А., Липатников В.А., Парфилов В.А. Средство определения в сети передачи данных цепочки маршрутов до географического местоположения нарушителя. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023614977 от 01.03.2023. Опубл. 09.03.2023.

References:

1. Morkovkin Ye.A., Novichikhina A.A., Zamulin I.S. IP-addressing and information security. *Bulletin of the Khakass State University. N.F. Katanov*. 2022;1(39):9–12.
2. Ivanov M., Polunin A. Improving the accuracy of IP geolocation based on public ip geoservices data. *Informatics and Automation*. 2022;21(4):758–785. DOI:10.15622/ia.21.4.5
3. Lipatnikov V.A., Shevchenko A.A., Melekhov K.V., Zadboev V.A. Method of detecting the geographical location of the information security intruder in the data network. *Proceedings of the IInd All-Russian Scientific and Technical Conference on State and Prospects of Development of Modern Science in the Direction of "IT-Technologies", 23–24 March 2023, Anapa, Russia, vol.2*. Anapa: Military Innovation Technopolis "ERA" Publ.; 2023. PP. 178–183.
4. Aljumaily M. *Content Delivery Networks Architecture, Features, and Benefits*. 2016. DOI:10.13140/RG.2.1.1762. 0722
5. Arif M.J., Karunasekera S., Kulkarni S., Gunatilaka A., Ristic B. Internet Host Geolocation Using Maximum Likelihood Estimation Technique. *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 20–23 April 2010, Perth, Australia*. IEEE; 2010. p.422–429. DOI:10.1109/AINA.2010.139
6. Lipatnikov V.A., Shevchenko A.A. The Vulnerability Control Method Applying While Automated Integrated Structure Organization Management System Scaling. *Information Systems and Technologies*. 2016;2(94):128–140.
7. Williams J. *Identification of IP address using fraudulent geolocation data*. 2020. URL: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/computing/public/1920-ug-projects/Williams-James-%28jw1317%29.pdf> [Accessed 13.09.2023]
8. Wang Z., Li H., Li Q., Li W., Zhu H., Sun L. Towards IP geolocation with intermediate routers based on topology discovery. *Cybersecurity*. 2019;2:13. DOI:10.1186/s42400-019-0030-2
9. Hufaker B., Fomenkov M., Claffy K. *Geocompare: a comparison of public and commercial geolocation databases*. 2011. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13521646> [Accessed 13.09.2023]
10. Pratap U., Canudas-de-Wit C., Garin F. Average state estimation in presence of outliers. *Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control, CDC, 14–18 December 2020, Jeju, South Korea*. IEEE; 2020. p.6058–6063. DOI:10.1109/CDC42340.2020.9303809
11. Shevchenko A.A. Mathematical model of information confrontation of two systems in information and telecommunication space. *Proceedings of the All-Army Scientific and Practical Conference on Innovative Activity in the Armed Forces of the Russian Federation, 14–15 October 2020, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2020. p.237–241.
12. Zhao F., Luo X., Gan Y., Zu S., Cheng Q., Liu F. IP Geolocation based on identification routers and local delay distribution similarity. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2018;31(22). DOI:10.1002/cpe.4722
13. Lipatnikov V.A., Shevchenko A.A., Yatskin A.D., Semenova E.G. Information Security Management of Integrated Structure Organization Based on a Dedicated Server with Container Virtualization. *Information and Control Systems*. 2017;4:67–76. DOI:10.15217/issn1684-8853.2017.4.67
14. *Top 10 Best IP Geolocation APIs (in 2022)*. URL: <https://rapidapi.com/blog/ip-geolocation-api> [Accessed 13.09.2023]
15. Semiu O.A. *Migration of IPv4 to IPv6; Translation Method*. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/345727747_Migration_of_IPv4_to_IPv6_Translation_Method [Accessed 13.09.2023]
16. Taylor J., Devlin J., Curran K. Bringing location to IP Addresses with IP Geolocation. *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*. 2012;4(3):273–277.
17. Lipatnikov V.A., Chepelev K.V., Shevchenko A.A. *Method of Protecting an Information Network from Intrusions*. Patent RF. 2705773 C1, 11.11.2019.
18. Padmanabhan V.N., Subramanian L. An investigation of geographic mapping techniques for internet hosts. *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, SIGCOMM, 24–26 October 2023, San Diego, USA*. p.173–185. New York: ACM; 2001. DOI:10.1145/383059.383073
19. Luckie M., Dhamdhere A., Hufaker B., Clark D., claffy kc. bdrmap: Inference of Borders between IP Networks. *Proceedings of the 2016 Internet Measurement Conference, IMC '16, 14–16 November 2016, Santa Monica, USA*. New York: ACM; 2016. PP. 381–396. DOI:10.1145/2987443.2987467
20. Lipatnikov V.A., Melekhov K.V., Zadboev V.A. A Method of Detection of an Intruder's Location in the Data Network of the Network Infrastructure. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Transport of Russia: Problems and Prospects, 09–10 November 2022, St. Petersburg, Russia, vol.2*. St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems RAS; 2022. p.215–220.
21. Kunashev D.A., Alakulov A.A., Rakhaev A.Kh. Address space IPV4 – IP-geolocation. *Proceedings of the International Scientific Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists «Perspektiva–2021», 23–30 April 2021, Elbrus, Russia*. Elbrus, 2021. vol.III. p.295–297.
22. Hufaker B., Fomenkov M., claffy kc. *Geocompare: a comparison of public and commercial geolocation databases*. 2011. URL: https://www.caida.org/catalog/papers/2011_geocompare_tr/geocompare-tr.pdf [Accessed 13.09.2023]
23. Lizneva Ju. S., Kokoreva E.V., Kostyukovich A.E. Predicting the location of a mobile subscriber in the network. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2022;3(59):101–111. DOI:10.55648/1998-6920-2022-16-3-101-111
24. Gouel M., Vermeulen K., Fourmaux O., Friedman T., Beverly R. *IP Geolocation Database Stability and Implications for Network Research*. 2021. URL: <https://hal.science/hal-03419874> [Accessed 13.09.2023]
25. iPapi AP. URL: <https://ipapi.com> [Accessed 12.04.2023]
26. Sorokin M.A., Kurilo A.A., Kuzin P.I. Service Traffic Analysis Process Model for Information Network Security Management. *Military Energy. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices*. Issue 16. 2021;1-2(151-152):67–73.

27. Medvedev Yu.S., Terekhov V.V. Features of building a distributed corporate network of an enterprise to provide information and computing resources. *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference "Scientific readings named after Professor N.E. Zhukovsky", 22–23 December 2021, Krasnodar, Russia*. Krasnodar: Publishing House – South, 2022. p.258–260.
28. Measures of distance between samples: Euclidean. URL: <http://www.econ.upf.edu/~michael/stanford/maeb4.pdf> [Accessed 20.05.2023]
29. Li Z., Levin D., Spring N., Bhattacharjee B. Internet anycast: performance, problems, & potential. *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication, SIGCOMM '18, 20–25 August 2018, Budapest, Hungary*. New York: ACM; 2018. p.59–73. DOI:10.1145/3230543.3230547
30. Shevchenko A.A. A model of the process of protecting an information and telecommunications network from unauthorized influence. *Proceedings of the All-Army Scientific and Practical Conference on Innovative Activity in the Armed Forces of the Russian Federation, 10–11 October 2019, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2019. p.166–173.
31. Zadboev V.A., Melekhov K.V., Petrenko M.I., Komov A.A., Lipatnikov V.A., Parfirov V.A., et al. *Means of Determining the Chain of Routes in the Data Transmission Network to the Geographical Location of the Offender*. Patent RF, no 2023614029, 01.03.2023.

Статья поступила в редакцию 14.06.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 14.06.2023; approved after reviewing 18.07.2023; accepted for publication 25.07.2023.

Информация об авторах:

ЛИПАТНИКОВ
Валерий Алексеевич

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0000-0002-3736-4743>

ЗАДБОВ
Вадим Александрович

оператор роты (научной) научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0009-0003-9362-1307>

МЕЛЕХОВ
Кирилл Витальевич

адъюнкт научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0009-0007-3474-412X>

ШЕВЧЕНКО
Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

 <https://orcid.org/0000-0001-9113-1089>

Научная статья

УДК 004.8

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-97-113



Многозначная классификация компьютерных атак с использованием искусственных нейронных сетей с множественным выходом

Олег Иванович Шелухин, sheluhin@mail.ru

Дмитрий Игоревич Раковский[✉], Prophet_alpha@mail.ru

Московский технический университет связи и информатики,
Москва, 111024, Российская Федерация

Аннотация: Современные компьютерные сети (КС), имея сложную и часто гетерогенную структуру, порождают большие объемы многомерных многозначных данных. Учет информации о многозначности экспериментальных данных (ЭД) может повысить эффективность решения целого ряда задач информационной безопасности: от профилирования КС до обнаружения и предотвращения компьютерных атак на КС. Целью работы является разработка многозначной архитектуры искусственной нейронной сети (ИНС) для обнаружения и классификации компьютерных атак в многозначных ЭД, и ее сравнительный анализ с известными аналогами по бинарным метрикам оценки качества классификации. Рассмотрена формализация ИНС в терминах матричной алгебры, позволяющая учитывать случай многозначной классификации и новая архитектура ИНС с множественным выходом с использованием предложенной формализации. Достоинством предложенной формализации является лаконичность ряда записей, ассоциированных с рабочим режимом работы ИНС и режимом обучения. Предложенная архитектура ИНС позволяет решать задачи обнаружения и классификации многозначных компьютерных атак в среднем на 5 % эффективнее известных аналогов. Наблюдаемый выигрыш обусловлен учетом многозначных закономерностей между классовыми метками на этапе обучения за счет использования общего первого слоя. Достоинствами предложенной архитектуры ИНС является масштабируемость к любому числу классовых меток и быстрая сходимость.

Ключевые слова: информационная безопасность, многозначная классификация, компьютерная сеть, компьютерная атака, нейронные сети, глубокие нейронные сети, многозначные нейронные сети

Ссылка для цитирования: Шелухин О.И., Раковский Д.И. Многозначная классификация компьютерных атак с использованием искусственных нейронных сетей с множественным выходом // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 97–113. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-97-113

Multivalued Classification of Computer Attacks Using Artificial Neural Networks with Multiple Outputs

Oleg Shelukhin, sheluhin@mail.ru

Dmitry Rakovsky[✉], Prophet_alpha@mail.ru

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics,
Moscow, 111024, Russian Federation

Abstract: Modern computer networks (CN), having a complex and often heterogeneous structure, generate large volumes of multi-dimensional multi-label data. Accounting for information about multi-label experimental data (ED) can improve the efficiency of solving a number of information security problems: from CN profiling to detecting and preventing computer attacks on CN. The aim of the work is to develop a multi-label artificial neural network (ANN) architecture for detecting and classifying computer attacks in multi-label ED, and its comparative analysis with known analogues in terms of binary metrics for assessing the quality of classification. A formalization of ANN in terms of matrix algebra is proposed, which allows taking into account the case of multi-label classification and the new architecture of ANN with multiple output using the proposed formalization. The advantage of the proposed formalization is the conciseness of a number of entries associated with the ANN operating mode and learning mode. Proposed architecture allows solving the problems of detecting and classifying multi-label computer attacks, on average, 5% more efficiently than known analogues. The observed gain is due to taking into account multi-label patterns between class labels at the training stage through the use of a common first layer. The advantages of the proposed ANN architecture are scalability to any number of class labels and fast convergence.

Keywords: information security, Multi-label classification, computer network, computer attack, neural networks, deep neural networks, Multi-label neural networks

For citation: Shelukhin O., Rakovsky D. Multivalued Classification of Computer Attacks Using Artificial Neural Networks with Multiple Outputs. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):97–113. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-97-113

Введение

Современные компьютерные сети (КС), имея сложную и часто гетерогенную структуру [1], порождают большие объемы многомерных данных. Как показывают исследования, КС порождает многозначные экспериментальные данные (ЭД), одновременно ассоциированные сразу с несколькими классовыми метками [2]. Учет информации о многозначности ЭД может повысить эффективность решения целого ряда задач: профилирование и прогнозирование состояний КС «в будущем» [3, 4]; прогнозирование редких аномальных состояний КС [5]; обнаружение и предотвращение компьютерных атак на КС [6]. Применение многозначного анализа позволяет повысить эффективность решения задач информационной безопасности (ИБ), решение которых классическими «однозначными» способами затруднено. Это, например, анализ инцидентов ИБ [7]; маркировка подозрительного сетевого трафика [8]; классификация зашифрованного сетевого трафика [9].

Одним из актуальных инструментов решения задач многозначной классификации являются искусственные нейронные сети, ИНС (ANN, аббр. от англ. Artificial Neural Network). Для задач многозначной классификации используют нейронные сети с глубоким обучением, которые могут извлекать из данных более абстрактные признаки и моделировать более сложные нелинейные отношения между ними [10]. Для исследования подобных процессов могут использоваться различные архитектуры ИНС (по отдельности или в комбинации): полносвязная – многослойный персептрон (MLP, аббр. от англ. Multi-Layer Perceptron); сверточная нейронная сеть (CNN, аббр. от англ. Convolutional Neural Networks); рекуррентная нейронная сеть (RNN, аббр. от англ. Recurrent Neural Networks);

нейронные сети типа «трансформер» (Transformer) [11, 12]. Известны спайковые нейронные сети и их приложения для анализа изображений, что может быть полезно для решения ряда задач информационной безопасности [13].

Целью работы является разработка многозначной архитектуры ИНС для обнаружения и классификации компьютерных атак в многозначных ЭД, и ее сравнительный анализ с известными аналогами по бинарным метрикам оценки качества классификации.

Формализация задачи многозначной классификации компьютерных атак

КС можно представить, как множество из M упорядоченных наборов значений ее дискретно изменяющихся атрибутов («исторических данных»):

$$A \subseteq A_{\text{перв}} \cup A_{\text{втор}} = (A_{\text{перв } 1} \times A_{\text{перв } 2} \times \dots \times A_{\text{перв } \text{len}_1}) \cup (A_{\text{втор } 1} \times A_{\text{втор } 2} \times \dots \times A_{\text{втор } \text{len}_2}) \quad (1)$$

Каждый член записи (1) является атрибутом КС и может быть представлен в виде вектора-столбца:

$$A(\cdot, m) = (a_{1m}, a_{2m}, \dots, a_{Nm}; m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}, M = \text{len}_1 + \text{len}_2).$$

Атрибуты КС могут подразделяться на два типа – первичные и вторичные:

$$(A_{\text{перв } k_1}; k_1 = \overline{1, \text{len}_1}), \\ (A_{\text{втор } k_2}; k_2 = \overline{1, \text{len}_2}).$$

Первичные атрибуты получают непосредственно от системных датчиков, установленных внутри КС. Вторичные атрибуты получают в результате обработки первичных атрибутов. Примерами вто-

ричных атрибутов могут быть, например, среднее время задержки сигнала в КС, количество потерянных пакетов в КС для конкретного хоста и пр.

Как правило, исторические данные, преобразованные к табличному виду посредством ряда манипуляций [2, 6], могут быть представлены в виде таблицы размером M столбцов на N строк:

$$D_{NM} = \{(A(n,), set_n); A = (a_{nm}), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}\}, \quad (2)$$

где n -й строке значений атрибутов записи $A(n,)$ ставится в соответствие множество меток set_n . Множество меток set_n ассоциируется с решающими правилами в контексте задачи. В задачах информационной безопасности метки могут соответствовать категориальным маркерам, связанным с профилем функционирования КС (состояния КС – метки, как правило, связанные с вторичными атрибутами) или с возникновением (отсутствием) определенной компьютерной атаки.

Предполагается, что множество меток, ассоциированных с записью ЭД, многозначно – т. е. одной записи может соответствовать одновременно несколько классовых меток.

Извлечем ряд таких множеств в отдельное упорядоченное множество по правилу:

$$f: D_{NM} \rightarrow L_n; L_n = (set_n; n = \overline{1, N}), \quad (3)$$

где D_{NM} – табличное представление размеченных экспериментальных данных; L_n – множеством меток set_n .

«Алфавит», образованный уникальными элементами множества L_n , сведем в отдельное множество S :

$$S = \bigcup_{n=1}^N set_n, \quad (4)$$

в котором объединены все элементы L_n .

Поскольку S не является мультимножеством, повторяющиеся элементы исключаются, что позволяет получить все уникальные классовые метки, содержащиеся в «исторических данных».

Пусть немаркированные, «новые» данные одинаковой размерности с «историческими данными» (2), представлены в виде:

$$\hat{D}_{\hat{N}M} = \{\hat{A}(\hat{n},); \hat{A} = (\hat{a}_{\hat{n}m}), m = \overline{1, M}, \hat{n} = \overline{1, \hat{N}}\}, \quad (5)$$

где $\hat{N} \in \mathbb{N}$ – количество неразмеченных данных; $\hat{A}(\hat{n},)$ – $\hat{n}$ -я строка в наборе неразмеченных экспериментальных данных.

Под классификацией немаркированной записи будем понимать процесс отображения немаркированной $\hat{n}$ -й записи (вектора-строки) $\hat{A}(\hat{n},)$ в соответствующий набор классовых меток $set_{\hat{n}}$. Процесс маркировки $\hat{A}(\hat{n},)$ может быть выполнен посред-

ством аппроксимации $\hat{A}(\hat{n},)$ по некоторой метрике ϕ , ассоциированной с истинным набором многозначных классовых меток для $\hat{A}(\hat{n},)$ – $set_{\hat{n}}^{true}$. Смысл «метрики ϕ » определяется подходом к решению задачи классификации. Как правило, постановка задачи классификации формируется на базе аксиоматики Колмогорова [14]. В рамках такой постановки под решением задачи классификации понимается построение алгоритма $ALG_1(\hat{A}(\hat{n},))$, вероятность ошибочной классификации которого может быть формализована соотношением [15]:

$$P(ALG_1(\hat{A}(\hat{n},))) = set_{\hat{n}}, set_{\hat{n}} \neq set_{\hat{n}}^{true} \rightarrow \min.$$

Метрикой $\phi_1 \in [0, 1]$ в данном случае выступает вероятность ошибочной классификации. Однако использование аксиоматики Колмогорова сопряжено с некоторыми ограничениями [16], такими, например, как необходимость знания априорной вероятности распределения классовых меток, что не всегда выполняется для реальных, сложных компьютерных систем и сетей.

Для преодоления указанных ограничений задача отображения $\hat{A}(\hat{n},) \rightarrow set_{\hat{n}}^{true}$ может быть выражена в понятиях аналитической геометрии (т. н. кластерный анализ и ассоциированная с ним задача многомерной классификации) или теории множеств. При формулировании задачи классификации в понятиях аналитической геометрии необходимо разбить анализируемую совокупность ЭД на сравнительно небольшое число, в определенном смысле однородных групп или классов с использованием меры сходства (расстояние, близость) ϕ_2 [17].

В результате задача классификации может быть сформулирована следующим образом [18].

Пусть дана неразмеченная запись ЭД в виде множества $\hat{A}(\hat{n},)$ и множество меток $set_{\hat{n}}$, ассоциированное с $\hat{A}(\hat{n},)$. Тогда результатом классификации будет точечно-множественное отображение $\mu: \hat{A}(\hat{n},) \rightarrow set_{\hat{n}}^{true}$, такое, что при пересечении множеств предсказанных $set_{\hat{n}}$ и истинных $set_{\hat{n}}^{true}$ меток, результирующее множество будет равным истинному – $set_{\hat{n}} \cap set_{\hat{n}}^{true} = set_{\hat{n}}^{true}$.

Рассмотренные варианты постановки задач классификации могут быть обобщены и на смежные области – например, на задачу прогнозирования. Отметим, что в реальных задачах набор истинных меток $set_{\hat{n}}^{true}$, ассоциированный с поступающими на вход неразмеченными ЭД, часто неизвестен – или становится известен спустя продолжительное время наблюдений, что неприемлемо для задач ИБ. Поэтому для оценки качества классификации алгоритма обычно предполагают разделение известной, размеченной, выборки ЭД D_{NM} на три подмножества: обучающую, валидационную и тестовую [19].

Валидационная выборка предъявляется в качестве эталонной для оценки качества классификации во время обучения алгоритма (например, при обучении ИНС, такая выборка предъявляется по окончании каждой эпохи обучения сети).

Тестовая выборка имитирует поступление неразмеченных ЭД на вход к алгоритму классификации в условиях, приближенных к реальным. Алгоритм, как правило, не имеет информации о записях, ассоциированных с приведенной выборкой. При этом результаты алгоритма ($set_{\hat{n}}$) – сравниваются с истинными метками, ассоциированными с тестовой выборкой ($set_{\hat{n}}^{true}$).

Таким образом достигается апробация алгоритма на «неразмеченных данных», информация о которых неизвестна алгоритму классификации.

Структура ИНС для многозначной классификации

Рассмотрим полносвязную ИНС, состоящую из LC-слоев (аббр. от англ. LayerCount), каждый слой которой описывается NCAL- или $ncal$ -нейронами (аббр. от англ. Neurons Count At Layer).

Каждый отдельный нейрон может быть описан правилом преобразования входного вектора $\overrightarrow{Input}_{ncal_{lc},lc}$ (ассоциированного с lc -м слоем ИНС и $ncal_{lc}$ -м нейроном) в выходному вектору $\overrightarrow{Output}_{ncal_{lc},lc}$:

$$AF_{ncal_{lc},lc}(net_{ncal_{lc},lc}) \rightarrow \overrightarrow{Output}_{ncal_{lc},lc}, \quad (6)$$

где $net_{ncal_{lc},lc} = \langle \overrightarrow{Input}_{ncal_{lc},lc}, \overrightarrow{W}_{ncal_{lc},lc} \rangle + w_{смещ. ncal_{lc},lc}$; lc – номер слоя, в котором расположен нейрон, $lc = \overline{1, LC}$; $ncal_{lc}$ – номер нейрона на слое lc , $ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}}$; $NCAL_{lc} \in NCAL_library$; $\overrightarrow{Input}_{ncal_{lc},lc}$ – входной вектор, поступающий на вход нейрона; $\overrightarrow{W}_{lc,ncal_{lc}}$ – вектор весов синапсов (входных связей) нейрона; $\langle \overrightarrow{Input}_{ncal_{lc},lc}, \overrightarrow{W}_{ncal_{lc},lc} \rangle$ – скалярное произведение между входным вектором и вектором весов, скаляр, $net_{ncal_{lc},lc}$; $w_{смещ. ncal_{lc},lc}$ – вход смещения, ассоциированный с нейроном; $\overrightarrow{Output}_{ncal_{lc},lc}$ – выходной вектор, полученный после прохождения $net_{ncal_{lc},lc}$ через функцию активации $AF_{ncal_{lc},lc}(net_{ncal_{lc},lc})$.

Для учета различия количества нейронов в каждом слое дополнительно вводится множество

$NCAL_library$, содержащее информацию о размере каждого слоя ИНС $NCAL_{lc} \in NCAL_library$.

В общем случае $\overrightarrow{Output}_{ncal_{lc},lc}$ является упорядоченным набором скаляров (вектором), формируемым функцией активации $AF_{ncal_{lc},lc}(net_{ncal_{lc},lc})$ и архитектурой слоя. Выходной вектор может как вырождаться в скалярную величину (состоять из одного элемента), так и трансформироваться в матрицу или тензор. Как правило, на уровне скрытого слоя многослойной полносвязной ИНС, при наличии входных данных, сформированных в виде двумерной табличной записи (2), применяются функции активации, возвращающие скалярную величину сигмоидального вида $ReLU$ и др. Многомерные функции активации задействованы во многих архитектурах: *Long Short Term Memory*, *Gated Recurrent Unit*, *Transformer*, а также в *Softmax* [20].

Отдельный полносвязный lc -й слой, состоящий из NCAL-нейронов, может быть записан в виде вектора-столбца матрицы, ассоциированный с полносвязной ИНС (NN , аббр. от англ. Neural Network):

$$NN(, lc) = \begin{pmatrix} AF_{1,lc}(net_{1,lc}) \\ AF_{2,lc}(net_{2,lc}) \\ \dots \\ AF_{NCAL_{lc},lc}(net_{NCAL_{lc},lc}) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $net_{ncal_{lc},lc} = \langle NN(, lc - 1), \overrightarrow{W}_{ncal_{lc},lc} \rangle + w_{смещ. ncal_{lc},lc}$, $ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}}$; $NCAL_{lc} \in NCAL_library$.

Скалярное произведение $\langle NN(, lc - 1), \overrightarrow{W}_{ncal_{lc},lc} \rangle$ выполняется между вектором-столбцом предыдущего слоя ИНС и вектором весовых коэффициентов синапсов, ассоциированных с определенным нейроном.

В результате матричная запись (7) полносвязной ИНС, состоящей из LC-слоев, может быть преобразована к выражению (8), где $net_{ncal_{lc},lc} = \langle NN(, lc - 1), \overrightarrow{W}_{ncal_{lc},lc} \rangle + w_{смещ. ncal_{lc},lc}$ – скалярное произведение между вектором, сформированным предыдущим слоем, и вектором весов, ассоциированным с вектором весом $ncal$ -го нейрона на lc -м слое, суммируемое со смещением $w_{смещ. ncal_{lc},lc}$; $AF_{ncal_{lc},lc}(net_{ncal_{lc},lc}) \in ActivationFunc$ – функция активации $ncal$ -го нейрона на lc -м слое; $lc = \overline{1, LC}$, $ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}}$; $NCAL_{lc} \in NCAL_library$:

$$NN = \begin{pmatrix} AF_{1,1}(net_{1,1}) & \dots & AF_{1,lc}(net_{1,lc}) & \dots & AF_{1,LC}(net_{1,LC}) \\ AF_{2,1}(net_{2,1}) & \dots & AF_{2,lc}(net_{2,lc}) & \dots & AF_{2,LC}(net_{2,LC}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ AF_{NCAL_{1,1}}(net_{NCAL_{1,1}}) & \dots & AF_{NCAL_{lc},lc}(net_{NCAL_{lc},lc}) & \dots & AF_{NCAL_{LC,LC}}(net_{NCAL_{LC,LC}}) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Заметим, что запись (8) описывает лишь архитектуру полносвязной ИНС. Анализ ассоциированных с (8) ее гиперпараметров будет приведен ниже.

На вход каждой функции активации подается вектор, формируемый предыдущим слоем ИНС – $NN(, lc - 1)$. Для первого слоя в качестве входных данных используется вектор-строка немаркированных данных – $\hat{A}(\hat{n},)$:

$$NN(, 1) = \begin{pmatrix} AF_{1,1}(\hat{A}(\hat{n},)) \\ AF_{2,1}(\hat{A}(\hat{n},)) \\ \dots \\ AF_{NCAL_{1,1}}(\hat{A}(\hat{n},)) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $net_{1,ncal_1} = \langle \hat{A}(\hat{n},), \vec{W}_{ncal_{1,lc}} \rangle + w_{смещ. ncal_{1,1}}$; $\hat{A}(\hat{n},)$ – строка экспериментальных данных, подаваемая на вход ИНС с целью ее дальнейшей классификации; $ncal_1 = \overline{1, NCAL_1}$; $NCAL_1 \in NCAL_library$.

Последний слой ИНС ассоциирован с метками классов; его размерность определяется максимально возможным одновременным количеством меток, ассоциированных с входными данными:

$$NN(, LC) = \begin{pmatrix} AF_{1,LC}(net_{1,LC}) \\ AF_{2,LC}(net_{2,LC}) \\ \dots \\ AF_{NCAL_{LC,LC}}(net_{NCAL_{LC,LC}}) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $net_{ncal_{LC,LC}} = \langle \hat{A}(\hat{n},), \vec{W}_{ncal_{LC,LC}} \rangle + w_{смещ. ncal_{LC,LC}}$; $\hat{A}(\hat{n},)$ – строка ЭД, подаваемая на вход в ИНС с целью ее дальнейшей классификации; $ncal_{LC} = \overline{1, NCAL_{LC}}$; $NCAL_{LC} \in NCAL_library$.

Слой (10) описывает степень принадлежности входного набора значений атрибутов КС $\hat{A}(\hat{n},)$ к каждому из классов. В качестве функции активации в последнем слое ИНС (10) выбирается функция принятия многозначных решений – точечно-множественная функция отображения. Поскольку в рассматриваемой задаче размер слоя определяется размерностью алфавита классовых меток $|S|$, соответственно, $NCAL_{LC} = |S|$. Многозначная реализация последнего слоя ИНС (10) может быть сведена к однозначному посредством сокращения количества нейронов в слое до одного:

$$NN(, LC) = (AF_{LC}(net_{LC})),$$

где $net_{LC} = \langle NN(, LC - 1), \vec{W}_{LC} \rangle + w_{смещ. LC}$.

В «классическом» случае многоклассовой или бинарной классификации, решение принимается путем голосования, например – по мажоритарному принципу (принципу большинства). Для подобных задач в целях вычисления веса каждого класса и последующего определения победителя по мажоритарному принципу ($\max(AF_{ncal_{LC,LC}}(net_{ncal_{LC,LC}}))$) актуально применение семейства функций активации типа *softmax*, которые возвращают вектор весов. Следовательно, результат работы последнего слоя ИНС (10), в общем случае, многозначен [21].

На практике, полносвязные ИНС (8) редко состоят из слоев одинакового размера. В задачах классификации ИНС обычно создают по аналогии с бутылочным горлышком, когда входной слой сети всегда наиболее широкий, в то время как скрытые слои «плавно» сужаются. Выходной слой равен либо одному нейрону (задача бинарной или многоклассовой классификации), либо мощности алфавита уникальных классов (задача многозначной классификации). Для учета несимметричных архитектур предлагается придерживаться правил записи треугольных матриц: заменять все отсутствующие нейроны нулями.

Приведем пример несимметричной записи полносвязной ИНС:

$$NN_{example} = \begin{pmatrix} AF_{1,1}(net_{1,1}) & AF_{1,2}(net_{1,2}) & AF_{1,3}(net_{1,3}) \\ AF_{2,1}(net_{2,1}) & AF_{2,2}(net_{2,2}) & 0 \\ AF_{3,1}(net_{3,1}) & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Извлечем из матричной записи полносвязной ИНС NN (8) веса θ , ассоциированные с каждым нейроном, с учетом того, что нейрон обладает несколькими синапсами.

Для учета веса смещения объединим вектор весов, ассоциированный с синапсами $\vec{W}_{ncal_{lc,lc}}$, и вес, ассоциированный с входом смещения $w_{смещ. ncal_{lc,lc}}$ в двойки $(\vec{W}_{ncal_{lc,lc}}, w_{смещ. ncal_{lc,lc}})$. Полученную в результате матричную запись представим в виде выражения (11), где $lc = \overline{1, LC}$; $ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}}$; $NCAL_{lc} \in NCAL_library$.

Опишем полносвязную ИНС, заданную архитектурой слоев и функций активации NN (8), матрицей весов θ (11) и набором гиперпараметров (Hyperparams) в виде выражения (12):

$$\theta = \begin{pmatrix} (\vec{W}_{1,1}, w_{смещ. 1,1}) & \dots & (\vec{W}_{1,lc}, w_{смещ. 1,lc}) & \dots & (\vec{W}_{1,LC}, w_{смещ. 1,LC}) \\ (\vec{W}_{2,1}, w_{смещ. 2,1}) & \dots & (\vec{W}_{2,lc}, w_{смещ. 2,lc}) & \dots & (\vec{W}_{2,LC}, w_{смещ. 2,LC}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\vec{W}_{NCAL_{1,1}}, w_{смещ. NCAL_{1,1}}) & \dots & (\vec{W}_{NCAL_{lc,lc}}, w_{смещ. NCAL_{lc,lc}}) & \dots & (\vec{W}_{NCAL_{LC,LC}}, w_{смещ. NCAL_{LC,LC}}) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{Full Neural Network}_{NN, \theta, \text{Hyperparams}}(\hat{A}(\hat{n},)) = set_{\hat{n}}. \quad (12)$$

Все три указанных объекта являются параметрами ИНС, достаточными для полного ее описания: архитектура NN (8) описывает структуру ИНС; матрица весов Θ (11) описывает правила преобразования входного вектора в выходной на каждом из узлов ИНС; гиперпараметры описывают начальные условия ИНС и правила ее обучения.

ИНС с ненулевым количеством нейронов способна к преобразованию информации. С этой целью ИНС принимает на вход немаркированную $\hat{n}$ -ю запись $\hat{A}(\hat{n},)$ из набора неразмеченных данных $\hat{D}_{\hat{N}M}$ и отображает ее в соответствующий набор классовых меток $set_{\hat{n}}$.

Полученная нейронная сеть описывается упорядоченным множеством слоев, каждый из которых состоит из $NCAL_{lc}$ -нейронов:

$$lc = \overline{1, LC}; ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}};$$

$$NCAL_{lc} \in NCAL_library.$$

Параметр $NCAL_library$ учитывает разницу в количестве нейронов в каждом слое ИНС. Визуализация ИНС приведена на рисунке 1.

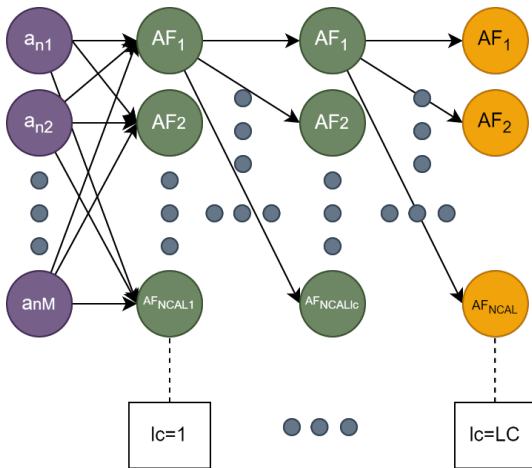


Рис. 1. Визуализация ИНС (12), с нанесенными на структуру матрицей нейронов (8)

Fig. 1. Visualization of ANN (12), with a Matrix of Neurons Applied to the Structure (8)

Гиперпараметрами ИНС, определяющими процесс ее обучения, являются: функция потерь $lossFunc$; связанная с ней функция оптимизации (весов ИНС) $optimizer$; количество эпох обучения $epoch$; количество разбиений исходных ЭД на пакеты $batchSize$.

Запишем четверку гиперпараметров как:

$$Hyperparams = (lossFunc, optimiser, epoch, batchSize). \quad (13)$$

Функция потерь $lossFunc \in LossFunc$ ассоциирована с множеством известных функций потерь (категориальная перекрестная энтропия, бинарная перекрестная энтропия и т. д. [22]). Функция оптимизации $optimiser \in OptF$ ассоциирована с множеством известных функций оптимизации (как правило, основанных на градиентном спуске [22], например – стохастический градиентный спуск, $adam$ и пр.).

Режим обучения ИНС

Режим обучения ИНС (12) представляет собой итерационное предъявление элементов множества размеченных ЭД (2) на вход нейронной сети с последующей корректировкой весов нейронов (11) по функции потерь $lossFunc \in LossFunc$. Количество итераций предъявления размеченных ЭД задается с помощью переменной «количество эпох» ($epoch$, сокр. ep). Минимизация функции потерь (обнаружение локального (глобального) минимума $lossFunc$) производится с помощью функции оптимизации $optimiser \in OptF$.

На каждой эпохе обучения ИНС каждая запись ЭД, ассоциированная с соответствующим набором меток $\{A(n,), set_n\}; m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}\}$, подается в качестве записи на вход ИНС (11). Результирующая метка, полученная на выходе ИНС $set_n^{predict}$ – сравнивается с истинной меткой set_n , после чего вычисляется потеря по известной функции $lossFunc$ и при помощи функции оптимизации $optimiser$ вычисляется изменение каждого веса ИНС.

Изменение весов на каждом шаге $n = \overline{1, N}$ на эпохе $ep, ep = \overline{1, epoch}$, может быть записано в виде выражения (14), где $lc = \overline{1, LC}; ncal_{lc} = \overline{1, NCAL_{lc}}; NCAL_{lc} \in NCAL_library; n = \overline{1, N}; ep = \overline{1, epoch}$.

Корректировка веса на шаге $n, n = \overline{1, N}$ на эпохе $ep, ep = \overline{1, epoch}$ производится путем сложения матрицы весов ИНС, вычисленной на предыдущем шаге $(n - 1)$, с корректировкой изменения каждого веса ИНС, вычисленной на текущем шаге для текущей записи ЭД представлено выражением (15).

$$\Delta\Theta_{n,ep} = \begin{pmatrix} (\Delta\vec{W}_{1,1}, \Delta w_{смещ. 1,1}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{1,lc}, \Delta w_{смещ. 1,lc}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{1,LC}, \Delta w_{смещ. 1,LC}) \\ (\Delta\vec{W}_{2,1}, \Delta w_{смещ. 2,1}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{2,lc}, \Delta w_{смещ. 2,lc}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{2,LC}, \Delta w_{смещ. 2,LC}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\Delta\vec{W}_{NCAL_{1,1}}, \Delta w_{смещ. NCAL_{1,1}}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{NCAL_{lc,lc}}, \Delta w_{смещ. NCAL_{lc,lc}}) & \dots & (\Delta\vec{W}_{NCAL_{LC,LC}}, \Delta w_{смещ. NCAL_{LC,LC}}) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

$$\Theta_{n,ep} = \Theta_{n-1,ep} + \Delta\Theta_{n,ep}. \quad (15)$$

Наиболее актуальной стратегией вычисления корректировки для каждого веса (14) является метод обратного распространения ошибки (*backpropagation*), который заключается в вычислении дифференциала функции ошибки *lossFunc* относительно весов $\vec{W}_{ncal_{ic},lc}$ – ИНС $d \text{ lossFunc} / d \vec{W}_{ncal_{ic},lc}$. Для корректной работы метода обратного распространения ошибки все функции активации в ИНС должны быть дифференцируемы.

Функция потерь коррелирована с метриками оценки качества классификации. Как правило, чем выше значение функции потерь, тем ниже значение метрики оценки точности – и наоборот. Поскольку ИНС с большим количеством параметров (весов синапсов) потребляет значительное количество вычислительных ресурсов, оценку эффективности решаемой задачи на этапах обучения и валидации выполняют посредством вычисления функции потерь и связанной с ней метрики оценки точности (*accuracy*, или A_m):

$$A_m = \frac{TP_m + TN_m}{TP_m + TN_m + FP_m + FN_m},$$

где m – это m -я классовая метка.

Оценка качества классификации нейронных сетей на этапе тестирования варьируется от задачи к задаче. Одним из наиболее популярных наборов метрик оценки качества многозначной классификации является основанный на Area Under Curve (AUC), площадью под Receiver Operating Characteristic (ROC).

В зависимости от методов вычисления AUC-метрики могут быть подразделены на «Один против одного» (OVO, аббр. от англ. One-vs-One) и на «один против всех» (OVE, аббр. от англ. One-vs-Everyone, или OVR, аббр. от англ. One-vs-Rest).

В каждом методе метрики могут быть вычислены тремя разными способами.

1) Micro – микроподход заключается в агрегации результатов классификации по каждому из M классовых меток отдельно по каждой метрике, после чего происходит вычисление итоговой метрики:

$$B_{\text{micro}} = B \left(\sum_{m=1}^M TP_m, \sum_{m=1}^M TN_m, \sum_{m=1}^M FP_m, \sum_{m=1}^M FN_m \right). \quad (16)$$

2) Macro – макроподход заключается в вычислении метрик для каждого из M классовых меток и взятия их среднего арифметического:

$$B_{\text{macro}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M B(TP_m, FP_m, TN_m, FN_m). \quad (17)$$

3) Weighted – взвешенный подход заключается в агрегации результатов классификации по каждо-

му из M классовых меток отдельно по каждой метрике. После агрегации вычисляется *accuracy* для каждой классовой метки. Каждая метрика – TP, FP, FN, TN – нормируется на *accuracy* и вычисляется итоговая метрика:

$$B_{\text{Weighted}} = B \left(\sum_{m=1}^M \frac{TP_m}{A_m}, \sum_{m=1}^M \frac{TN_m}{A_m}, \sum_{m=1}^M \frac{FP_m}{A_m}, \sum_{m=1}^M \frac{FN_m}{A_m} \right). \quad (18)$$

Рабочий режим ИНС

Соотношение (12) представляет собой итерационную подачу элементов множества неразмеченных ЭД на вход нейронной сети. Результатом является упорядоченное множество меток $Labels_{\hat{n}}$, полученное в ходе итерационного прохождения строк $\hat{A}(\hat{n})$ через ИНС: $Labels_{\hat{n}} = (set_{\hat{n}})$; $\hat{n} = 1, \bar{N}$.

Неразмеченные ЭД могут быть сформированы заранее или подаваться в потоковом режиме непосредственно с системных датчиков.

Отметим необходимость своевременной корректировки весов ИНС в рабочем режиме из-за влияния проблемы смены (дрейфа) концепта [23].

Многозначная классификация с помощью ИНС с множественным выходом

Эффективность функционирования ИНС связана, как правило, с удалением части связей между слоями (называемыми также *dropout* [24]), регуляризацией и нормировкой весовых коэффициентов на этапе обучения (15) [25], упрощением функций активации на уровне скрытых слоев [26].

Одной из главных проблем при использовании полносвязных ИНС в задачах многозначного анализа (классификация, прогнозирование) является неэффективное использование функции *softmax* в качестве функций выходного слоя. Функция *softmax* формирует нормированный выходной вектор, сумма элементов которого равна единице. При устремлении размерности классовых меток (совкупности состояний КС, ассоциированных с вторичными атрибутами и меток, ассоциированных с компьютерной атакой) в бесконечность, максимальное значение элемента такого нормированного вектора стремится к нулю. Данная проблема приводит к необходимости разработки дополнительного блока голосования, способного принимать решение о количестве классов, ассоциированных с таким вектором, превысивших некоторый порог принятия решения. При этом, поскольку количество классовых меток, потенциально ассоциированных с одной записью ЭД, ограничено только алфавитом, создание блока голосования является нетривиальной задачей. Без использования блока голосования (например, при попытке обойтись округлением в большую сторону), может

возникать проблема отказа от классификации для ряда записей в ЭД, как это иллюстрируется на рисунке 2.

Наиболее простым способом решения подобной проблемы принятия решений является ввод на последнем слое ИНС функции активации, не нормирующей выходной сигнал. В качестве такой функции может использоваться, например, сигмоидальная функция активации.

Поскольку решается задача многозначной классификации, обобщающая способность ИНС может быть повышена также за счет внедрения многозначности в сеть на структурном уровне. Под обобщающей способностью ИНС понимается эффективность решения задачи классификации на

наборе данных, отсутствующем в обучающей выборке.

Модификация ИНС позволяет распараллеливать обработку информации по каждому целевому не только на уровне последнего слоя, но и на уровне скрытых слоев. Таким образом, начиная с последнего общего скрытого слоя, ИНС разбивается «на не связанные между собой ветви». «Ветви» могут интерпретироваться как отдельные полносвязные ИНС с отдельным выходом (рисунок 3). Подобные ИНС получили наименование «ИНС с множественным выходом» (многозначным выходом) [27, 28].

На этапе обучения ИНС с множественным выходом, при обратном распространении ошибки, градиент вычисляется независимо для каждой ветви вплоть до общих полносвязных слоев.

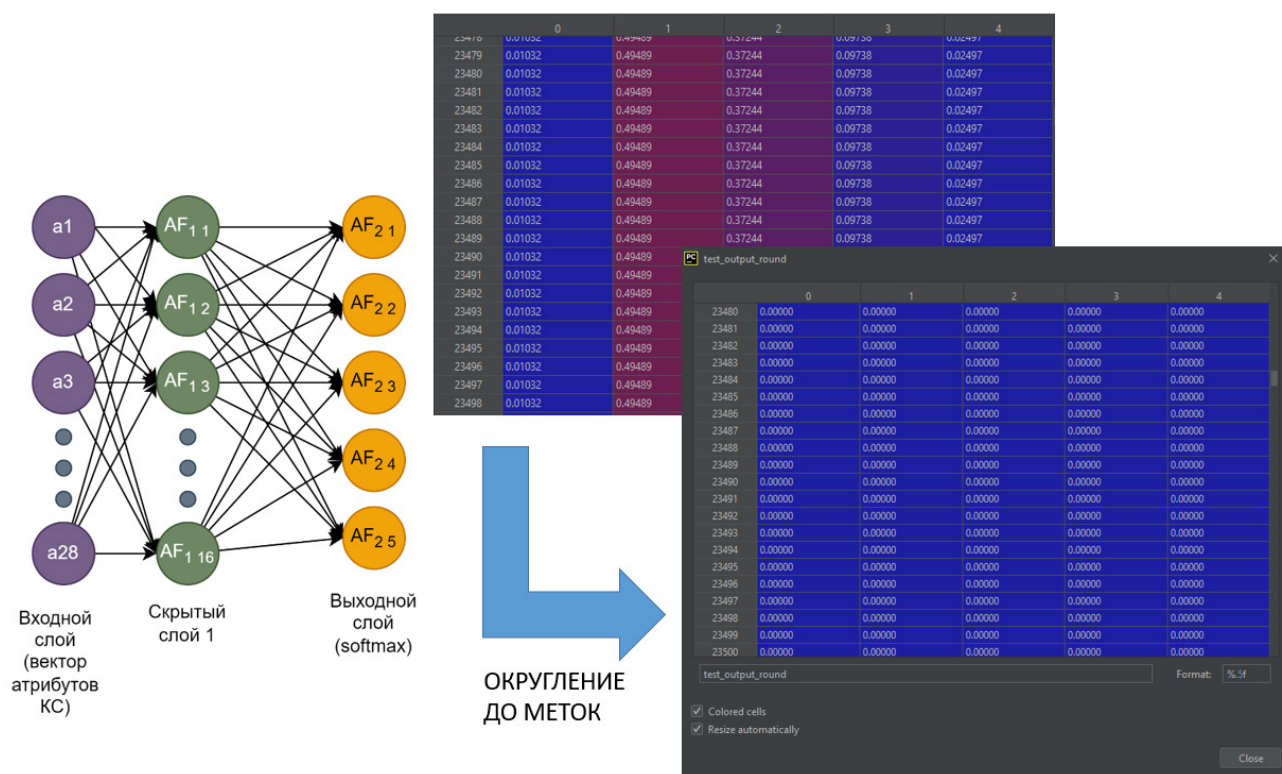


Рис. 2. Проблема принятия решений при использовании функции активации *softmax*

Fig. 2. Decision Problem When Using the Softmax Activation Function

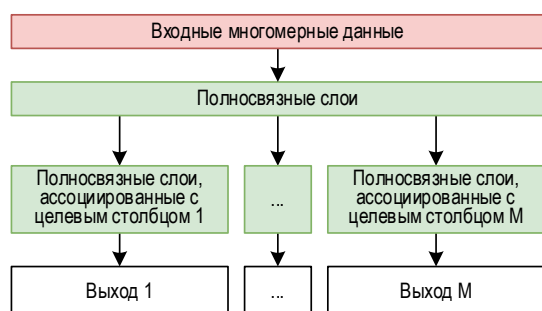


Рис. 3. Структура ИНС с множественным выходом

Fig. 3. Structure of ANN with Multiple Output

Иным подходом к повышению обобщающей способности может стать архитектура, аналогичная представленной на рисунке 3, но без общих полносвязных слоев. В результате каждая отдельная ИНС может быть представлена в виде бинарного классификатора по определенной классовой метке. Ансамбль таких бинарных классификаторов может быть сконфигурирован для решения задачи многозначной классификации (беггинговый метод классификации). Повышение качества классификации может быть достигнуто за счет установки модуля принятия решений, управляю-

щего обучением каждого бинарного классификатора (бустинговый метод классификации). Известны работы по созданию подобных бустинговых классификаторов из ансамбля полносвязных ИНС по принципу Random Forest [29].

Дополнительное повышение эффективности классификации может быть достигнуто за счет использования специальных подходов к обработке данных внутри ИНС таких как свертка, LSTM-блоки, блоки внимания и т. д.

Разработанная архитектура ИНС с множественным выходом базируется на структуре, изображенной на рисунке 3, и позволяет учитывать многозначность ЭД за счет использования общего полносвязного слоя.

Апробация разработанной архитектуры ИНС с множественным выходом на ЭД, содержащих компьютерную атаку

Оценка эффективности предложенного алгоритма и разработанной архитектуры ИНС с множественным выходом была проведена на примере ЭД, собранных в работах [30, 31]. Для обнаружения компьютерных атак с использованием ИНС в [32] разработан фреймворк *Kitsune*, а также предложен способ предобработки «сырых» ЭД в многомерную обезличенную табличную структуру с атрибутами метрического типа.

На рисунке 4 изображена топология КС IoT [32] для сбора данных, а также векторы, поясняющие происхождение атак. Захват сетевого трафика производился на маршрутизаторе в точках, указанных на рисунке цифрами. В каждом наборе данных первый миллион пакетов представлял собой чистый сетевой трафик, пакеты с номером миллион и выше содержали определенную компьютерную атаку.

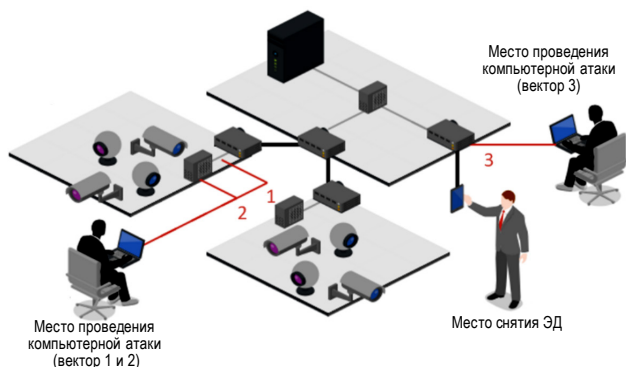


Рис. 4. Топология исследуемой сетевой инфраструктуры [32]
Fig. 4. Topology of the Analyzed Network Infrastructure [32]

При сборе информации с КС необработанные, «сырые» данные, поступающие с перечня устройств, захватывались в виде пакетов. Каждый пакет ассоциировался с временной меткой и рядом категориальных атрибутов таких как: MAC-

адрес, IP-адрес, порты назначения и отправки и т. д. Преобразование пакетов в многомерные метрические векторы осуществлялось с использованием метода демпфированной инкрементной статистики, ДИС (DIS, *аббр. от англ.* Damped Incremental Statistics) [33].

ДИС ассоциировалось с параметром $\lambda > 0$, а также с тройкой $IS_\lambda = (\omega, LS, SS)$, где ω – число, линейная сумма и сумма квадратов пакетов, занесенных в инкрементную статистику. Каждая инкрементная статистика связана с потоками данных, определяемыми связкой MAC-адреса, IP-адресами, портами стека протоколов TCP/IP и четырьмя типами данных:

- IP отправителя (*srcIP*);
- MAC-адрес отправителя (*srcMAC*), включая пару (*srcMAC, srcIP*), ассоциированную с отправителем;
- информация, ассоциированная с каналом передачи данных – пара IP-адресов отправителя – получателя (*srcIP, dstIP*);
- сокет, ассоциированный с каналом передачи данных – в виде четверки: IP-адрес отправителя, порт отправителя, IP-адрес получателя, порт получателя (*srcIP, srcPort, dstIP, dstPort*).

Каждый новый пакет, поступающий на вход ДИС, обновлял статистику по правилам:

$$\gamma = 2^{-\lambda(t-t_{last})}; \quad \Delta IS_\lambda = (\gamma\omega + 1, \gamma LS + x, \gamma SS + x^2),$$

где t_{last} – отметка времени поступившего пакета, ассоциированного с потоком статистики; ΔIS_λ – приращение инкрементной статистики; параметр λ определяет интенсивность затухания статистики во времени.

Из инкрементной статистики был получен ряд одномерных и двумерных статистик, приведенных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Одномерные и двумерные статистики, выведенные с помощью ДИС

TABLE 1. Univariate and Bivariate Statistics Derived Using DIS

Размерность статистики	Наименование	Формула
Одномерная	Вес (ω)	ω
	Среднее (μ)	LS/ω
	Отклонение (σ)	$\sqrt{SS/\omega - \mu^2}$
Двумерная	Размер (O)	$\sqrt{\mu_i^2 - \mu_j^2}$
	Радиус (R)	$\sqrt{\sigma_i^4 - \sigma_j^4}$
	Ковариация ($Cov_{i,j}$)	$R_{i,j}/(\omega_i + \omega_j)$
	Коэффициент корреляции ($P_{i,j}$)	$Cov_{i,j}/(\sigma_i + \sigma_j)$

В [32] предложено использовать все статистики, представленные в таблице 1, для пяти значений λ : 5; 3; 1; 0,1; 0,01, что позволило сформировать после предобработки 115 атрибутов.

Поскольку наборы данных, сформированные для каждой из компьютерных атак, различны между собой по количеству пакетов, каждой атаке ставится в соответствие две .csv таблицы: таблица, ассоциированная с обезличенными ЭД (размерностью 115 атрибутов), и таблица, ассоциированная с целевым столбцом – бинарной классовой меткой о проведении (отсутствии) компьютерной атаки.

Размерности ЭД для каждого типа атаки существенно различаются. Наименьший объем данных ассоциировался с набором типа «Mirai» (компьютерная атака, направленная на заражения сети интернета вещей вредоносным программным обеспечением) – всего 750 тыс. записей. Наибольший объем был зафиксирован у атак типа «отказ в обслуживании» и «SSL Renegotiation» – более 6 млн пакетов.

Для апробации разработанного алгоритма из всего множества наборов данных был выбран набор, соответствующий атаке «OS Scan», содержащий ~1,6 млн записей ЭД.

Предобработка ЭД для формирования многозначного набора классowych меток

Эксперимент подразумевал разделение входных данных на первичные и вторичные атрибуты КС. Поскольку истинное назначение каждого из 115 атрибутов ЭД неизвестно, их разделение производилось по следующему алгоритму.

Шаг 1. Весь набор данных по каждому атрибуту оценивался по совокупной информационной (индекс Джини, ...) и статистической значимости атрибутов ЭД (важности атрибутов [6]) по отношению к целевому столбцу бинарных классowych меток, сигнализирующих о наличии (отсутствии) атаки типа «OS Scan».

Шаг 2. Внутри каждой группы полученных метрик производилась нормировка с целью получения оценок в диапазоне от 0 до 1. Группой считается группа метрик, вычисленная в рамках одного метода.

Шаг 3. Оценки, ассоциированные с каждой группой метрик, усреднялись.

Шаг 4. Атрибуты ЭД ранжировались по убыванию усредненной метрики оценки важности.

Шаг 5. Атрибуты ЭД, имевшие усредненную важность менее 0,1 – считались не влияющими на целевой столбец и выносились в множество вторичных атрибутов.

Шаг 6. Для вторичных атрибутов, полученных на шаге 5, по каждому атрибуту рассчитывалось среднеквадратическое отклонение.

Шаг 7. Для каждого вторичного атрибута формировался дополнительный целевой столбец классowych меток, полученных по правилу «если значение вторичного атрибута превышает среднеквадратическое отклонение – считать запись ЭД аномальной по данному атрибуту».

Шаг 8. Вторичные атрибуты исключались из ЭД с сохранением ассоциированных с ними классowych меток.

После выполнения приведенных восьми шагов ЭД содержат: первичные атрибуты, имеющие статистическую и информационную взаимосвязь с целевым столбцом, ассоциированным с компьютерной атакой «OS Scan»; целевой столбец, ассоциированный с компьютерной атакой «OS Scan»; целевые столбцы, ассоциированные с вторичными атрибутами, не имеющие прямой (линейной) взаимосвязи ни с одним из первичных атрибутов ЭД.

Полученная таким образом каждая запись ЭД обладает множеством классowych меток, а сами записи являются многозначными.

Результат выполнения шагов 1–5 отражен на гистограмме (рисунок 5). По оси абсцисс отложены наименования атрибутов; по оси ординат – усредненные оценки важности соответствующих атрибутов. Пороговой линией отсечены атрибуты, не превышающие порог, введенный на шаге 5. Для удобства последующего анализа, каждый атрибут помечен идентификатором согласно шаблону «сХХ», где ХХ – номер атрибута в ЭД Kitsune [32].

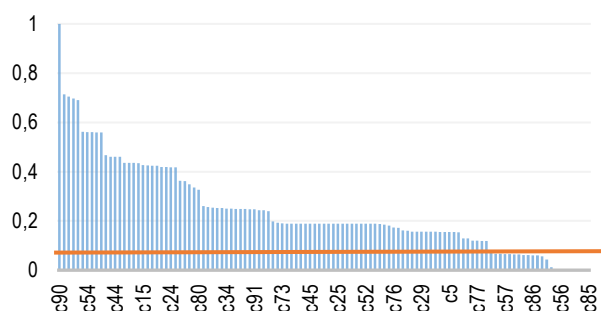


Рис. 5. Гистограмма распределения важности атрибутов ЭД с порогом отсеки

Fig. 5. Distribution Histogram of the Importance of Experimental Data Attributes With a Cutoff Threshold

Анализ гистограммы показывает, что при установленном пороге важности вторичными атрибутами являются 22. Их углубленный анализ показал, что не все атрибуты корректно использовать для порождения дополнительных классowych меток. По итогам исследования было сформировано 20 вторичных атрибутов ЭД и 95 первичных:

$$A_{\text{experiment}} = (A_{\text{втор } 1}, A_{\text{втор } 2}, \dots, A_{\text{втор } 20}) \cup (A_{\text{перв } 1}, A_{\text{перв } 22}, \dots, A_{\text{перв } 95}).$$

Для каждого вторичного атрибута формировался дополнительный целевой столбец классowych меток, полученных по правилу: «если значение вторичного атрибута превышает среднеквадратическое отклонение – считать запись ЭД аномальной по данному атрибуту». Согласно шагу 8, вторичные атрибуты исключались из ЭД с сохранением ассоциированных с ними классowych меток.

С помощью библиотеки *skikit-learn* [34] входные ЭД были предобработаны (стандартизированы) путем приведения их к единичной дисперсии и нулевому среднему. Пропорция разделения ЭД была выбрана следующей: 45 % ассоциировано с обучающей выборкой; 22 % – с валидационной выборкой; 33 % – с тестовой выборкой. Поскольку часть классовых меток, включая метку об атаке *OS Scan*, встречается достаточно редко, ЭД дополнительно перемешивались. Отметим, что результирующее количество классовых меток обработанных ЭД, равно 21: 20 ассоциированы с вторичными атрибутами и 1 – с наличием (отсутствием) компьютерной атаки типа «*OS Scan*».

Детализация структуры, разработанной ИНС с множественным выходом

Архитектура разработанной ИНС с множественным выходом соответствует структуре, представленной на рисунке 3 с ограничениями, накладываемыми доступными вычислительными средствами. Поскольку вторичные атрибуты ЭД исключались из ЭД с сохранением ассоциированных с ними классовых меток, а результирующее количество классовых меток, обработанных ЭД, равно 21; мощность

алфавита всех возможных классовых меток S (4) также равна 21:

$$S = \bigcup_{n=1}^N set_n = \{s_{a_{90}}, s_{a_{83}}, \dots, s_{a_{85}}\} \cup \{s_{attack}\} = 21.$$

Таким образом, для возможности анализа многозначного множества из 21 классовой метки необходимо сформировать ИНС с 21 выходом. Для учета взаимосвязи между метками необходимо задание общего слоя. Детализируем разработанную архитектуру. Для учета каждой «ветви» зададим структурную матрицу NN (8) в виде множества матрица $NN^{(tree)}$, где $(tree)$ – идентификатор участка ИНС. В соответствии с условиями, всего число таких участков в данной задаче равно 22: участок, ассоциированный с общим слоем, и 21 участок, ассоциированный с ветвями ИНС.

Детализация разработанной ИНС имеет вид:

$$NN_{multioutput} = (NN^{(1)}, NN^{(2)}, \dots, NN^{(22)}).$$

Конфигурация ИНС формировалась с учетом особенностей, используемых в дальнейшем программных библиотек, имеющихся аппаратных вычислительных ресурсов и временных ограничений.

Итоговая конфигурация имеет вид:

$$\begin{aligned} Hyperparams^{multioutput} &= (lossFunc, optimiser, epoch, batchSize), \\ optimiser &= Adam; lossFunc = lossFunc_{BCE}; epoch = 10; \\ batchSize &= 512. \end{aligned}$$

В качестве функции потерь для каждой ветви ИНС была выбрана бинарная перекрестная энтропия (*binary crossentropy*), а в качестве метрики оценки эффективности классификации на этапах обучения и валидации – метрика *accuracy*.

Выбор оптимальной эпохи обучения проводился с помощью разведочного обучения ИНС и анализа ландшафта функции потерь, а также соответствующей метрики. Диапазон изменения эпох для данной конфигурации был выбран в интервале 1–10.

Рассмотрим структуру первого слоя разработанной ИНС. Исследования показали, что наиболее эффективным по времени обучения и по выходным метрикам оценки качества классификации, с учетом метода обратного распространения ошибки, является задание функции активации типа *ReLU* с 64 нейронами:

$$NN^{(1)} = \begin{pmatrix} AF_1^{ReLU}(net_1) \\ AF_2^{ReLU}(net_2) \\ \dots \\ AF_{64}^{ReLU}(net_{64}) \end{pmatrix},$$

$$\text{где } AF_{lc}^{ReLU}(net_{lc}) = \begin{cases} net_{lc}, & net_{lc} > 0 \\ 0, & net_{lc} \leq 0 \end{cases}.$$

Количество нейронов обусловлено вычислительными возможностями оборудования для проведения экспериментов и разумной достаточностью ширины слоя для большего числа ЭД [35].

Опишем *tree*-ю ветвь ИНС, $tree = \overline{2, N}$. Каждая ветвь состоит из семи слоев. Ветвь логически поделена на три зоны: первая и вторая подобны и состоят из тройки вида «полносвязный слой с функцией активации *ReLU* – слой нормализации – слой *dropout*».

Приведем запись первой тройки:

$$NN^{(tree)}(,1) = \begin{pmatrix} AF_{1,1}^{ReLU}(net_{1,1}) \\ AF_{2,1}^{ReLU}(net_{2,1}) \\ \dots \\ AF_{32,1}^{ReLU}(net_{32,1}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,2) = \begin{pmatrix} AF_{1,2}^{norm}(net_{1,2}) \\ AF_{2,2}^{norm}(net_{2,2}) \\ \dots \\ AF_{32,2}^{norm}(net_{32,2}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,3) = \begin{pmatrix} AF_{1,3}^{dropout}(net_{1,3}) \\ AF_{2,3}^{dropout}(net_{2,3}) \\ \dots \\ AF_{32,3}^{dropout}(net_{32,3}) \end{pmatrix}.$$

Для снижения влияния проблемы «затухающего градиента» [36], в качестве функции активации полносвязного слоя $NN^{(tree)}(,1)$ задана функция типа $ReLU$ с 32 нейронами. Слои нормализации и слои dropout выбраны одинаковой размерности, равной 32 нейронам.

Опишем вторую тройку слоев:

$$NN^{(tree)}(,4) = \begin{pmatrix} AF_{1,4}^{ReLU}(net_{1,4}) \\ AF_{2,4}^{ReLU}(net_{2,4}) \\ \dots \\ AF_{16,4}^{ReLU}(net_{16,4}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,5) = \begin{pmatrix} AF_{1,5}^{norm}(net_{1,5}) \\ AF_{2,5}^{norm}(net_{2,5}) \\ \dots \\ AF_{16,5}^{norm}(net_{16,5}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,6) = \begin{pmatrix} AF_{1,6}^{dropout}(net_{1,6}) \\ AF_{2,6}^{dropout}(net_{2,6}) \\ \dots \\ AF_{16,6}^{dropout}(net_{16,6}) \end{pmatrix}.$$

Как видно, количество нейронов, ассоциированных со второй тройкой, снижено до 16. Вторая тройка слоев необходима для «плавного» принятия решения присвоении $tree$ -й метки класса. Проходя через слои размерностей 64, 32 и 16, входной вектор несколько раз преобразуется («кодируется»), до тех пор, пока не поступит на вход к последнему, седьмому, слою $tree$ -й ветви.

Второй и пятый слои $tree$ -й ветви ИНС состоят из слоя нормализации – специализированной функции, приводящей каждый элемент входного вектора к нулевому математическому ожиданию и единичной дисперсии.

Третий и шестые слои $tree$ -й ветви ИНС состоят из функции «обнуления» части значений входного вектора. В результате часть связей между соседними слоями обрывается, что приводит к улучшению обобщающей способности ИНС и ускорению обучения. Как правило, количество удаляемых связей между нейронами устанавливается в виде доли в диапазоне от 0 (все связи остаются неизменными) до 1 (все связи между слоями обнуляются). Для разработанной архитектуры доля удаляемых связей для $NN^{(tree)}(,3)$ выбрана 0,25 (25 % всех связей удаляется) и для $NN^{(tree)}(,6)$ – выбрана равной 0,15.

Выход каждой ветви оканчивается полносвязным слоем, состоящим из одного нейрона с сигмоидальной функцией активации $NN^{(tree)}(,7) = (AF_{1,7}^{sigm}(net_{1,7}))$.

Выбор сигмоидальной функции активации обусловлен постановкой задачи: каждая ветвь должна

возвращать бинарную метку класса – 0 (метка, ассоциированная с ветвью – отсутствует) или 1 (метка, ассоциированная с ветвью – присутствует). Сигмоидальная функция активации подходит для решения задачи бинарной классификации (в контексте $tree$ -й ветви ИНС).

Визуализируем разработанную архитектуру ИНС с множественным выходом (рисунок 6). Размерность входного атрибутного пространства ЭД соответствует $|A_{\text{experiment}}| = 95$; количество ветвей ИНС – количеству классовых меток $|S_{\text{experiment}}| = 21$.

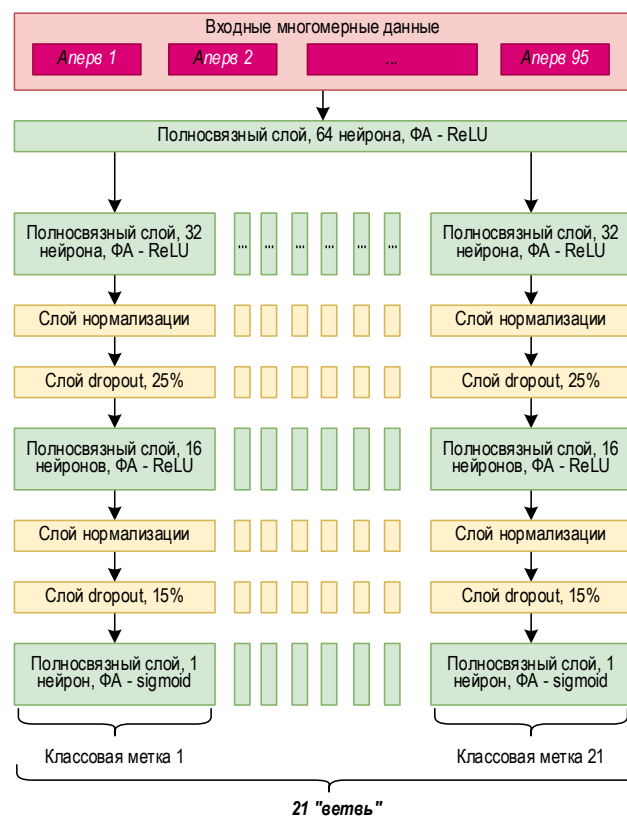


Рис. 6. Визуализация разработанной архитектуры ИНС с множественным выходом

Fig 6. Visualization of the Developed ANN Architecture with Multiple Outputs

Анализ результатов

Результаты работы разработанной архитектуры ИНС, полученные в результате эксперимента, оценивались на тестовой выборке по группе метрик оценки качества классификации, приведенных в таблице 2, для каждой из исследуемых эпох обучения (диапазон измерения – от 1 до 10).

Анализ полученных результатов позволяет судить о высокой скорости обучения разработанной ИНС. За 10 эпох метрика *accuracy* достигла значения ~0,999, как и остальные метрики оценки качества классификации. При этом наблюдается нелинейная зависимость эффективности классификации по приведенным метрикам.

ТАБЛИЦА 2. Результаты многозначной классификации по 21 классовой метке для ИНС с множественным выводом (тестовая выборка)

TABLE 2. Results of Multi-Label Classification by 21 Class Labels for ANNs with Multiple Output (Test Set)

Эпоха	accuracy	precision			recall			f1			ROC_AUC		
		micro	macro	weighted	micro	macro	weighted	micro	macro	weighted	OVO_micro	OVO_macro	OVO_weighted
1	0,9534	0,9937	0,9716	0,9960	0,9998	0,9996	0,9998	0,9968	0,9817	0,9975	0,9979	0,9984	0,9995
2	0,9589	0,9986	0,9750	0,9972	0,9962	0,9619	0,9962	0,9974	0,9655	0,9964	0,9976	0,9806	0,9979
3	0,9603	0,9998	0,9710	0,9970	0,9952	0,9523	0,9952	0,9975	0,9521	0,9952	0,9976	0,9761	0,9975
4	0,9597	0,9998	0,9705	0,9969	0,9952	0,9523	0,9952	0,9975	0,9522	0,9952	0,9975	0,9761	0,9975
5	0,9597	0,9999	0,9761	0,9976	0,9950	0,9521	0,9950	0,9975	0,9522	0,9952	0,9975	0,9760	0,9975
6	0,9603	0,9999	0,9729	0,9973	0,9952	0,9523	0,9952	0,9975	0,9523	0,9952	0,9975	0,9761	0,9975
7	0,9603	0,9998	0,9773	0,9976	0,9953	0,9524	0,9953	0,9975	0,9523	0,9952	0,9976	0,9761	0,9976
8	0,9608	0,9999	0,9911	0,9990	0,9953	0,9524	0,9953	0,9976	0,9525	0,9953	0,9976	0,9762	0,9976
9	0,9608	0,9999	0,9916	0,9991	0,9953	0,9524	0,9953	0,9976	0,9525	0,9953	0,9976	0,9762	0,9976
10	0,9990	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9995	0,9999	0,9999	0,9997	0,9999	0,9999	0,9997	0,9999

Рассмотрим на примере метрик *accuracy*, *AUC_{OVO} micro*, *AUC_{OVO} macro*, *AUC_{OVO} weighted* (рисунок 7).

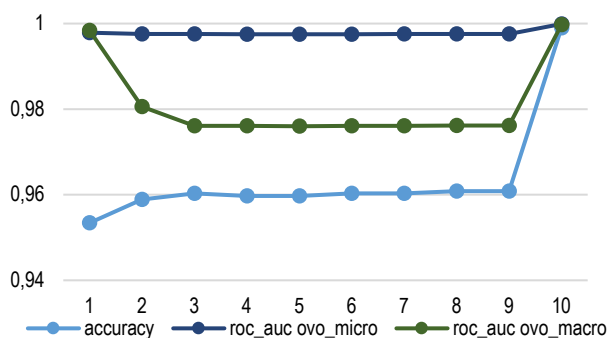


Рис. 7. Сравнение эффективности классификации по метрикам *accuracy*, *AUC_{OVO} micro*, *AUC_{OVO} macro*, *AUC_{OVO} weighted* для 10 эпох обучения разработанной ИНС

Fig. 7. Comparison of Classification Efficiency by Metrics *Accuracy*, *AUC_{OVO} micro*, *AUC_{OVO} macro*, *AUC_{OVO} weighted* for 10 Epochs of Training Developed by ANN

На промежутке от 1 до 9 эпохи наблюдалось плато эффективности классификации. Прирост по анализируемой метрике составил ~0,01. Вероятная причина столь малого прироста в эффективности классификации обусловлена корректировкой весовых коэффициентов ИНС в сторону минимума (локального или глобального) функции потерь. Наконец, на 10-й эпохе, веса ИНС скорректировались достаточно для корректной классификации почти всех записей ЭД, ассоциированных с тестовой выборкой.

Сравнительный анализ результатов многозначной классификации компьютерных атак разработанной архитектуры ИНС с множественным выходом

Сравним разработанную архитектуру ИНС с множественным выходом с известными аналога-

ми и результатами, достигнутыми в [32]. Там же были рассмотрены известные алгоритмы обучения без учителя, базирующиеся на принципе обнаружения выбросов в многомерных данных: *Isolation Forests (IF)* и *Gaussian Mixture Models (GMM)*, инкрементная реализация *GMM*, *pcStream2*.

Оценка эффективности обнаружения компьютерной атаки оценивалась по ряду метрик: *True Positive Rate (TPR)*, *False Negative Rate (FNR)*, *AUC*, *Equal Error Rate (EER)*. Для сравнения результатов, полученных с помощью разработанной ИНС с множественным выходом с результатами работы [32], выбрана метрика *AUC*.

Сравнение результатов классификации, полученных с использованием разработанной ИНС с известными аналогами, осуществлялось для двух сценариев. В первом сценарии ЭД поступают на вход ИНС без разделения на первичные и вторичные атрибуты. Для обучения ИНС использовано исходное атрибутное пространство размерностью $M = 115$. В качестве целевого столбца использована только информация о наличии (отсутствии) атаки типа «OS Scan». Таким образом, выполнялась бинарная классификация.

Второй сценарий подразумевал предобработку ЭД согласно алгоритму:

$$A_{\text{experiment}} = (A_{\text{втор } 1}, A_{\text{втор } 2}, \dots, A_{\text{втор } 20}) \cup (A_{\text{перв } 1}, A_{\text{перв } 22}, \dots, A_{\text{перв } 95}).$$

В случае второго сценария ЭД являлись многозначными, поскольку каждой записи соответствовала 21 классовой метка. Полученные результаты двух сценариев использования ИНС и данные известных аналогов по метрике *AUC* представлены в таблице 3. Первые 7 записей ассоциированы с известными решениями [32]: *Suricata*, *Iso. Forest*, *GMM*, Инкрементная реализация *GMM*, *pcStream*, *Kitsune*

($m = 10$), *Kitsune* ($m = 1$). Позиции № 8 и 9 получены с помощью разработанной архитектурой ИНС с множественным выходом. Позиция № 8 связана с первым сценарием использования ИНС, соответствующем бинарной классификации (обнаружением) компьютерной атаки. Позиция № 9 соответствует результатам со сценарием многозначной классификации.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительный анализ эффективности обнаружения компьютерной атаки типа «OS Scan», разработанной ИНС для разных алгоритмов

TABLE 3. Comparative Analysis of the Effectiveness of Detecting a Computer Attack Such as OS Scan Developed by ANN for Different Algorithms

№ п/п	Наименование алгоритма	AUC
1	Suricata	0,5000
2	Iso. Forest	0,9070
3	GMM	0,9493
4	Инкрементная реализация GMM	0,9469
5	pcStream	0,7419
6	Kitsune ($m=10$)	0,9481
7	Kitsune ($m=1$)	0,9481
8	ИНС с множественным выходом (только компьютерная атака)	0,9995
9	ИНС с множественным выходом (многозначный режим работы)	0,9999

Анализ данных, приведенных в таблице 3, показывает, что предложенная архитектура ИНС с множественным выходом доминирует над остальными алгоритмами, достигая наибольшей точности классификации. В случае бинарной классификации (атрибутное пространство размерностью $M = 115$) выигрыш составляет 5,2 % по сравнению с наибольшей достигнутой точностью алгоритма *GMM*. При многозначной классификации выигрыш составляет 5,4 %. В обоих случаях выигрыш может быть объяснен преимуществами предложенной архитектуры ИНС с множественным выходом.

Выигрыш многозначной реализации обуславливается наличием дополнительных «ветвей» в ИНС, и возникающих нелинейных взаимосвязей между первым (общим) слоем $NN^{(1)}$ и первой тройкой каждой *tree*-й ветви:

$$NN^{(tree)}(,1) = \begin{pmatrix} AF_{1,1}^{ReLU}(net_{1,1}) \\ AF_{2,1}^{ReLU}(net_{2,1}) \\ \dots \\ AF_{32,1}^{ReLU}(net_{32,1}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,2) = \begin{pmatrix} AF_{1,2}^{norm}(net_{1,2}) \\ AF_{2,2}^{norm}(net_{2,2}) \\ \dots \\ AF_{32,2}^{norm}(net_{32,2}) \end{pmatrix},$$

$$NN^{(tree)}(,3) = \begin{pmatrix} AF_{1,3}^{dropout}(net_{1,3}) \\ AF_{2,3}^{dropout}(net_{2,3}) \\ \dots \\ AF_{32,3}^{dropout}(net_{32,3}) \end{pmatrix}.$$

Достоинствами предложенной архитектуры ИНС являются учет многозначных закономерностей между классовыми метками на этапе обучения за счет использования общего первого слоя, масштабируемость к любому числу классовых меток, высокая обобщающая способность ИНС и быстрая сходимость.

Среди недостатков предложенной архитектуры стоит отметить значительное потребление временных и вычислительных ресурсов на этапе обучения ИНС при большом количестве ветвей. Предложенная архитектура создана с использованием библиотеки *Keras*. Потенциальным решением проблемы высоких вычислительных затрат может стать смена библиотеки с *Keras* на *Pytorch*.

Заключение

Формализация ИНС в терминах матричной алгебры позволяет учитывать случай многозначной классификации. Достоинством предложенной формализации является лаконичность ряда записей, ассоциированных с рабочим режимом работы ИНС и режимом обучения.

Предложенный ансамблевый алгоритм оценки статистической и информационной значимости атрибутов ЭД в контексте одномерного целевого столбца позволяет обнаруживать как наиболее значимые атрибуты ЭД, так и ряд независимых от целевого столбца атрибутов.

Предложенная архитектура ИНС с множественным выходом позволяет решать задачи обнаружения и классификации многозначных компьютерных атак в среднем на 5 % эффективнее известных аналогов. Повышение эффективности обусловлено учетом многозначных закономерностей между классовыми метками на этапе обучения за счет использования общего первого слоя.

Достоинствами предложенной архитектуры ИНС является масштабируемость к любому числу классовых меток, высокая обобщающая способность ИНС и быстрая сходимость. В тоже время высокие затраты временных и вычислительных ресурсов можно устранить путем оптимизации программного кода или использования иных программных библиотек.

Список источников

1. Большаков А.С. Губанкова Е.В. Обнаружение аномалий в компьютерных сетях с использованием методов машинного обучения // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 1. С. 37–42.
2. Sheluhin O.I., Rakovskiy D.I. Multi-Label Learning in Computer Networks // Proceedings of the Conference at 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (Moscow, Russian Federation, 14–16 March 2023). IEEE, 2023. DOI:10.1109/IEEECONF56737.2023.10092157
3. Чечулин А.А. Проблемы сбора корректной и непротиворечивой информации о состоянии компьютерной сети // Информатизация и связь. 2023. № 1. С. 91–94. DOI:10.34219/2078-8320-2023-14-1-91-94
4. Шелухин О.И., Раковский Д.И. Прогнозирование профиля функционирования компьютерной системы на основе многозначных закономерностей // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 6(52). С. 53–70. DOI:10.21681/2311-3456-2022-6-53-70
5. Sheluhin O.I., Osin A.V., Rakovsky D.I. New Algorithm for Predicting the States of a Computer Network Using Multi-valued Dependencies // Automatic Control and Computer Sciences. 2023. Vol. 57. Iss. 1. PP. 48–60. DOI:10.3103/S0146411623010091
6. Rakovskiy D.I. Analysis of the problem of multivalued of class labels on the security of computer networks» // Synchroinfo journal. 2022. Iss. 6. PP. 10–17. DOI:10.36724/2664-066X-2022-8-6-10-17
7. Васильев В.И., Вульфен А.М., Гвоздев В.Е., Картак В.М., Атарская Е.А. Обеспечение информационной безопасности киберфизических объектов на основе прогнозирования и обнаружения аномалий их состояния // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 90–119. DOI:10.24412/2410-9916-2021-6-90-119
8. Sheluhin O.I., Barkov V.V., Sekretarev S.A. The online classification of the mobile applications traffic using data mining techniques // T-Comm. 2019. Т. 13. № 10. С. 60–67. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10317
9. Шелухин О.И., Барков В.В., Полковников М.В. Классификация зашифрованного трафика мобильных приложений методом машинного обучения // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 4(28). С. 21–28. DOI:10.21681/2311-3456-2018-4-21-28
10. Ismailov V.E. A three layer neural network can represent any multivariate function // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2023. Vol. 523. Iss. 1. P. 127096. DOI:10.1016/j.jmaa.2023.127096
11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., et al. Attention Is All You Need // arXiv:1706.03762v7. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1706.03762
12. Elbayad M., Besacier L., Verbeek J. Pervasive Attention: 2D Convolutional Neural Networks for Sequence-to-Sequence Prediction // arXiv:1808.03867v3. 2018. DOI:10.48550/arXiv.1808.03867
13. Евграфов В.А., Ильюшин Е.А. Спайковые нейронные сети // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 7. С. 21–31.
14. Trentin E. Multivariate Density Estimation with Deep Neural Mixture Models // Neural Processing Letters. 2023. Vol. 53. Iss. 2. PP. 1–17. DOI:10.1007/s11063-023-11196-2
15. Воронцов К.В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин). URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf> (дата обращения 17.05.2023)
16. Молодцов Д.А. Сравнение и продолжение многозначных зависимостей // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2016. Т. 11. № 2. С. 115–145.
17. Olson D.L., Araz Ö.M. Cluster Analysis // Data Mining and Analytics in Healthcare Management. International Series in Operations Research & Management Science. Cham: Springer, 2023. Vol. 341. PP. 53–68. DOI:10.1007/978-3-031-28113-6_5
18. Молодцов Д.А., Осин А.В. Новый метод применения многозначных закономерностей // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2020. Т. 15. № 2. С. 83–95. DOI: 10.26456/fssc72
19. Кафтаников И.Л., Парасич А.В. Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16. № 3. С. 15–24. DOI:10.14529/ctr160302
20. Javed R.K., Ayub N., Shiraz M. A Novel Approach Using Deep Learning for Network Based Intrusion Detection System // Thesis for: MS CS Advisor: Nasir Ayub and Prof. Dr. Muhammad Shiraz. DOI:10.13140/RG.2.2.21108.01922
21. Camargo J.T.F., Veraszto E.V., Barreto G., Amaral S.F. Neural Networks and the Study of Time Series: An Application in Engineering Education // Journal of Mechanics Engineering and Automation. 2015. Vol. 5. P. 2159-5275153-160. DOI:10.17265/2159-5275/2015.03.003
22. Andrychowicz M., Denil M., Gómez S., Hoffman M., Pfau D., Schaul T., et al. Learning to learn by gradient descent by gradient descent // arXiv:1606.04474v2. 2016. DOI:10.48550/arXiv.1606.04474
23. Sheluhin O.I., Rybakov S.Y., Vanyushina A.V. Detection of Network Anomalies with the Method of Fixing Jumps of the Fractal Dimension in the Online Mode // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. Vol. 5. Iss. 1. PP. 430–435.
24. Kox J.H.A.M., van der Zwan J.S., Groenewoud J.H., Runhaar J., Bierma-Zeinstras S.M.A., Bakker E.J.M., et al. Predicting late dropout from nursing education or early dropout from the profession // Science Talks. 2022. Vol. 5. P. 100106. DOI:10.1016/j.sctalk.2022.100106
25. Lamia A.N.M. Role of data normalization in k-means algorithm results // Al-Kadhum 2nd International Conference on Modern Applications of Information and Communication Technology (Baghdad, Iraq, 8–9 December 2021). 2023. DOI:10.1063/5.0119267
26. Avant T., Morgansen K.A. Analytical Bounds on the Local Lipschitz Constants of ReLU Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2023. PP. 1–12. DOI:10.1109/TNNLS.2023.3273228
27. Bressan R. Building a multi-output Convolutional Neural Network with Keras // Medium. URL: <https://towardsdatascience.com/building-a-multi-output-convolutional-neural-network-with-keras-ed24c7bc1178> (дата обращения 28.06.2023)

28. Do N.-T., Hoang V.-P., Doan V.S. A novel non-profiled side channel attack based on multi-output regression neural network // *Journal of Cryptographic Engineering*. 2023. DOI:10.1007/s13389-023-00314-4
29. Prasad J.R., Saikumar S., Subbarao B.V. Design and Development of Financial Fraud Detection using Machine Learning // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. Iss. 9. PP. 5838–5843. DOI:10.30534/ijeter/2020/152892020
30. Kitsune Network Attack Dataset // Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/ymirsky/network-attack-dataset-kitsune> (дата обращения 22.02.2023)
31. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection // Github. URL: <https://github.com/ymirsky/Kitsune-py> (дата обращения 22.02.2023)
32. Mirsky Y., Doitszman T., Elovici Y., Shabtai A. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection // *arXiv:1802.09089*. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.09089.pdf> (дата обращения 28.08.2023)
33. Miyamoto K., Goto H., Ishibashi R., Han C., Ban T., Takahashi T. et al. Malicious Packet Classification Based on Neural Network Using Kitsune Features // *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Systems and Pattern Recognition (ISPR, Hammamet, Tunisia, 24–26 March 2022)*. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer, 2022. Vol. 1589. PP. 306–314. DOI:10.1007/978-3-031-08277-1_25
34. Preprocessing data // Scikit-Learn. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/preprocessing.html> (дата обращения 28.06.2023)
35. Лукьянова О.А., Никитин О.Ю., Кунин А.С. Применение матричных фильтров и теории кос для процедурной генерации архитектур нейронных сетей // *Вычислительные технологии*. 2019. Т. 24. № 6. С. 69–78. DOI:10.25743/ICT.2019.24.6.009
36. Scheliga D., Maeder P., Seeland M. Dropout Is NOT All You Need to Prevent Gradient Leakage // *Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirty-Fifth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence and Thirteenth Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence (Washington, USA, 7–14 February 2023)*. AAAI Press, 2023. Vol. 37. № 8. PP. 9733–9741. DOI:10.1609/aaai.v37i8.26163

References

1. Bol'shakov A.S. Gubankova E.V. Anomaly detection in computer networks using machine learning methods. *REDS*. 2020;10(1):37–42.
2. Sheluhin O.I., Rakovskiy D.I. Multi-Label Learning in Computer Networks. *Proceedings of the conference at 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 14–16 March 2023, Moscow, Russian Federation*. IEEE; 2023. DOI:10.1109/IEEECONF56737.2023.10092157
3. Chechulin A.A. The issues of collecting correct and consistent information about a computer network. *Informatization and communication*. 2023;1:91–94. DOI:10.34219/2078-8320-2023-14-1-91-94
4. Shelukhin O., Rakovskiy D. Prediction of the profile functioning of a computer system based on multivalued patterns. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2022;6(52):53–70. DOI:10.21681/2311-3456-2022-6-53-70
5. Sheluhin O.I., Osin A.V., Rakovsky D.I. New Algorithm for Predicting the States of a Computer Network Using Multivalued Dependencies. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2023;57(1):48–60. DOI:10.3103/S0146411623010091
6. Rakovskiy D.I. Analysis of the problem of multivalued of class labels on the security of computer networks». *Synchroinfo journal*. 2022;6:10–17. DOI:10.36724/2664-066X-2022-8-6-10-17
7. Vasilyev V.I., Vulfin A.M., Gvozdev V.E., Kartak V.M., Atarskaya E.A. Ensuring information security of cyber-physical objects based on predicting and detecting anomalies in their state. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021;6:90–119. DOI:10.24412/2410-9916-2021-6-90-119
8. Sheluhin O.I., Barkov V.V., Sekretarev S.A. The online classification of the mobile applications traffic using data mining techniques. *T-Comm*. 2019;13(10):60–67. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10317
9. Shelukhin O., Barkov V., Polkovnikov M. Classification of encrypted mobile app traffic using the machine learning method. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2018;4(28):21–28. DOI:10.21681/2311-3456-2018-4-21-28
10. Ismailov V.E. A three layer neural network can represent any multivariate function. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2023;523(1):127096. DOI:10.1016/j.jmaa.2023.127096
11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., et al. Attention Is All You Need. *arXiv:1706.03762v7*. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1706.03762
12. Elbayad M., Besacier L., Verbeek J. Pervasive Attention: 2D Convolutional Neural Networks for Sequence-to-Sequence Prediction. *arXiv:1808.03867v3*. 2018. DOI:10.48550/arXiv.1808.03867
13. Evgrafov V., Il'yushin E. On spiking neural networks. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021;9(7):21–31.
14. Trentin E. Multivariate Density Estimation with Deep Neural Mixture Models. *Neural Processing Letters*. 2023;53(2):1–17. DOI:10.1007/s11063-023-11196-2
15. Vorontsov K.V. *Mathematical methods of learning by precedents (machine learning theory)*. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf> [Accessed 17.05.2023]
16. Molodtsov D.A. Comparison and continuation of multivalued dependencies. *Fuzzy systems and soft computing*. 2016;11(2):115–145.
17. Olson D.L., Araz Ö.M. Cluster Analysis. In: *Data Mining and Analytics in Healthcare Management. International Series in Operations Research & Management Science, vol.341*. Cham: Springer; 2023. p.53–68. DOI:10.1007/978-3-031-28113-6_5
18. Molodtsov D.A., Osin A.V. A new method of applying multi-valued dependencies. *Fuzzy systems and soft computing*. 2020;15(2):83–95. DOI:10.26456/fssc72

19. Kaftannikov I.L., Parasich A.V. Problems of Training Set's Formation in Machine Learning Tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"*. 2016;16(3):15–24. DOI:10.14529/ctcr160302
20. Javed R.K., Ayub N., Shiraz M. A Novel Approach Using Deep Learning for Network Based Intrusion Detection System. *Thesis for: MS CS Advisor: Nasir Ayub and Prof. Dr. Muhammad Shiraz*. DOI:10.13140/RG.2.2.21108.01922
21. Camargo J.T.F., Veraszto E.V., Barreto G., Amaral S.F. Neural Networks and the Study of Time Series: An Application in Engineering Education. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 2015;5:2159-5275153-160. DOI:10.17265/2159-5275/2015.03.003
22. Andrychowicz M., Denil M., Gómez S., Hoffman M., Pfau D., Schaul T., et al. Learning to learn by gradient descent by gradient descent. *arXiv:1606.04474v2*. 2016. DOI:10.48550/arXiv.1606.04474
23. Sheluhin O.I., Rybakov S.Y., Vanyushina A.V. Detection of Network Anomalies with the Method of Fixing Jumps of the Fractal Dimension in the Online Mode. *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2022;5(1):430–435.
24. Kox J.H.A.M., van der Zwan J.S., Groenewoud J.H., Runhaar J., Bierma-Zeinsträ S.M.A., Bakker E.J.M., et al. Predicting late dropout from nursing education or early dropout from the profession. *Science Talks*. 2022. Vol. 5. P. 100106. DOI:10.1016/j.sctalk.2022.100106
25. Lamia A.N.M. Role of data normalization in k-means algorithm results. *Al-Kadhum 2nd International Conference on Modern Applications of Information and Communication Technology, 8–9 December 2021, Baghdad, Iraq*. 2023. DOI:10.1063/5.0119267
26. Avant T., Morgansen K.A. Analytical Bounds on the Local Lipschitz Constants of ReLU Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2023:1–12. DOI:10.1109/TNNLS.2023.3273228
27. Bressan R. Building a multi-output Convolutional Neural Network with Keras. *Medium*. URL: <https://towardsdatascience.com/building-a-multi-output-convolutional-neural-network-with-keras-ed24c7bc1178> [Accessed 28.06.2023]
28. Do N.-T., Hoang V.-P., Doan V.S. A novel non-profiled side channel attack based on multi-output regression neural network. *Journal of Cryptographic Engineering*. 2023. DOI:10.1007/s13389-023-00314-4
29. Prasad J.R., Saikumar S., Subbarao B.V. Design and Development of Financial Fraud Detection using Machine Learning. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020;8(9):5838–5843. DOI:10.30534/ijeter/2020/152892020
30. Kaggle. Kitsune Network Attack Dataset // kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/ymirsky/network-attack-dataset-kitsune> [Accessed 22.02.2023]
31. Github. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection. URL: <https://github.com/ymirsky/Kitsune-py> [Accessed 22.02.2023]
32. Mirsky Y., Doitshman T., Elovici Y., Shabtai A. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection. *arXiv:1802.09089*. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.09089.pdf> [Accessed 28.08.2023]
33. Miyamoto K., Goto H., Ishibashi R., Han C., Ban T., Takahashi T. et al. Malicious Packet Classification Based on Neural Network Using Kitsune Features. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Systems and Pattern Recognition (ISPR, Hammamet, Tunisia, 24–26 March 2022). Communications in Computer and Information Science, vol.1589*. Cham: Springer; 2022. p.306–314. DOI:10.1007/978-3-031-08277-1_25
34. Scikit-Learn. Preprocessing data. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/preprocessing.html> [Accessed 28.06.2023]
35. Lukyanova O.A., Nikitin O.Yu., Kunin A.S. Application of matrix filters and braid theory for the procedural generation of neural network architectures. *Computational Technologies*. 2019;24(6):69–78. DOI:10.25743/ICT.2019.24.6.009
36. Scheliga D., Maeder P., Seeland M. Dropout Is NOT All You Need to Prevent Gradient Leakage. *Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirty-Fifth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence and Thirteenth Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence, 7–14 February 2023, Washington, USA, vol.37. №8*. AAAI Press; 2023. p.9733–9741. DOI:10.1609/aaai.v37i8.26163

Статья поступила в редакцию 04.07.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 27.08.2023.

The article was submitted 04.07.2023; approved after reviewing 18.07.2023; accepted for publication 27.08.2023.

Информация об авторах:

**ШЕЛУХИН
Олег Иванович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Московского технического университета связи и информатики
 <https://orcid.org/0000-0001-7564-6744>

**РАКОВСКИЙ
Дмитрий Игоревич**

аспирант кафедры «Информационная безопасность» Московского технического университета связи и информатики
 <https://orcid.org/0000-0001-7689-4678>

Научная статья

УДК 004.056(075.8)

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-114-121



Способ защиты от атаки некорректного заполнения избирательного бюллетеня в системе дистанционного электронного голосования

✉ Виктор Алексеевич Яковлев, yakovlev.va@sut.ru

✉ Васан Давуд Салман, salman.vd@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: Анализируется система дистанционного электронного голосования, основанная на гомоморфном шифровании бюллетеня и применении блокчейн-технологий. Исследуются существующие способы защиты системы голосования от атаки, связанной с неправильным заполнением избирателем бюллетеня. Разработан способ защиты от атаки нарушения правила заполнения бюллетеня в целом, повышающий безопасность системы голосования, за счет обеспечения скрытности суммарного числа голосов, переданных избирателем в ходе проверки корректности заполнения бюллетеня.

Ключевые слова: система дистанционного электронного голосования, проверка доказательства корректности заполнения бюллетеня, доказательство с нулевым разглашением секрета, схема Эль-Гамала

Ссылка для цитирования: Яковлев В.А., Салман В.Д. Способ защиты от атаки некорректного заполнения избирательного бюллетеня в системе дистанционного электронного голосования // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 114–121. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-114-121

Defense Method against an Attack of Incorrect Ballot Filling in a Remote Electronic Voting System

✉ Victor Yakovlev, yakovlev.va@sut.ru

✉ Vasan Salman, salman.vd@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The remote electronic voting system based on homomorphic encryption and blockchain technologies is analyzed. The existing methods of protecting the voting system from an attack related to incorrect filling a ballot by the voter are studied. The method to protect against an attack of violation of the rules for filling a ballot as a whole is developed, which increases the security of voting system by ensuring secrecy of total number of votes given by voter during the verification correctness of filling a ballot.

Keywords: remote electronic voting system, verification proof the correctness of filling the ballot, zero-knowledge proof system, El-Gamal scheme

For citation: Yakovlev V., Salman V. Defense Method against an Attack of Incorrect Ballot Filling in a Remote Electronic Voting System. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):114–121. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-114-121

Введение

Система дистанционного электронного голосования (ДЭГ) предоставляет возможность избирателям отдавать свои голоса удаленно с любого компьютера или цифрового устройства, подключенного к общедоступной сети Интернет из дома или с работы [1]. Для этого от избирателя требуются элементарные навыки работы на персональном компьютере, смартфоне, планшете или другом устройстве. ДЭГ – подход к системе онлайн-голосования, основанный на криптографических методах [2]. Основными преимуществами применения системы ДЭГ являются: повышение точности и скорости подсчета голосов; обеспечение тайны голосования и анонимности избирателей. Для построения защищенной системы ДЭГ используются такие методы как: микс-сети (МС); слепая подпись (СП) и гомоморфное шифрование (ГШ) [1–3].

Примером системы ДЭГ, основанной на МС, является Гелиос (США) [1]. Избиратель выбирает кандидата, используя два значения: 1 – «ЗА» или 0 – «ПРОТИВ». После чего шифрует выбор с помощью открытого ключа и отправляет его на сервер. После получения бюллетеней от избирателей сервер маскирует их, перемешивает и отправляет следующему серверу. Данная процедура проводится несколько раз. Последняя МС передает бюллетени в избирательную комиссию, где она их расшифровывает. Из-за того, что бюллетени были неоднократно перемешаны, обеспечивается анонимность голосующего. Тайна голосования обеспечивается шифрованием бюллетеня. МС должны доказывать правильность перемешивания бюллетеней.

В системе ДЭГ, основанной на применении СП [2], для обеспечения анонимности голосующего выполняется следующий протокол: избиратель выбирает кандидата, заполняет избирательный бюллетень (ИзБ), шифрует его секретным ключом и маскирует. После этого он подписывает свой ИзБ и отправляет его в избирательную комиссию (ИК), которая проводит проверку принадлежности подписи зарегистрированному избирателю, который еще не отдал свой голос. ИК подписывает этот документ своей подписью и возвращает его избирателю. Затем он удаляет маскировку, получая таким образом подписанный избирательной комиссией зашифрованный бюллетень. Далее, он отправляет этот ИзБ в комиссию по анонимному каналу. ИК проверяет на этом документе свою подпись. В случае, если ИзБ действителен, ИК размещает его в списке, который будет издан после того, как завершится голосование. Затем избиратель посылает свой ключ расшифровки в ИК, которая им расшифровывает ИзБ и добавляет голос к общему количеству голосов, отданных за кандидата.

В системе голосования на основе ГШ [3] избиратели зашифровывают свои ИзБ открытым ключом

ИК. Далее они отправляют свои зашифрованные ИзБ на сервер, который перемножает их, как числа, и посылает получившийся результат в ИК, которая расшифровывает произведение бюллетеней и объявляет победителя выборов. В силу гомоморфного свойства результат расшифровки произведения криптограмм равен сумме голосов, отданных за кандидата. Анонимность голосования каждого избирателя обеспечивается тем, что происходит расшифровка сразу всех агрегированных ИзБ. Основными преимуществами ГШ являются простота внедрения и эффективный подсчет голосов, так как нет необходимости расшифровывать бюллетени отдельно. Безопасность этих систем голосования обеспечивается вычислительной стойкостью применяемых криптосхем [3].

Современные системы ДЭГ активно используют технологию блокчейн [4–6] как средство надежной передачи и хранения транзакций. Примерами таких систем голосования являются системы: ДЭГ России [7]; «Криптовече» разработки Санкт-Петербургского Государственного университета [8]; ProvoTum (Швейцария) [3] и другие [9–11].

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу автоматической проверки правильности заполнения избирательного бюллетеня. Специфика такой проверки в том, что она должна выполняться без раскрытия для проверяющего информации о том, как проголосовал тот или иной избиратель.

Возможны два вида атак на систему ДЭГ со стороны избирателя, которые могут проводиться умышленно и неумышленно. Первый вид атаки заключается в том, что избиратель указывает некорректное число, соответствующее его выбору «ЗА» или «ПРОТИВ» по конкретному кандидату. Наиболее часто для защиты от этой атаки используется схема доказательства с нулевым разглашением секрета, предложенная в [12] Крамером, Дамгардом, Шоенмакером (*аббр.* CDS). Такая схема применяется в российской системе ДЭГ [7]. Второй вид атаки заключается в нарушении избирателем установленного избирательной комиссией правила голосования по количеству поданных голосов «ЗА» в одном бюллетене. То есть помимо проверки корректности заполнения бюллетеня по каждому кандидату необходима проверка корректности заполнения бюллетеня в целом. Другими словами, число голосов m , поданных «ЗА», должно быть в интервале: $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$, где $m_{\min}$, $m_{\max}$ – минимальное и максимальное число кандидатов, за которых может проголосовать избиратель согласно правилу голосования, установленному ИК.

Заметим, что в литературе содержится недостаточно сведений о способах проверки корректности заполнения ИзБ в целом. Известный способ [13] решает такую задачу, однако посторонние лица могут получить информацию об общем числе

голосов, отданных избирателем (без конкретизации его выбора по кандидатам). Это, на взгляд авторов, является уязвимостью способа, поскольку позволяет на основе анализа сумм голосов, содержащихся в ИзБ, отслеживать интенсивность хода голосования.

Способ, разработанный авторами, расширяет класс способов проверки корректности заполнения ИзБ, так как, помимо проверки корректности, обеспечивает скрытность суммарного количества голосов, поданных избирателем.

Целью статьи является разработка способа контроля корректности заполнения ИзБ по всем кандидатам (проверка в целом) для системы ДЭГ, построенной на основе криптосистемы Эль-Гамала (ЭГ) [14].

В п. 1 приведен анализ системы ДЭГ на основе криптосистемы ЭГ, описаны существующие способы защиты от некорректного заполнения избирательного бюллетеня по каждому кандидату и для всех кандидатов, приведены оценки сложности выполнения соответствующих операций для этих способов. В п. 2 представлено описание предлагаемого способа защиты от некорректного заполнения ИзБ в целом, а также даны оценки его сложности.

1. Система ДЭГ, основанная на криптосистеме гомоморфного шифрования

Данная система включает в себя: избирателей, сервер, технологию блокчейн (БЧ) и ИК (рисунок 1).

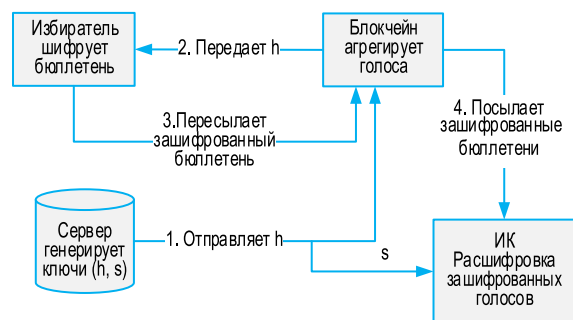


Рис. 1. Система ДЭГ

Fig. 1. Remote Electronic Voting System

Все участники избирательного процесса (избиратель, БЧ, ИК) выполняют необходимые математические преобразования с использованием программно-аппаратных средств и соответствующего программного обеспечения. Для краткости изложения будем полагать, что все участники непосредственно осуществляют необходимые вычисления без упоминания использования соответствующих программно-аппаратных средств.

Функционирование системы ДЭГ включает:

– *инициализация системы* – заключается в выборе системных параметров и генерации ключей. Сервер генерирует ключи шифрования и дешиф-

рования, используя схему ГШ; после этого отправляет ключ шифрования в БЧ, который передает его всем избирателям; ключ дешифрования хранится на сервере или может быть разделен на доли и находится у хранителей ключа до завершения выборов [3];

– *аутентификация избирателей* – в случае успешной проверки данных избиратель получает разрешение на участие в голосовании (в данной работе этап идентификации и аутентификации избирателя не рассматривается);

– *голосование* – каждый избиратель выбирает кандидата (кандидатов) из списка и шифрует свой выбор, используя ключ шифрования; далее он посылает зашифрованный бюллетень в БЧ; в БЧ происходит агрегирование голосов, результат передается в ИК [3];

– *подсчет голосов и объявление результатов* – ИК расшифровывает результаты голосования с помощью ключа дешифрования и объявляет его итог [3].

Рассмотрим детально основные этапы применительно к гомоморфной системе ЭГ.

Этап 1. Генерация ключей шифрования и дешифрования на сервере

Закрытый ключ s выбирается случайным образом в диапазоне $1 \leq s \leq p - 1$, а открытый ключ h генерируется следующим образом:

$$h = g^s \mod p, \quad (1)$$

где g – примитивный элемент над полем Галуа $GF(p)$; p – простое число.

Этап 2. Шифрование избирательного бюллетеня

Зашифрованный бюллетень по схеме ЭГ можно записать как:

$$C_i = (A_i, B_i) = (g^{r_i}, h^{v_i} \cdot G^{v_i}) \mod p, \quad (2)$$

где $v_i \in \{0, 1\}$ – голос избирателя; r_i – случайное число, $1 \leq r_i \leq p - 1$, $i = 1, 2, \dots, k$; k – число кандидатов; G – примитивный элемент над полем Галуа $GF(p)$.

Далее, все избиратели отправляют свои зашифрованные бюллетени и доказательства корректности ИзБ в БЧ.

Этап 3. Агрегирование криптограмм

После завершения голосования в БЧ осуществляется агрегирование криптограмм всех избирателей, отданных за каждого кандидата:

$$T_j = C_{1j} \cdot C_{2j} \cdot \dots \cdot C_{nj} = (A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n, B_1 \cdot B_2 \cdot \dots \cdot B_n) \mod p, \quad j = 1, 2, \dots, k.$$

Далее криптограмма T_j отправляется в ИК.

Этап 4. Расшифровка избирательного бюллетеня

ИК, используя ключ s , осуществляет дешифрование агрегированных бюллетеней:

$$\frac{h(\Sigma r_i) \cdot G^{\Sigma v_i}}{g^{\Sigma r_i s}} = \frac{g^{\Sigma r_i s} \cdot G^{\Sigma v_i}}{g^{\Sigma r_i s}} = G^{\Sigma v_i} \bmod p. \quad (3)$$

Этап 5. Подсчет голосов

Для гомоморфной схемы ЭГ сумма всех голосов, отданных за j -го кандидата, вычисляется как:

$$\sum_{i=1}^n v_{ij} = \log_G G^{\Sigma v_{ij}} \bmod p.$$

Логарифм вычисляется по таблице, которая составляется до начала выборов и с учетом количества избирателей. После этого ИК объявляет итоги выборов.

В описанной выше системе ДЭГ существует угроза атаки со стороны избирателя, поскольку им может быть некорректно заполнен (умышленно или неумышленно) ИзБ, что, в свою очередь, может повлиять на результаты голосования. Для предотвращения этой угрозы применяются разные способы проверки корректности заполнения ИзБ.

Способы проверки корректности ИзБ, как уже было сказано, различаются на способы проверки корректности голосования по каждому кандидату и заполнения ИзБ в целом [12, 15]. Сравнительный анализ способов [16] показал, что они отличаются большой сложностью, зачастую превышающей сложность процедур шифрования и дешифрования. Рассмотрим данные способы подробнее.

Предположим, что ключи шифрования и дешифрования сгенерированы. Избиратель выполняет следующие операции [16]:

- выбирает своего кандидата;
- шифрует ИзБ, используя ключ шифрования h ;
- формирует доказательство корректности ИзБ

за каждого кандидата [13], как показано в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Процедура формирования доказательства корректности заполнения избирательного бюллетеня

TABLE 1. The Procedure for Forming a Proof of Correctness a Voter's Ballot

В случае $v_i = 1$	В случае $v_i = 0$
Выбирает числа случайным образом:	
$r_i, w, u_1, d_1 \in \mathbb{Z}_q$	$r_i, w, u_2, d_2 \in \mathbb{Z}_q$
Шифрует ИзБ:	
$A_i = (g^{r_i}) \bmod p$ $B_i = h^{r_i} G^{v_i} \bmod p$	$A_i = (g^{r_i}) \bmod p$ $B_i = h^{r_i} / G^{v_i} \bmod p$
Формирует доказательства:	
$a_1 = g^{u_1} A_i^{d_1} \bmod p$ $b_1 = h^{u_1} (B_i G^{v_i})^{d_1} \bmod p$ $a_2 = g^w \bmod p$ $b_2 = h^w \bmod p$	$a_1 = g^w \bmod p$ $b_1 = h^w \bmod p$ $a_2 = g^{u_2} A_i^{d_2} \bmod p$ $b_2 = h^{u_2} (B_i / G^{v_i})^{d_2} \bmod p$
Находит хэш-функцию $c = H(A, B, a_1, b_1, a_2, b_2) \bmod q$, где q – простое число	
$d_2 = c - d_1 \bmod q$ $u_2 = w - r_i d_2 \bmod q$	$d_1 = c - d_2 \bmod q$ $u_1 = w - r_i d_1 \bmod q$

Далее избиратель отправляет значения $(A_i, B_i, a_1, b_1, a_2, b_2, d_1, d_2, u_1, u_2)$ контролирующему органу (БЧ), который проверяет корректно ли избиратель заполнил ИзБ.

БЧ проверяет следующие сравнения:

$$c = d_1 + d_2 \bmod q, \quad (4)$$

$$a_1 = g^{u_1} A_i^{d_1} \bmod p, \quad (5)$$

$$b_1 = h^{u_1} (B_i G^{v_i})^{d_1} \bmod p, \quad (6)$$

$$a_2 = g^{u_2} A_i^{d_2} \bmod p, \quad (7)$$

$$b_2 = h^{u_2} (B_i / G^{v_i})^{d_2} \bmod p. \quad (8)$$

Таким образом контролирующий орган (БЧ) может провести проверку корректности голосования избирателем по каждому кандидату («0» или «1»), при этом он не знает, как проголосовал избиратель. Данная проверка основана на методе доказательства с нулевым разглашением секрета [17].

Здесь необходимо отметить, что БЧ, проводя проверку корректности заполнения бюллетеня по каждому кандидату, не проверяет корректность выполнения избирателем правил голосования по заданному варианту голосования. Например, избиратель выбрал трех кандидатов из k , хотя разрешено выбрать только одного или двух. Такого рода задача решается проверкой корректности заполнения ИзБ в целом.

Рассмотрим способ [12, 15] формирования доказательства корректности заполнения ИзБ для всех кандидатов.

1) Избиратель находит произведение всех криптограмм, содержащихся в бюллетене:

$$C = \left(\prod C_i \right) = \left(\prod A_i, \prod B_i \right) = (g^{\Sigma r_i}, h^{\Sigma r_i} \cdot G^{\Sigma v_i}),$$

и пусть $\Sigma v_i = m$ – сумма голосов «ЗА», фактически отданных избирателем за всех кандидатов.

2) Выбирает случайное число $t \in \mathbb{Z}_p$ и вычисляет:

$$X = h^t. \quad (9)$$

3) Находит хэш-функцию:

$$c = H(g, \prod A_i, \prod B_i, X, m).$$

4) Находит:

$$z = t + r \cdot c, \quad (10)$$

где $r = \Sigma r_i$; r_i – числа, ранее использованные при формировании криптограмм.

5) Посылает (X, z, m') в БЧ.

При такой атаке, избиратель указывает общее количество голосов «ЗА», отданных за всех кандидатов (m'); которое может отличаться от фактической суммы отданных голосов $m, m \neq m'$.

БЧ выполняет проверку следующим образом:

– находит хэш-функцию:

$$c = H(g, \prod A_i, \prod B_i, X, m');$$

– проверяет сравнение:

$$h^z = ? X \cdot \left(\frac{\prod_i B_i}{g^{m'}} \right)^c. \quad (11)$$

Рассмотрим правую часть сравнения:

$$\begin{aligned} X \cdot \left(\frac{\prod_i B_i}{g^{m'}} \right)^c &= h^t \cdot \left(\frac{\prod_i g^{v_i} h^{r_i}}{g^{m'}} \right)^c = \\ &= h^t \cdot \left(g^m \cdot h^r / g^{m'} \right)^c. \end{aligned}$$

Если $m = m'$, то $h^{t+r \cdot c} = h^z$. Значит сравнение (11) выполняется.

Проведем оценку сложности операций, требуемых для формирования доказательства корректности заполнения ИзБ и проверки этого доказательства. При этом будем учитывать только количество операций возведения числа в степень по mod p (операции сложения и умножения чисел учитывать не будем ввиду их меньшей сложности по сравнению с операцией возведения в степень).

На основе анализа операций в таблице 1 и соотношений (4–10) несложно получить количество операций:

- по формированию доказательства корректности заполнения ИзБ на стороне избирателя – $10k + 1$;
- проверки доказательства корректности заполнения ИзБ на стороне БЧ – $8k + 3$.

Отметим, что в способе проверки корректности заполнения ИзБ по всем кандидатам (в целом), избиратель указывает общее количество голосов «ЗА» (m'), что, на взгляд авторов, является слабостью этого способа, так как позволяет посторонним лицам проводить оценку интенсивности хода голосования. В этой связи рассмотрим следующий способ предотвращения некорректного заполнения бюллетеня.

2. Разработка способа предотвращения некорректного заполнения бюллетеня

Предположим, что ключи шифрования и дешифрования ИзБ сгенерированы. Избиратель сделал свой выбор, криптограммы (A_i, B_i) ИзБ сформированы и переданы в БЧ. Доказательство корректности ИзБ за каждого кандидата осуществляется так же, как в рассмотренном способе (см. п. 1). Тогда представляем способ проверки корректности заполнения ИзБ в целом, без раскрытия общего количества поданных голосов. Операции, выполняемые избирателем и БЧ, приведены в таблице 2.

Дадим пояснение к проверке (18):

$$\begin{aligned} V &= \left(\frac{\prod_{i=1}^k B_i}{U_\Sigma \cdot g^{-v_{k+1}}} \right)^f = \\ &= (h^{\sum r_i} \cdot g^{\sum_{i=1}^k v_i} g^{-\sum_{i=1}^{k+1} v_i} \cdot g^{v_{k+1}})^f. \end{aligned}$$

Если избиратель проголосовал правильно ($m = m'$), то:

$$\sum_{i=1}^k v_i - \left(\sum_{i=1}^{k+1} v_i \right) + v_{k+1} = m - (m' + v_{k+1}) + v_{k+1} = 0,$$

тогда $V = h^{(\sum r_i)f}$ и $X' \cdot V = h^e \cdot h^{(\sum r_i)f} = h^x$.

ТАБЛИЦА 2. Способ формирования и проверки доказательства корректности заполнения ИзБ в целом

TABLE 2. The Method for Forming and Verifying a Proof of Correctness Filling the Voter's Ballot as a Whole

Избиратель	БЧ
Формирование доказательства	
–	1) Генерирует: $A_{k+1} = g^{r_{k+1}}, r_{k+1} \in Z_p$ и $f \in Z_p$
← Посылает ($g^{r_{k+1}}, f$)	
2) Находит числа $y_i, i = 1, \dots, k$: $y_i = \frac{\prod_{j < i} A_j}{\prod_{j > i} A_j} \quad (12)$	–
3) Вычисляет: $U_{D_i} = y_i^{r_i} g^{v_i} \quad (13)$	–
4) Находит произведение: $U'_\Sigma = \prod_{i=1}^k U_{D_i} = \prod_{i=1}^k y_i^{r_i} g^{v_i} \quad (14)$	–
5) Вычисляет, где $e \in Z_p$: $X' = h^e, x = e + \sum_{i=1}^k r_i \cdot f \quad (15)$	–
Посылает в БЧ U'_Σ, X' и $x \rightarrow$	
Проверка доказательства	
Первая проверка	
–	6) Вычисляет: $y_{k+1}^{r_{k+1}} = A_1 A_2 \dots A_k$ 7) Находит: $U_{D_{k+1}} = y_{k+1}^{r_{k+1}} \cdot g^{v_{k+1}} \quad (16)$
–	8) Вычисляет: $U_\Sigma = U'_\Sigma U_{D_{k+1}} = g^{\sum_{i=1}^k v_i + v_{k+1}} \quad (17)$
–	9) Методом подбора находит такое $-v_{k+1}$, при котором: $U_\Sigma = 1$
	10) Проверяет неравенство: $m_{\min} \leq v_{k+1} \leq m_{\max}$. Выполнение неравенства свидетельствует о том, что число поданных голосов лежит в заданном интервале
Вторая проверка	
–	11) Проверяет сравнение: $h^x = ? X \cdot V, \quad (18)$ где $V = \left(\frac{\prod_{i=1}^k B_i}{U_\Sigma \cdot g^{-v_{k+1}}} \right)^f$. Выполнение сравнения свидетельствует о том, что при формировании доказательства U_{D_i} избиратель использовал те же величины v_i , что и при формировании криптограмм B_i

В этом способе число m' в явном виде не передается, а число v_{k+1} в (17) известно только БЧ, поэтому посторонний пользователь, в том числе ИК, не может узнать общее количество голосов «ЗА», содержащихся в бюллетене, что, в свою очередь, повышает безопасность голосования в целом. Сложность такого метода можно оценить на основе вышеприведенных соотношений, как показано в таблицах 3 и 4. При оценке сложности учитывались только операции возведения числа в степень по модулю.

ТАБЛИЦА 3. Оценка сложности формирования доказательства корректности заполнения бюллетеня предлагаемым способом на стороне избирателя

TABLE 3. The Evaluation of Complexity for Forming a Proof of Correctness Filling a Ballot in the Proposed Method on a Voter's Side

Избиратель		Оценки сложности
Количество операций при формировании доказательства за каждого кандидата:		$10k$
Количество операций при формировании доказательства в целом:		
Вычисление:	$y_i = \frac{\prod_{j < i} A_j}{\prod_{j > i} A_j}$	$O(k)$
	$U_{Di} = y_i^{r_i} g^{v_k}$	$2k$
	$\prod_{i=1}^k y_i^{r_i} g^{v_i}$	$O(k)$
	$X' = h^e,$ $x = e + \sum_{i=1}^k r_i \cdot f$	1 $O(1)$
Всего операций при формировании доказательства в целом:		$2k + 1$
Всего операций по избирательному бюллетеню:		$12k + 1$

ТАБЛИЦА 4. Оценка сложности проверки доказательства корректности голосования на стороне БЧ

TABLE 4. The Evaluation of Complexity for Verifying of Correctness Voting on Blockchain's Side

Проверяющий (БЧ)		Оценки сложности
Количество операций по проверке доказательства ИзБ за каждого кандидата:		$8k$
Количество операций по проверке доказательства ИзБ в целом:		
Вычисление:	$A_{k+1} = g^{r_{k+1}}$	1
	$y_{k+1}^{r_{k+1}} = A_1 A_2 \dots A_k$	$O(k)$
	$U_{Dk+1} = y_{k+1}^{r_{k+1}} \cdot g^{v_{k+1}}$	2
Проверка неравенства:	$m_{\min} \leq v_{k+1} \leq m_{\max}$	$O(m_{\max})$
Вычисление V	$V = (\prod_{i=1}^k B_i / U_{\Sigma} \cdot g^{-v_{k+1}})^f$	1
Проверка сравнения	$h^x \stackrel{?}{=} X' \cdot V$	$O(1)$
Всего операций по проверке доказательства ИзБ в целом		4
Количество операций проверки ИзБ за каждого кандидата и в целом:		$8k + 4$

В таблице 5 представлены результаты сравнения сложности вычислений известного (X) [12, 15] и предложенного (Y) способов для избирателя (доказывающей стороны) и БЧ (проверяющей стороны). Оценка сложности вычислений проведена по наиболее трудоемкой операции – возведению числа в степень по mod p . Для n избирателей принимающих участие в выборах эти значения очевидно нужно умножить на n .

В таблице 6 приведены оценки сложности вычислений в БЧ для существующего и предлагаемого способов для разного количества кандидатов и избирателей.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение сложности вычислений для двух способов доказательства корректности заполнения бюллетеня

TABLE 5. The Comparison of Computational Complexity for Two Methods to Proving Correctness Filling a Ballot

Количество операций для контроля корректности заполнения бюллетеня в целом (для одного избирателя)	Способы	
	X	Y
формирование доказательства избирателем	$10k + 1$	$12k + 1$
проверки доказательства в БЧ	$8k + 3$	$8k + 4$

ТАБЛИЦА 6. Оценки сложности способов контроля корректности заполнения бюллетеня в зависимости от количества кандидатов и избирателей

TABLE 6. The Evaluation of Complexity for Methods to Verify Correctness Filling a Ballot Depending on the Number of Voters

Количество избирателей	Оценка сложности			
	$k = 1$	$k = 3$	$k = 5$	$k = 10$
	X/Y	X/Y	X/Y	X/Y
1	22/25	58/65	94/105	184/205
n	22n/25n	58n/65n	94n/105n	184n/205n

Как видно из таблиц 5 и 6, предлагаемый способ на стороне избирателя приблизительно на 20 % сложнее известного, а на стороне БЧ они приблизительно имеют одинаковую сложность. Однако предлагаемый способ является более безопасным, так как в ходе проверки правильности заполнения ИзБ в целом не раскрывается для посторонних лиц общая сумма голосов, отданных за кандидатов.

Заключение

Рассмотрена система ДЭГ, построенная на основе криптосистемы ЭГ. Для доказательства корректности заполнения бюллетеня в этой системе использовались два варианта: один – для каждого кандидата, а второй – для всех кандидатов вместе.

Разработан способ контроля некорректного заполнения бюллетеня в целом, позволяющий контролирующему органу (БЧ) убедиться в том, что избиратель корректно выбрал количество кандидатов из диапазона возможных значений.

Данный способ при примерно одинаковой сложности вычислений в сравнении с известным повышает безопасность системы ДЭГ, поскольку в ходе проверки не раскрывается суммарное число голосов, отданных за нескольких кандидатов, тем

самым обнаруживается и блокируется атака на систему, позволяющая нарушителю во время контроля проводить анализ и оценку статистики хода голосования до окончания выборов.

Список источников

1. Adida B. Helios: Web-based open-audit voting // *Proceedings of the 17th USENIX Security Symposium* (San Jose, USA, 28–29 July 2008). 2008. PP. 335–348.
2. Fujioka A., Okamoto T., Ohta K. A practical secret voting scheme for large scale elections // *Proceedings of the Advances in Cryptology – AUSCRYPT '92* (Gold Coast, Queensland, Australia, 13–16 December 1992). *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 718. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. PP. 245–251. DOI:10.1007/3-540-57220-1_66
3. Killer C., Rodrigues B., Scheid E.J., Franco M., Eck M., Zaug N. Provotum: A Blockchain-based and End-to-end Verifiable Remote Electronic Voting System // *Proceedings of the 45th Conference on Local Computer Networks* (LCN, Sydney, Australia, 16–19 November 2020). IEEE, 2020. PP. 172–183. DOI:10.1109/LCN48667.2020.9314815
4. Suganya R., Sureshkumar A., Alaguvathana P., Priyadharshini S., Jeevanantham K. Blockchain Based Secure Voting System Using Iot // *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2020. Vol. 13. Iss. 3. PP. 2134–2142.
5. Rasid N.H. Blockchain Technology in e-Voting: Comparative Study. 2020.
6. Ayed A.B. A Conceptual Secure Blockchain Based Electronic Voting System // *International Journal of Network Security & Its Applications*. 2017. Vol. 9. Iss. 3. PP. 1–9. DOI:10.5121/ijnsa.2017.9301
7. Программно-технический комплекс, обеспечивающий дистанционное электронное голосование избирателей (участников референдума) вне зависимости от места их нахождения. Описание ПТК ДЭГ. 2021. URL: https://evoting.digitaldem.ru/wp-content/uploads/sites/2/2021/07/ptkdeg_general_description_2021-07-15.pdf (дата обращения 07.09.2023)
8. КриптоВече. Инструкция к системе Базовое описание информационной системы «КриптоВече».
9. Dagher G.G., Marella P.B., Milojkovic M., Mohler J. BroncoVote: Secure Voting System Using Ethereum's Blockchain // *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy* (ICISSP, Funchal, Portugal, 22–24 January 2018). Vol. 1. 2018. PP. 96–107. DOI:10.5220/0006609700960107
10. Yu B., Liu J., Sakzad A., Nepal S., Rimba P., Steinfeld R., Au M.H. Platform-Independent Secure Blockchain-Based Voting System // *Cryptology ePrint Archive*. 2018. URL: <https://eprint.iacr.org/2018/657> (дата обращения 07.09.2023)
11. Hsiao J.-H., Tso R., Chen C.-M., Wu M.-E. Decentralized E-Voting Systems Based on the Blockchain Technology // *Proceedings of the International Conference on Computing Systems and Applications on Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing* (Taichung, Taiwan, 18–20 December 2017). *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 474. Singapore: Springer, 2018. PP. 305–309. DOI:10.1007/978-981-10-7605-3_50
12. Cramer R., Damgård I., Schoenmakers B. Proofs of Partial Knowledge and Simplified Design of Witness Hiding Protocols // *Proceedings of the 14th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology* (CRYPTO '94, Santa Barbara, USA, 21–25 August 1994). *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 839. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. PP. 174–187. DOI:10.1007/3-540-48658-5_19
13. Cramer R., Gennaro R., Schoenmakers B. A secure and optimally efficient multi- authority election scheme // *European Transactions on Telecommunications*. 1997. Vol. 8. Iss. 5. PP. 481–490. DOI:10.1002/ett.4460080506
14. Elgamal T. A Public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1985. Vol. 31. Iss. 4. PP. 469–472. DOI:10.1109/TIT.1985.1057074
15. Chaum D., Pedersen T.P. Wallet Databases with Observers // *Proceedings of the 12th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology* (CRYPTO '94, Santa Barbara, USA, 16–20 August 1992). *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 740. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. PP. 89–105. DOI:10.1007/3-540-48071-4_7
16. Яковлев В.А., Салман В.Д. Методы защиты от угрозы неправильного заполнения избирательного бюллетеня в системе дистанционного электронного голосования // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9. № 2. С. 128–142. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-128-142
17. Mohr A. A Survey of Zero-Knowledge Proofs with Applications to Cryptography. URL: http://austinmohr.com/Work_files/zkp.pdf (дата обращения 07.09.2023)

References

1. Adida B. Helios: Web-based open-audit voting. *Proceedings of the 17th USENIX Security Symposium*, 28–29 July 2008, San Jose, USA. 2008. p.335–348.
2. Fujioka A., Okamoto T., Ohta K. A practical secret voting scheme for large scale elections. *Proceedings of the Advances in Cryptology – AUSCRYPT '92*, 13–16 December 1992, Gold Coast, Queensland, Australia. *Lecture Notes in Computer Science*, vol.718. Berlin, Heidelberg: Springer; 1993. p.245–251. DOI:10.1007/3-540-57220-1_66
3. Killer C., Rodrigues B., Scheid E.J., Franco M., Eck M., Zaug N. Provotum: A Blockchain-based and End-to-end Verifiable Remote Electronic Voting System. *Proceedings of the 45th Conference on Local Computer Networks*, LCN, 16–19 November 2020, Sydney, Australia. IEEE; 2020. p.172–183. DOI:10.1109/LCN48667.2020.9314815
4. Suganya R., Sureshkumar A., Alaguvathana P., Priyadharshini S., Jeevanantham K. Blockchain Based Secure Voting System Using Iot. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2020;13(3):2134–2142.
5. Rasid N.H. *Blockchain Technology in e-Voting: Comparative Study*. 2020.

6. Ayed A.B. A Conceptual Secure Blockchain Based Electronic Voting System. *International Journal of Network Security & Its Applications*. 2017;9(3):1–9. DOI:10.5121/ijnsa.2017.9301
7. Software and Hardware Complex Providing Remote Electronic Voting of Voters (Referendum Participants) Regardless of Their Location. 2021. URL: https://evoting.digitaldem.ru/wp-content/uploads/sites/2/2021/07/ptkdeg_general_description_2021-07-15.pdf [Accessed 07.09.2023]
8. CryptoVeche. Instructions for the system Basic description of the information system "KriptoVeche".
9. Dagher G.G., Marella P.B., Milojkovic M., Mohler J. BroncoVote: Secure Voting System Using Ethereum's Blockchain. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy, ICISPP, 22–24 January 2018, Funchal, Portugal*. 2018. vol.1. p.96–107. DOI:10.5220/0006609700960107
10. Yu B., Liu J., Sakzad A., Nepal S., Rimba P., Steinfeld R., Au M.H. Platform-Independent Secure Blockchain-Based Voting System. *Cryptology ePrint Archive*. 2018. URL: <https://eprint.iacr.org/2018/657> [Accessed 07.09.2023]
11. Hsiao J.-H., Tso R., Chen C.-M., Wu M.-E. Decentralized E-Voting Systems Based on the Blockchain Technology. *Proceedings of the International Conference on Computing Systems and Applications on Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing, 18–20 December 2017, Taichung, Taiwan. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol.474*. Singapore: Springer; 2018. p.305–309. DOI:10.1007/978-981-10-7605-3_50
12. Cramer R., Damgård I., Schoenmakers B. Proofs of Partial Knowledge and Simplified Design of Witness Hiding Protocols. *Proceedings of the 14th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, CRYPTO '94, 21–25 August 1994, Santa Barbara, USA. Lecture Notes in Computer Science, vol.839*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1994. p.174–187. DOI:10.1007/3-540-48658-5_19
13. Cramer R., Gennaro R., Schoenmakers B. A secure and optimally efficient multi- authority election scheme. *European Transactions on Telecommunications*. 1997;8(5):481–490. DOI:10.1002/ett.4460080506
14. Elgamal T. A Public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1985;31(4):469–472. DOI:10.1109/TIT.1985.1057074
15. Chaum D., Pedersen T.P. Wallet Databases with Observers. *Proceedings of the 12th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, CRYPTO '94, 16–20 August 1992, Santa Barbara, USA. Lecture Notes in Computer Science, vol.740*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1994. p.89–105. DOI:10.1007/3-540-48071-4_7
16. Yakovlev V., Salman V. Methods of Protection against Threat: Incorrect Ballot Filling by Voter in the Remote Electronic Voting System. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(2):128–142. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-128-142
17. Mohr A. A Survey of Zero-Knowledge Proofs with Applications to Cryptography. URL: http://austinhmohr.com/Work_files/zkp.pdf [Accessed 07.09.2023]

Статья поступила в редакцию 14.08.2023; одобрена после рецензирования 20.08.2023; принята к публикации 20.08.2023.

The article was submitted 14.08.2023; approved after reviewing 20.08.2023; accepted for publication 20.08.2023.

Информация об авторах:

ЯКОВЛЕВ
Виктор Алексеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0007-2861-9605>

САЛМАН
Васан Давуд

аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-4454-7844>

Выходные данные



Товарный знак №929373, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 61, литера А (RU)
Зарегистрирован в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 13.03.2023 г. Заявка №2022733914

План издания научной литературы 2023 г., п. 9

Дата выхода в свет	Усл.-печ. л.	Формат	Тираж	Заказ	Свободная цена
02.10.2023	15	60×84 _{1/8}	1000 экз.	№ 1524	

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Обложка: <https://shutterstock.com>

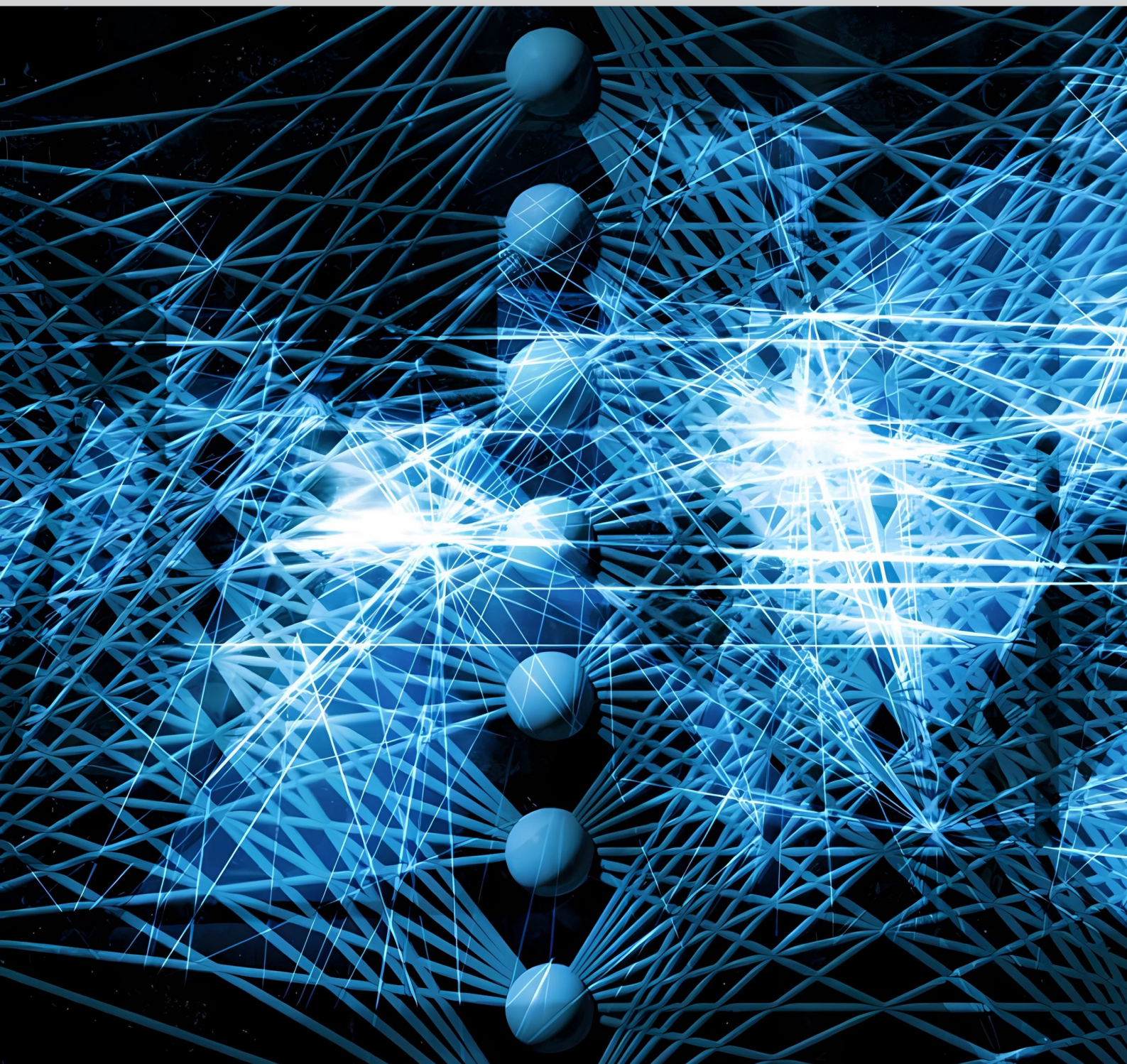
Адрес СПбГУТ:

19323, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

E-mail: tuzs@sut.ru Web: tuzs.sut.ru VK: vk.com/spbtuzs



Подписной индекс в Объединенном каталоге "ПРЕССА РОССИИ" - 59983