
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит шесть раз в год

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники

Редакционная коллегия

Л. М. Лыньков (зам. главного редактора),
В. Р. Степицкий (зам. главного редактора),
О. В. Бойправ (ответственный секретарь редколлегии),
М. П. Багура, В. Е. Борисенко, М. Г. Гасанов, С. В. Козлов,
В. А. Лабунов, Ю. В. Писецкий, А. С. Сигов,
А. Г. Смирнов, М. М. Татур, В. Ю. Цветков

Редакционный совет

И. И. Абрамов, В. Е. Агабеков, И. С. Азаров, А. И. Белоус, Н. В. Гапоненко,
С. В. Гапоненко, В. В. Голенков, В. Ф. Голиков, А. Л. Гурский, А. П. Достанко,
В. А. Емельянов, А. А. Иванюк, Ф. Ф. Комаров, В. К. Конопелько, А. П. Кузнецов,
А. А. Кураев, В. И. Курмашев, В. Л. Ланин, Н. И. Листопад, В. Е. Матюшков,
Ф. И. Пантелеенко, В. А. Пилипенко, С. Л. Прищепа, Н. К. Толочко,
А. А. Хмыль, В. В. Цегельник, Г. П. Яблонский, В. Н. Ярмолик

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Максимов С. Е., Чубенко Е. Б., Борисенко В. Е., Кулак А. И. Влияние алюминия на синтез графитоподобного нитрида углерода из тиомочевины	5
Емельянов В. В. Пассивация токопроводящей системы интегральных схем слоев нитрида алюминия	12
Доан Х. Т., Голосов Д. А., Джанг Дж., Завадский С. М., Мельников С. Н., Нгуен Т. Д. Модель процесса реактивного магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени	17
Кондрашов Д. А., Певнева Н. А., Гусинский А. В., Павлючик А. А., Гончарик М. А. Исследование S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов поликора и GaAs с помощью векторного анализатора цепей	26

Пикуза М. О., Михневич С. Ю., Сенкевич А. Ю. Стабильность характеристик физических генераторов случайных чисел.....	34
Лакизо П. Ю. Метод принятия решения на основе комплексной оценки эффективности радиочастотного спектра.....	41
Малевич И. Ю., Лопатченко А. С. Экспериментальная оптимизация энергетических характеристик георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением	48
Шамына А. Ю., Иванюк А. А. Автоматическая балансировка путей физически неклонированной функции типа «арбитр»	56
Высоцкий Д. В., Хижняк Е. И., Хижняк А. В. Методика расчета ошибок курса при наведении самолета на маневрирующую воздушную цель	63
Petukhov A. V. Algorithms for Synthesis of Technological Operations for Manufacturing Samples of Structurally Complex Products (Петухов А. В. Алгоритмы синтеза технологических операций изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий).....	70
Ловецкий М. Ю., Цветков В. Ю., Борискевич А. А., Лапицкая В. А., Чижик С. А. Локальная корреляционная метрика для оценки качества комбинирования АСМ-изображений.....	78
Игнатьева С. А., Богущ Р. П. Формирование обучающей выборки для свёрточных нейронных сетей при реидентификации людей по видеоданным.....	87
Воротницкий Ю. И., Румас Р. А. Архитектура аппаратно-программного средства односторонней передачи данных в компьютерных сетях	96
Vishniakou U. A., YiWei Xia IT Diagnostics of Parkinson’s Disease Based on the Analysis of Voice Markers and Machine Learning (Вишняков В. А., Ивэй Ся. IT-диагностика болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и машинного обучения).....	102
Четыркина З. Н. Специализированные римановы пространства первых трех лакунарностей по группам изометрических и гомотетических движений	111

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 01.06.2023. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 14,18. Уч.-изд. л. 12,1. Тираж 85 экз. Заказ 102.

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 329а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2023

DOKLADY BGUIR

Published 6 times a year

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus, in the State Registry of Mass Media, reg. No 1087

The journal is included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index

Editor-in-Chief

Vadim Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Maksimov S. E., Chubenko E. B., Borisenko V. E., Kulak A. I. The Role of Aluminum in Graphitic Carbon Nitride Synthesis from Tiourea.....	5
Emelyanov V. V. Passivation of a Conductive System of Integrated Circuits with a Layer of Aluminum Nitride.....	12
Doan H. T., Golosov D. A., Jin Zhang, Zavadski S. M., Melnikov S. N., Nguyen T. D. Model of Reactive Magnetron Sputtering of a Two-Component Composite Target.....	17
Kondrashov D. A., Pevneva N. A., Gusinsky A. V., Pavlyuchik A. A., Goncharik M. A. Estimation of S-Parameters and Dielectric Permittivity of Polycor and GaAs Samples Using a Vector Network Analyzer.....	26
Pikuza M. O., Mikhnevich S. Yu., Siankevich A. Yu. Stability of Characteristics of Physical Random Number Generators.....	34
Lakizo P. Yu. Decision-Making Method Based on a Comprehensive Assessment of the Effectiveness of the Radio Frequency Spectrum.....	41
Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. Experimental Optimization of the Energy Characteristics of a Ground Penetrating Radar with Continuous Linear-Frequency-Modulated Radiation.....	48
Shamyna A. Yu., Ivaniuk A. A. Automatic Balancing of “Arbiter” Physical Unclonable Function Paths.....	56

Vysotski D. V., Khizhniak E. I., Khizhniak A. V. Methodology for Calculating Course Errors when Aiming an Aircraft at a Maneuvering Air Target.....	63
Petukhov A. V. Algorithms for Synthesis of Technological Operations for Manufacturing Samples of Structurally Complex Products.....	70
Lavetski M. Yu., Tsviatkou V. Yu., Boriskevich A. A., Lapitskaya V. A., Chizhik S. A. Local Correlation Metric for Assessing the Quality of Combined AFM Images	78
Ihnatsyeva S. A., Bohush R. P. Training Sample Formation for Convolution Neural Networks to Person Re-Identification from Video	87
Varatnitski Y. I., Rumas R. A. Architecture of Hardware and Software for Unidirectional Data Transmission in Computer Networks	96
Vishniakou U. A., YiWei Xia. IT Diagnostics of Parkinson’s Disease Based on the Analysis of Voice Markers and Machine Learning.....	102
Chetyrkina Z. N. Specialized Riemannian Spaces of the First Three Lacunaries by Groups of Isometric and Homothetic Motions	111

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 01.06.2023. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. 1. 14,18. Ed.-ed. 1. 12,1. Edition 85 copies. Order 102.

Editorial Adress: P. Brovki St., 6, Off. 329a, Minsk, 220013, Republic of Belarus
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
Tel.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
220013, Minsk, P. Brovki St., 6

Founder – Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”
Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-5-11>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 547-304.9+54.057+546.62

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СИНТЕЗ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА ИЗ ТИОМОЧЕВИНЫ

С. Е. МАКСИМОВ¹, Е. Б. ЧУБЕНКО¹, В. Е. БОРИСЕНКО¹, А. И. КУЛАК²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 18.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Исследован процесс формирования композитного материала на основе графитоподобного нитрида углерода путем пиролитического разложения при 550 °С смеси тиомочевина с добавлением алюминиевой пудры в количестве 5–30 масс.%. Анализ методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии позволил установить, что синтезированный материал состоит из нитрида углерода, сульфида алюминия, остаточного металлического алюминия и его гидроокиси. Избыток металлического алюминия обусловлен частичным взаимодействием с серосодержащими летучими веществами, образующимися при термическом разложении тиомочевина. Показано, что интенсивность и ширина спектров фотolumинесценции синтезированных композитов определяется концентрацией алюминия в исходной смеси. Максимум интенсивности фотolumинесценции при увеличении концентрации алюминия от 5 до 30 масс.% смещается в длинноволновую область с 534 на 560 нм. Это может быть использовано при создании оптоэлектронных устройств на основе графитоподобного нитрида углерода.

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, алюминий, сульфид алюминия, растровая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, фотolumинесценция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 1.4, ГПНИ «Конвергенция», задание 3.03.4, и гранта БРФФИ Ф22-114. Авторы выражают благодарность Д. В. Жигулину за анализ образцов методом растровой электронной микроскопии.

Для цитирования. Влияние алюминия на синтез графитоподобного нитрида углерода из тиомочевина / С. Е. Максимов [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-5-11>.

THE ROLE OF ALUMINUM IN GRAPHITIC CARBON NITRIDE SYNTHESIS FROM TIOUREA

SERGEY E. MAKSIMOV¹, EUGENY B. CHUBENKO¹, VICTOR E. BORISENKO¹,
ANATOLY I. KULAK²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18.11.2022

Abstract. The synthesis of a composite material based on graphitic carbon nitride by pyrolytic decomposition at 550 °С of a mechanical mixture of thiourea with the addition of aluminum powder in the amount of 5–30 wt.% has been studied. According to the scanning results by means of electron microscopy, energy dispersive X-ray spec-

troscopy, and X-ray diffractometry the synthesized material consists of carbon nitride, aluminum sulfide, residual metallic aluminum and aluminum hydroxide. The excess of metallic aluminum is due to the partial interaction with sulfur-containing volatile substances formed during the thermal decomposition of thiourea. It is shown that the intensity and width of the photoluminescence spectra of the synthesized composites are determined by the aluminum concentration in the initial mixture. As the aluminum concentration increases from 5 to 30 wt.%, the photoluminescence intensity maximum shifts to the long wavelength region from 534 to 560 nm. This can be used to create optoelectronic devices based on the graphitic carbon nitride.

Keywords: graphitic carbon nitride, aluminum, aluminum sulfide, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, photoluminescence.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work is supported by the SPSI “Materials science, new materials and technologies”, project 1.4, SPSI “Convergence”, project 3.03.4, and grant F22-114 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. We are grateful to D. V. Zhygulin for analysis of the samples with scanning electron microscopy.

For citation. Maksimov S. E., Chubenko E. B., Borisenko V. E., Kulak A. I. (2023) The Role of Aluminum in Graphitic Carbon Nitride Synthesis from Thiourea. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-5-11> (in Russian).

Введение

Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) – полупроводниковый материал с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 2,7$ эВ (при 300 К) [1], привлекающий внимание исследователей благодаря выраженным фотокаталитическим и люминесцентным свойствам [1, 2]. Обычно для синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ используется метод термической обработки органических соединений с высоким содержанием азота, например, тиомочевины, меламин, цианамид и дициандиамид [3–6]. Известно, что $g\text{-C}_3\text{N}_4$ проявляет высокую фотокаталитическую активность при облучении светом видимого диапазона, что позволяет применять его для фотокаталитического разложения воды, ее очистки от органических загрязнителей и восстановления CO_2 [2, 3, 5].

Улучшения фотокаталитических и изменения фотолюминесцентных свойств можно добиться модуляцией ширины запрещенной зоны путем модификации материала различными примесями, например, кислородом [7] или двуокисью титана (TiO_2) [5, 8]. В связи с этим повышенным интересом пользуются структуры, легированные атомами других элементов – металлов и неметаллов [5, 8]. Ранее в [9, 10] была продемонстрирована возможность получения композитных материалов на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$, включающих оксид и сульфид цинка, путем пиролитического разложения смеси тиомочевины и ацетата цинка. Образованию частиц широкозонных полупроводниковых соединений в такой системе способствовало одновременное протекание химических реакций и взаимодействие их продуктов в условиях повышенной температуры. Для практического применения $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в электронных приборах большое значение имеет уменьшение его удельного электрического сопротивления, которое для нелегированного материала может превышать 10^9 Ом·см [3]. Для улучшения электропроводности в $g\text{-C}_3\text{N}_4$ могут быть введены различные металлические примеси, которые будут оказывать различное влияние на оптические свойства материала. Поэтому целью исследований являлось экспериментальное изучение процессов, протекающих при пиролитическом разложении тиомочевины и синтезе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в присутствии порошкообразного алюминия в различной концентрации при температуре синтеза 550 °С, а также изучение состава, структуры и оптических свойств образующегося в таких условиях композита.

Методика проведения эксперимента

Для синтеза композитного материала в керамическом тигле объемом 20 см³ смешивали тиомочевину с алюминиевой пудрой в определенной пропорции. Затем тигель механически герметизировали алюминиевой фольгой, что позволяло создать барьер, препятствующий попаданию атмосферного воздуха внутрь, но практически не препятствовало истечению газообразных продуктов реакции в окружающую среду. Затем тигель помещали в муфельную печь при комнатной температуре. Выход на температуру синтеза производили равномерно в течение 90 мин со средней скоростью нагрева $5,88$ °С/с и по достижении 550 °С выдерживали 30 мин [4, 7]. После этого печь с тиглем остывала естественным путем до комнатной температуры в течение 16 ч. Таким

способом были синтезированы образцы с содержанием алюминиевой пудры от 0 до 30 масс.% от общей массы смеси исходных веществ. Общая масса исходной смеси составляла 2 г в каждом эксперименте.

Морфологию полученных материалов исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Hitachi S-4200. Элементный состав образцов анализировали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на спектрометре Bruker QUANTAX 200. Кристаллическую структуру и фазовый состав изучали с помощью рентгенодифракционного анализа (РДА) на дифрактометре ДРОН-4 с использованием в качестве зондирующего излучения $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,154184$ нм). ФотOLUMИнесценцию исследовали при комнатной температуре в условиях возбуждения монохроматическим светом с длиной волны 345 нм, который выделяли из спектра излучения ксеноновой лампы мощностью 1 кВт с использованием монохроматора Solar ТП DM 160. Спектр излучения регистрировался монохроматором-спектрографом Solar ТП MS 7504i, оснащенный в качестве детектора цифровой камерой с кремниевой ПЗС-матрицей (ПЗС – микросхема, использующая технологию приборов с зарядовой связью).

Результаты исследований и их обсуждение

Синтезированные материалы представляли собой твердые агломераты серого или черного цвета. С повышением содержания алюминия в исходной смеси увеличивалась их механическая прочность. Электронно-микроскопический анализ экспериментальных образцов, результаты которого иллюстрирует рис. 1, показывает, что морфология синтезированных материалов меняется вместе с увеличением содержания алюминия в исходной смеси с пластинчатой на губчатую.

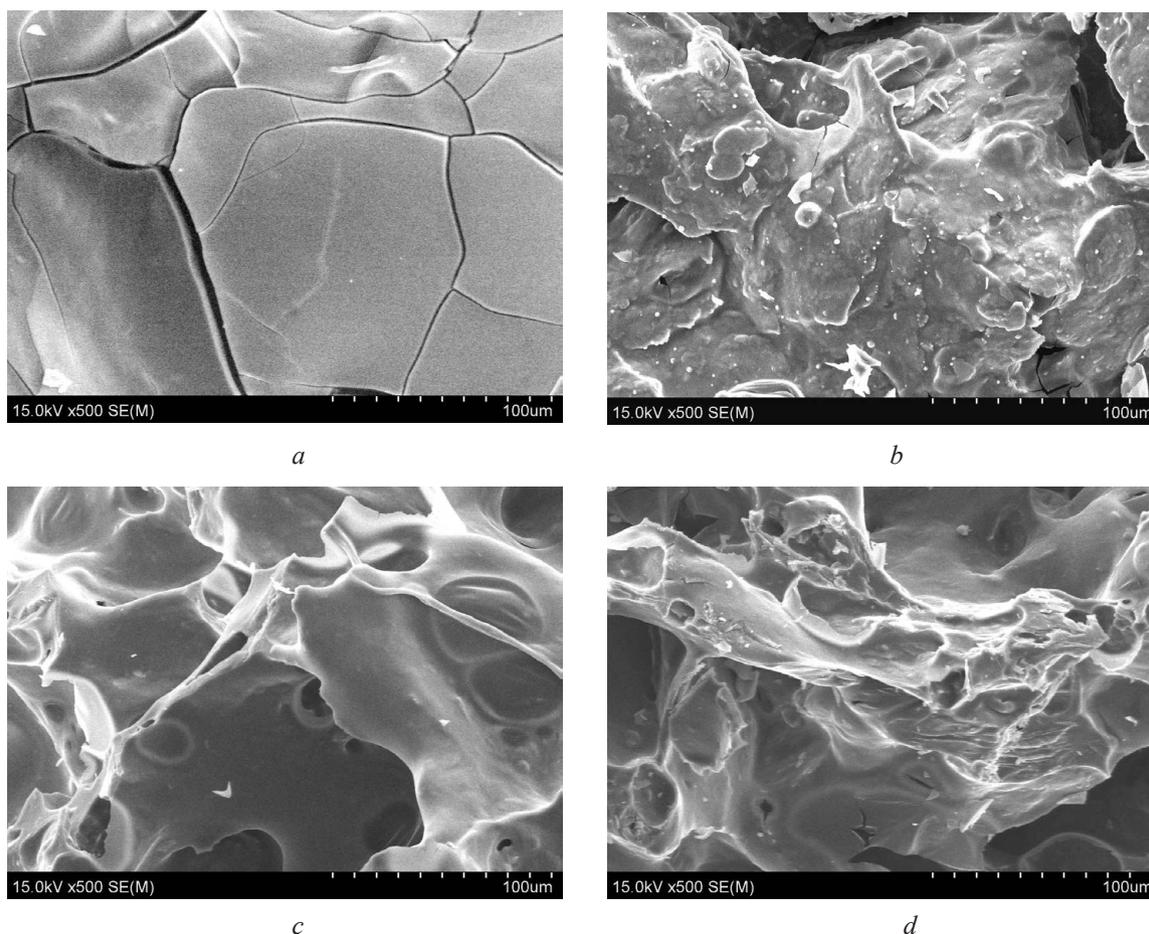


Рис. 1. Электронные фотографии поверхности образцов с различным содержанием алюминия в исходной смеси, масс. %: *a* – 5; *b* – 10; *c* – 19; *d* – 30

Fig. 1. Scanning electron images of the surface of the samples with different aluminum concentration, wt. %: *a* – 5; *b* – 10; *c* – 19; *d* – 30

Методом EDX в составе полученных образцов было обнаружено наличие углерода (C), азота (N), кислорода (O), серы (S) и алюминия (Al), содержание и соотношение концентраций которых менялись с увеличением доли алюминия в исходной смеси. Результаты EDX-анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав образцов, синтезированных из смесей с различным содержанием алюминия
Table 1. Element composition of the samples, synthesized from the mixtures with different aluminum content

Элемент / Element	Атомный номер элемента / Element atomic number	Массовая концентрация Al в исходной смеси, масс.%, при атомной концентрации Al, % / Mass concentration of Al in the initial mixture, wt.%, at atomic concentration of Al, %			
		5	10	19	30
O	8	53,24	47,87	54,83	41,24
C	12	17,20	18,72	20,57	23,60
N	7	17,19	17,98	15,61	18,14
Al	13	11,00	14,44	8,07	14,81
S	16	1,37	1,00	0,92	2,22

В стехиометрическом $g-C_3N_4$ отношении концентраций C и N равно 0,75 [11]. Однако в полученных образцах оно во всех случаях превысило стехиометрическое значение и изменялось с увеличением содержания алюминия в исходной смеси от 1,0005 при концентрации алюминия в исходной смеси 5 масс.% до 1,31 при концентрации алюминия в исходной смеси 19 масс.%, что указывает на избыток углерода в синтезированном композите. Далее отношение концентраций C и N в образце с содержанием алюминия в исходной смеси 30 масс.% немного уменьшилось до 1,301. Однако можно утверждать о стабилизации состава композита при достижении массовой доли алюминия 19 масс.%, соответствующей по расчетам получению стехиометрического соединения Al и S – Al_2S_3 , на присутствие которого указывают и результаты рентгеновского анализа. В то же время в стехиометрическом Al_2S_3 отношении концентраций входящих в него элементов составляет 0,66. В полученных образцах композита данное отношение находится в диапазоне от 6,671 (30 масс.% Al) до 14,44 (10 масс.% Al), т. е. в конечном продукте металлический Al остается в существенном избытке по отношению к S. Прямой зависимости между содержанием алюминия в исходной смеси и составом итогового композита не наблюдается.

Результаты исследования синтезированных композитов методом РДА представлены на рис. 2. Широкая полоса в диапазоне $17^\circ-27^\circ$ охватывает рентгеновские пики, типичные для $g-C_3N_4$ ($27,65^\circ-27,80^\circ$) и для Al_2S_3 ($23,8^\circ$), что может служить свидетельством их присутствия в синтезированном композите. Рентгеновский анализ зафиксировал присутствие кристаллической фазы металлического Al, что подтверждается данными EDX-анализа.

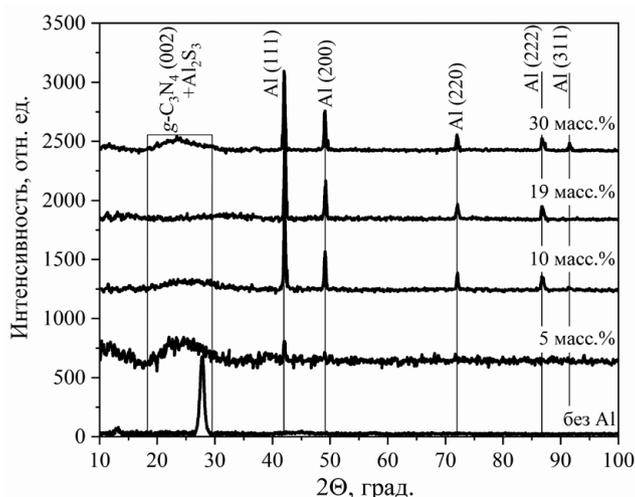


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы материалов, синтезированных при различном содержании алюминия в исходной смеси
Fig. 2. X-ray diffractograms of materials, synthesized from the mixtures with different aluminum content

На рис. 3 представлены спектры фотолюминесценции синтезированных материалов. Максимум интенсивности фотолюминесценции при увеличении массовой доли алюминия смещается в область больших длин волн – с 534 на 560 нм. Максимум интенсивности фотолюминесценции объемного $g\text{-C}_3\text{N}_4$, полученного методом пиролитического разложения, находится на длине волны 468 нм (рис. 3). Значения ширины полосы фотолюминесценции для образцов с различным содержанием Al приведены в табл. 2. Ширина пиков остается практически неизменной, однако при этом интенсивность фотолюминесценции снижается при росте концентрации алюминия (рис. 3, вставка).

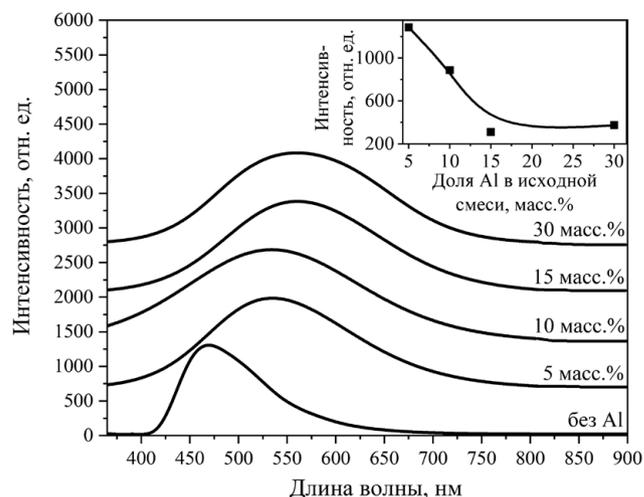


Рис. 3. Нормированные по интенсивности спектры фотолюминесценции при комнатной температуре материалов, синтезированных с различным содержанием алюминия в исходной смеси: вставка – зависимость интенсивности фотолюминесценции от массовой доли Al в исходной смеси

Fig. 3. Intensity normalized room temperature photoluminescence of materials, synthesized from the mixtures with different aluminum content: photoluminescence intensity vs. aluminum mass content are presented in the insert

Таблица 2. Спектральная ширина полосы фотолюминесценции материалов, синтезированных с различным содержанием алюминия в исходной смеси

Table 2. Photoluminescence spectral band width of materials, synthesized from the mixtures with different aluminum content

Содержание Al, масс.% / Al content, wt.%	5	10	15	30
Спектральная ширина, нм / Spectral width, nm	222,408	221,160	218,960	223,534

Известно, что в процессе термического разложения тиомочевины сначала происходит образование тиоциановой кислоты с выделением аммиака [12], а затем образуются серосодержащие летучие соединения – дисульфид углерода (CS_2) и сульфид водорода (H_2S) [12]. Далее происходит образование меламина, который через цепочку химических реакций преобразуется в мелам, мелем и мелон. Полимеризация молекул мелона приводит к формированию $g\text{-C}_3\text{N}_4$ [11]. Принимая это во внимание, целесообразно предположить, что выделяющийся H_2S в поставленных экспериментах реагировал с металлическим порошком. Отмечено, что герметизирующая тигель алюминиевая фольга при малых концентрациях порошка алюминия в исходной смеси подвергалась интенсивной коррозии – очевидно, под воздействием H_2S . По мере роста содержания алюминиевой пудры в исходной смеси воздействие H_2S на алюминиевую фольгу уменьшалось, что говорит о протекании реакции с алюминием в исходной смеси.

Результаты EDX- (табл. 1) и РЭМ-анализа (рис. 1) указывают на отсутствие высоких концентраций стехиометрического $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в составе полученных композитов, что также подтверждается длинноволновым сдвигом характерного пика интенсивности на спектрах фотолюминесценции (рис. 3). Широкий же рентгеновский пик в окрестности угла $23,8^\circ$ свидетельствует о том, что, помимо возможной суперпозиции сигналов от $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и Al_2S_3 , кристаллическая структура этих

материалов в значительной степени дефектна. Хотя РДА указывает на образование некоторого количества аморфного Al_2S_3 в синтезированном композите, однако только небольшая часть серы, образующейся при разложении тиомочевины, прореагировала с алюминием, на что также указывают результаты EDX-анализа. Известно, что Al_2S_3 – неустойчивое соединение, и в присутствии влаги происходит его гидролиз, продуктами которого являются $Al(OH)_3$ и H_2S . В пользу данного предположения говорят обнаружение большого количества сероводорода при измельчении полученных композитов, а также высокая концентрация кислорода в композитах, выявленная в процессе EDX-анализа.

Присутствие большой концентрации металлического алюминия также может являться причиной сдвига положения максимума интенсивности фотолюминесценции. При содержании алюминия в исходной смеси от 5 до 15 масс.% смещение пика фотолюминесценции сопровождается заметным снижением его интенсивности. Поскольку эти изменения практически исчезают при более высоких концентрациях алюминия, можно заключить, что при таких концентрационных соотношениях контролируемое алюминием образование химических соединений прекратилось. Это качественно подтверждают результаты РДА.

Выводы

1. Сравнивая полученные результаты со свойствами $g-C_3N_4$, синтезированного ранее из тиомочевины без каких-либо добавок [1, 4], можно заключить, что присутствие в исходной смеси алюминия, по крайней мере при концентрациях 5 масс.% и более, влияет на процесс полимеризации молекул мелона. Вследствие этого образующийся $g-C_3N_4$ имеет дефектную кристаллическую структуру и демонстрирует при комнатной температуре фотолюминесценцию, более широкополосную, чем у легированного алюминием материала. При этом изменением концентрации алюминия можно контролировать интенсивность свечения и его распределение по спектру, т. е. управлять спектральной шириной полосы фотолюминесценции.

2. Установлено, что выделяющаяся при разложении тиомочевины сера ограничено взаимодействует с алюминием, образуя Al_2S_3 . Значительная же доля алюминия остается непрореагировавшей с продуктами разложения тиомочевины.

3. Легирование алюминием $g-C_3N_4$ в процессе его синтеза можно рассматривать как с точки зрения повышения электропроводности данных композитов, так и изменения их люминесцентных свойств. Это может быть использовано для разработки подходов к созданию оптоэлектронных устройств на основе $g-C_3N_4$.

Список литературы / References

1. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. (2020) Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*. (54), 226–230. DOI: 10.1134/S1063782620020049.
2. Wu Y., Wang Y., Li M. (2021) Progress in Photocatalysis of $g-C_3N_4$ and its Modified Compounds. *E3S Web of Conferences*. (233), 01114. DOI: 10.1051/e3sconf/202123301114.
3. Wen J., Xie J., Chen X., Li X. (2017) A Review on $g-C_3N_4$ -Based Photocatalysts. *Appl. Surf. Sci.* (391), 72–123. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.07.030.
4. Denisov N. M., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Borisenko V. E. (2019) Synthesis of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride from Thiourea. *Tech. Phys. Lett.* (45), 108–110. DOI: 10.1134/S1063785019020068.
5. Sudhaik A., Raizada P., Shandilya P., Jeong D.-Y., Lim J.-H., Singh P. (2018) Review on Fabrication of Graphitic Carbon Nitride Based Efficient Nanocomposites for Photodegradation of Aqueous Phase Organic Pollutants. *J. Ind. Eng. Chem.* (67), 28–51. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.07.007.
6. Zhu J., Xiao P., Li H., Carabineiro S. A. C. (2014) Graphitic Carbon Nitride: Synthesis, Properties, and Applications in Catalysis. *ACS Appl. Mater. Interface*. (6), 16449–16465. DOI: 10.1021/am502925j.
7. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leonenya M. S., Yablonskii G. P., Borisenko V. E. (2020) Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *J. Appl. Spectr.* (87), 9–14. DOI: 10.1007/s10812-020-00954-y.
8. Zhao Z., Sun Y., Dong F. (2015) Graphitic Carbon Nitride Based Nanocomposites: a Review. *Nanoscale*. (7), 15–37. DOI: 10.1039/C4NR03008G.
9. Chubenko E. B., Baglov A. V., Borisenko V. E. (2020) One-Step Synthesis of Visible Range Luminescent Multicomponent Semiconductor Composites Based on Graphitic Carbon Nitride. *Advanced Photonics Research*. (1), 2000004. DOI: 10.1002/adpr.202000004.

10. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leania M. S., Urmanov B. D., Borisenko V. E. (2021) Broad Band Photoluminescence of g-C₃N₄/ZnO/ZnS Composite Towards White Light Source. *Mater. Sci. Eng., B.* (267), 115109. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115109.
11. Thomas A., Fischer A., Goettmann F., Antonietti M., Muller J.-O., Schlogl R., Carlsson J. M. (2008) Graphitic Carbon Nitride Materials: Variation of Structure and Morphology and their Use as Metal-Free Catalysts. *J. Mater. Chem.* (18), 4893–4908. DOI: 10.1039/B800274F.
12. Moldoveanu S. C. (2019) *Pyrolysis of Organic Molecules*. Amsterdam, Elsevier Science Publ.

Вклад авторов

Максимов С. Е. выполнил синтез образцов, первичную обработку данных, подготовил материалы статьи.

Чубенко Е. Б. отвечал за обработку и интерпретацию полученных результатов, подготовку материалов статьи.

Борисенко В. Е. осуществил постановку задач для проведения исследования и редактирование статьи.

Кулак А. И. предложил химико-физическую интерпретацию наблюдаемых при синтезе образцов процессов.

Authors' contribution

Maksimov S. E. performed sample synthesis, formal data analysis, paper draft preparation.

Chubenko E. B. was responsible for data processing, results interpretation and paper draft preparation.

Borisenko V. E. formulated the tasks for the study and edited the paper draft.

Kulak A. I. proposed chemical and physical interpretation of the processes observed during the synthesis of samples.

Сведения об авторах

Максимов С. Е., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Чубенко Е. Б., к т. н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории материалов и структуры наноэлектроники научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Борисенко В. Е., д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Кулак А. И., академик, д. х. н., профессор, директор Института общей и неорганической химии НАН Беларуси

Information about the authors

Maksimov S. E., Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Research Laboratory of Materials and Structures of Nanoelectronics of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kulak A. I., Academician, Dr. of Sci. (Chem.), Professor, Director of the Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-69
E-mail: maksimov914@gmail.com
Максимов Сергей Евгеньевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-69
E-mail: maksimov914@gmail.com
Maksimov Sergey Evgenyevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.774

ПАССИВАЦИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СЛОЕМ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

В. В. ЕМЕЛЬЯНОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 28.12.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Пассивация пленочной токопроводящей системы интегральных схем делает ее более надежной за счет повышения устойчивости к электромиграции. Рассмотрена задача по изготовлению пассивирующего слоя на сформированной токопроводящей системе интегральной схемы, получаемой в едином технологическом цикле, включающем изотропное плазмохимическое травление слоя сплава алюминия на глубину 8–12 нм и изотропное плазмохимическое азотирование поверхности полученных токоведущих дорожек до достижения толщины нитрида алюминия 10–50 нм. Данная задача позволяет выполнить формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, травление в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам подложки, осаждение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм и многое другое.

Ключевые слова: интегральные схемы, токопроводящие системы, алюминиевая металлизация, пассивирующий слой, нитрид алюминия.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Емельянов, В. В. Пассивация токопроводящей системы интегральных схем слоем нитрида алюминия / В. В. Емельянов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16>.

PASSIVATION OF A CONDUCTIVE SYSTEM OF INTEGRATED CIRCUITS WITH A LAYER OF ALUMINUM NITRIDE

VICTOR V. EMELYANOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 28.12.2022

Abstract. Passivation of the film conductive system of integrated circuits makes it more reliable by increasing the resistance to electromigration. The problem of manufacturing a passivating layer on the formed current-conducting system of an integrated circuit, obtained in a single technological cycle, including isotropic plasma-chemical etching of an aluminum alloy layer to a depth of 8–12 nm and isotropic plasma-chemical nitriding of the surface of the obtained current-carrying tracks until the aluminum nitride thickness from 10 to 50 nm, is considered. This task makes it possible to form a dielectric film based on silicon dioxide on a silicon substrate with active regions, etch contact windows to active elements of the substrate in the dielectric film, deposit a barrier layer 0.005–0.050 μm thick, and deposit an aluminum alloy film 0.5–2.0 μm and much more.

Keywords: integrated circuits, conductive systems, aluminum metallization, passivation layer, aluminum nitride.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Emelyanov V. V. (2023) Passivation of a Conductive System of Integrated Circuits with a Layer of Aluminum Nitride. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16> (in Russian).

Введение

Задачей исследований являлось улучшение надежности пленочной токопроводящей системы за счет повышения ее устойчивости к электромиграции. Процесс массопереноса протекает преимущественно вблизи поверхности металлической пленки как наиболее дефектной области. Это объясняется свойствами непосредственно поверхности металла и контактирующими слоями с разными физическими характеристиками. Известно также, что формирование диэлектрических пленок на поверхности алюминия, в частности диоксида или нитрида кремния, существенно снижает скорость массопереноса. Данный факт объясняется пассивацией несвязанных электронов приповерхностных атомов алюминия, что уменьшает их электрическую активность и диффузионную подвижность. Однако в связи с тем, что формирование высокостабильных приборов предполагает, как правило, длительную (4–6 ч и более) термическую обработку готовых структур в целом, а алюминий является химически активным элементом, контакт алюминия с диэлектриком, например диоксидом кремния, приводит к раскислению последнего с образованием свободного кремния и оксида алюминия. Высвободившийся кремний растворяется в слое сплава алюминия, способствует формированию новых точечных дефектов, а образовавшийся оксид алюминия является центром зарождения новых дефектов типа алюмосиликатов за счет его взаимодействия с диоксидом кремния. Кроме того, оксид алюминия – это соединение с ионным типом химической связи, что способствует его участию в массопереносе за счет обменных процессов по типу $2Al^* + Al_2O_3 = 2Al + Al^*_2O_3$, когда металл и его оксид обмениваются атомами. Оба этих фактора приводят к снижению стабильности и надежности токопроводящих систем с диэлектрическими пассивирующими слоями. Высокая жесткость диэлектрических пленок способствует возникновению в них больших остаточных напряжений и усилению генерации точечных дефектов.

Наличие нитрида алюминия на поверхности токоведущих дорожек из сплава алюминия исключает взаимодействие между алюминием и диоксидом кремния. Нитрид алюминия химически очень инертен и не взаимодействует с диоксидом кремния. С алюминием возможен обмен атомами металла, что, однако, не приводит к каким-либо изменениям концентрации точечных дефектов. Атомы металла могут только отдавать электроны, в результате чего заряжаются положительно. Миграция положительных ионов металла по границе раздела «алюминий – нитрид алюминия» значительно затруднена вследствие наличия у азота дополнительной пары электронов, не участвующих в образовании химической связи в нитриде. Это приводит к формированию прочной донорно-акцепторной химической связи между азотом в составе нитрида алюминия и мигрирующим ионом металла. Таким образом, нитрид алюминия является не только хорошим барьером на пути взаимодействия алюминия с диоксидом кремния, но и своеобразным геттером точечных дефектов в слое сплава алюминия.

Методика формирования токопроводящих систем

Очевидным способом уменьшения растворимости кремния в алюминии является легирование алюминиевой пленки кремнием. Концентрация кремния в алюминии при этом выбирается близкой к составу эвтектики (98,68 % Al + 1,32 % Si). Так, например, известна пленочная токопроводящая система для кремниевых полупроводниковых приборов, представляющая собой пленку алюминия толщиной порядка 1 мкм заданной топологической конфигурации, легированную кремнием до концентрации 1–3 %.

Оценку устойчивости тонких пленок к электромиграции обычно проводят путем измерения времени t_p , при котором происходит разрыв токоведущей дорожки испытываемой тестовой структуры при повышенных температуре (до 250 °С) и плотности протекающего через структуру тока (около 10^6 А·см⁻²). Величина t_p называется временем разрушения или временем наработки

на отказ. Полученные при испытаниях данные экстраполируют на нормальные условия работы прибора. Математически связь между t_p и условиями испытаний выражается формулой

$$\frac{S}{t_p} = Fj^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где S – поперечное сечение проводника; F – эмпирический коэффициент, зависящий от характеристик токопроводящей системы, удельного сопротивления материала пленки, условий теплоотвода, особенностей тестовой структуры и т. п.; j – плотность тока через структуру; E_a – энергия активации процесса электромиграции; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура [1].

Из (1) видно, что при повышении степени интеграции, приводящей к уменьшению площади поперечного сечения проводников S и возрастанию плотности тока j , стойкость любой токопроводящей системы к электромиграции снижается. Поэтому прототип характеризуется недостатками, присущими рассмотренным выше техническим решениям, хоть и в меньшей степени. Даже такая токопроводящая система в ряде случаев не удовлетворяет современным требованиям по надежности вследствие неустойчивости к явлениям электромиграции. Резервом надежности системы является увеличение энергии активации E_a процесса. При повышении E_a всего на 0,1 эВ надежность токопроводящей системы увеличивается в 55 раз. Величина E_a зависит как от материала проводника и совершенства его кристаллической структуры, так и от особенностей его взаимодействия с контактирующими слоями.

Формирование пассивирующего слоя

Задача формирования пассивирующего слоя решается пассивацией всей поверхности токоведущих дорожек слоем нитрида алюминия и созданием за счет этого ловушек для точечных дефектов. Сущность данного решения поясняет рис. 1, где изображено поперечное сечение получаемой токопроводящей системы в составе интегральных схем. Токоведущая дорожка состоит из барьерного слоя, расположенного на поверхности диэлектрика первого уровня, слоя сплава алюминия, расположенного на поверхности барьерного слоя, и слоя нитрида алюминия поверх токоведущей дорожки из слоя сплава алюминия. Слой сплава алюминия в составе токоведущей дорожки защищен от контакта с диэлектриком первого уровня барьерным слоем, а от контакта с диэлектриком второго уровня – слоем нитрида алюминия, расположенным в том числе и на боковых поверхностях токоведущих дорожек [2]. Слой нитрида алюминия выполняет роль барьера между алюминием и диоксидом кремния, предотвращает их химическое взаимодействие и повышает энергию активации электромиграции.

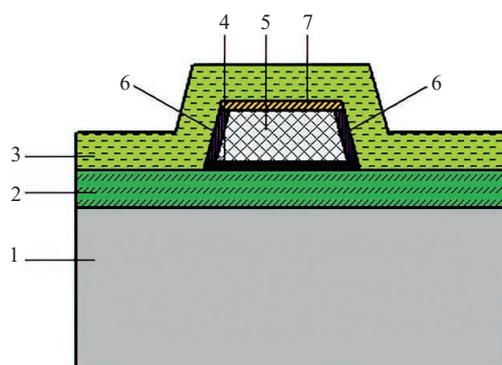


Рис. 1. Формирование пассивирующего слоя токопроводящей системы: 1 – полупроводниковая пластина; 2, 3 – диэлектрик первого и второго уровней соответственно; 4 – барьерный слой; 5, 6 – слой сплава алюминия и нитрида алюминия; 7 – нитрид титана

Fig. 1. Formation of a passivating layer of a conductive system: 1 – semiconductor wafer; 2, 3 – dielectric of the first and second levels respectively; 4 – barrier layer; 5, 6 – layer of aluminum alloy and aluminum nitride; 7 – titanium nitride

Активные элементы структуры формируют стандартными методами в соответствии с требованиями действующих технических документов. После формирования диэлектрической изоляции первого уровня и вскрытия в ней контактных окон на всю поверхность пластины на установ-

ке напыления типа Endura наносят пленку титана толщиной 20 нм, служащую барьерным слоем, затем пленку сплава алюминия с 0,5 % меди толщиной 0,8 мкм. Стандартными методами фотолитографии формируют рисунок электрической разводки и проводят анизотропное травление слоя сплава алюминия и барьерного слоя титана в анизотропной плазме газовой смеси BCl_3 , Cl_2 и N_2 при давлении 150–250 мТорр и плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см². После этого удаляется фоторезистивная маска и проводится изотропное травление поверхности токоведущих дорожек в хлорсодержащей плазме для удаления образовавшегося оксида алюминия [1]. Затем в том же технологическом цикле проводится откачка продуктов травления, рабочая камера заполняется азотом до давления 220 мТорр и выполняется азотирование поверхности дорожек металлизации в изотропном режиме. Глубину травления и толщину образовавшегося нитрида алюминия определяют по времени обработки для выбранного режима на основании предварительно установленной зависимости по данным электронно-микроскопических исследований.

Далее проводится термообработка структур при 450 °С для получения необходимой кристаллической структуры. Затем формируется пассивирующее покрытие (диэлектрик второго уровня) требуемой топологической конфигурации и выполняется стабилизирующая термообработка при температуре 400 °С в течение 6 ч, после чего осуществляется контроль функционирования. Энергия активации электромиграции определяется по результатам испытаний тестовых структур, изготовленных на основании зависимости $\ln(S/t_p Fj^2) - 1000/T$ [3]. Результаты испытаний представлены на рис. 2, из которого видно, что система металлизации для интегральных схем обеспечивает аналогичный выход годных кристаллов на операции контроля функционирования и характеризуется более высокой надежностью за счет повышения устойчивости к электромиграции.

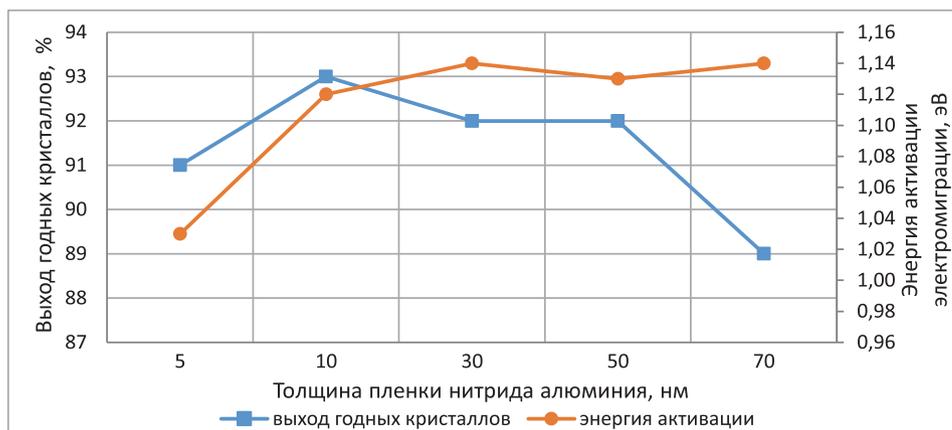


Рис. 2. Зависимость выхода годных кристаллов и энергии активации от толщины пленки нитрида алюминия

Fig. 2. Dependence of the yield of suitable crystals and activation energy on the thickness of the aluminum nitride film

Выводы

1. Пассивация токопроводящей системы интегральных схем служит для повышения надежности пленочной токопроводящей системы за счет повышения ее устойчивости к электромиграции. Чтобы при данной пассивации выполнить такие задачи, как формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, травление в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам подложки, осаждение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм, нанесение фоторезистивной маски методом фотолитографии, анизотропное плазмохимическое травление слоев сплава алюминия и барьерного слоя, удаление фоторезистивной маски с последующей термообработкой для получения требуемой кристаллической структуры металла, необходимо провести изотропное плазмохимическое травление слоя сплава алюминия на глубину 8–12 нм и изотропное плазмохимическое азотирование поверхности полученных токоведущих дорожек до достижения толщины нитрида алюминия 10–50 нм.

2. Сущность технического решения заключается в пассивации всей поверхности токоведущих дорожек слоем нитрида алюминия и создании за счет этого ловушек для точечных дефектов.

Список литературы

1. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. М.: Моск. госуд. ин-т электроники и матем., 2003. 48 с.
2. Емельянов, В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 1. С. 152–159. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.152.159.
3. Микросхемы интегральные. Технические требования к технологическому процессу. Система и методы операционного контроля: Стандарт отрасли ОСТ 1114.1012–99.

References

1. Grigoriev F. I. (2003) *Plasma-Chemical and Ion-Chemical Etching in Microelectronic Technology*. Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics Publ. 48 (in Russian).
2. Emelyanov V. (2020) Increasing the Resistance to Stress Migration of Film Structures Based on Aluminum in Microelectronics. *Electronics: Science, Technology, Business*. (1), 152–159. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.152.159 (in Russian).
3. Industry Standard OST 1114.1012–99. *Integrated Circuits. Technical Requirements for the Technological Process. System and Methods of Operational Control* (in Russian).

Сведения об авторе

Емельянов В. В., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: + 375 29 688-75-76
E-mail: emeljnov@bk.ru
Емельянов Виктор Викторович

Information about the author

Emelyanov V. V., Postgraduate at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: + 375 29 688-75-76
E-mail: emeljnov@bk.ru
Emelyanov Victor Victorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-17-25>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.793; 621.3.049.77

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ

Х. Т. ДОАН¹, Д. А. ГОЛОСОВ¹, ДЖ. ДЖАНГ², С. М. ЗАВАДСКИЙ¹,
С. Н. МЕЛЬНИКОВ¹, Т. Д. НГУЕН³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Сианьский политехнический университет (г. Сиань, Китайская Народная Республика)

³Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона
(г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам)

Поступила в редакцию 12.04.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В статье предложена модель для прогнозирования содержания металлических составляющих пленок сложных оксидов, наносимых методом реактивного магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени в среде Ag/O₂ рабочих газов. В модели учитывались коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии распыляемых металлов и их оксидов, распределение плотности ионного тока на мишени и скорости химической реакции образования оксидов этих металлов. Для верификации предложенной модели проведены исследования элементного состава пленок оксида титана-алюминия, нанесенных магнетронным распылением Ti-Al составной мишени в среде Ag и Ag/O₂ рабочих газов. Установлено, что модель адекватно описывает изменение содержания металлов в нанесенных пленках при изменении потока кислорода в камеру. Погрешность моделирования – не более 10 %, что позволяет применять модель для прогнозирования содержания металлов в пленке при реактивном распылении двухкомпонентных составных мишеней.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, составная мишень, тонкие пленки, элементный состав, модель реактивного распыления, оксид титана-алюминия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках совместных научных проектов № T22КИТГ-023 (2022YFE0123400) и № T22КИТГ-027 (2022YFE0122900) при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства науки и технологии Китайской Народной Республики.

Для цитирования. Модель процесса реактивного магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени / Х. Т. Доан [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-17-25>.

MODEL OF REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING OF A TWO-COMPONENT COMPOSITE TARGET

HOANG T. DOAN¹, DMITRIY A. GOLOSOV¹, JIN ZHANG², SERGEY M. ZAVADSKI¹,
SERGEY N. MELNIKOV¹, TUYEN D. NGUYEN³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Xi'an Polytechnic University (Xi'an, People's Republic of China)

³Le Quy Don Technical University (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam)

Submitted 12.04.2023

Abstract. The article proposes a model for predicting the content of metal components of complex oxide films deposited by reactive magnetron sputtering of a two-component composite target in Ar/O₂ gas mixture. The model takes into account the sputtering yield and ion-electron emission coefficients of the sputtered metals and their oxides, the distribution of the ion current density on the target, and the rate of the chemical reaction of the formation of oxides of these metals. To verify the proposed model, studies of the elemental composition of titanium-aluminum oxide films deposited by magnetron sputtering of a Ti-Al composite target in Ar and Ar/O₂ gas mixture were carried out. It has been established that the model adequately describes the change in the content of metals in the deposited films with a change in the oxygen flow into the chamber. The simulation error does not exceed 10 %, this makes it possible to use the proposed model for predicting the content of metals in a film during reactive sputtering of two-component composite targets.

Keywords: reactive magnetron sputtering, composite target, thin films, elemental composition, reactive sputtering model, titanium-aluminum oxide.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research was carried out within the framework of joint scientific projects No T22KITG-023 (2022YFE0123400) and No T22KITG-027 (2022YFE0122900) with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research and the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China.

For citation. Doan H. T., Golosov D. A., Jin Zhang, Zavadski S. M., Melnikov S. N., Nguyen T. D. (2023) Model of Reactive Magnetron Sputtering of a Two-Component Composite Target. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-17-25> (in Russian).

Введение

Сложные оксиды представляют собой семейство материалов, которые в зависимости от состава и структуры обладают множеством различных свойств, включая ферромагнетизм, сегнетоэлектричество, пьезоэлектричество, высокотемпературную сверхпроводимость, гигантское магнитосопротивление и их комбинации, такие как мультиферроичность [1]. Данные оксиды находят все большее применение в качестве функциональных слоев не только в сенсорах, устройствах катализа, преобразования и хранения энергии, но и в микроэлектронике. В настоящее время улучшение функциональных свойств пленок сложных оксидов в основном происходит за счет расширения их спектра и усложнения состава [2]. Однако свойства таких материалов крайне чувствительны к элементному составу и структурному устройству. Это предъявляет жесткие требования к процессу формирования пленок. Метод нанесения должен обеспечивать воспроизводимое от процесса к процессу повторение структуры, элементного и фазового составов наносимых слоев.

Одним из перспективных способов формирования пленок сложных оксидов является метод реактивного магнетронного распыления составных мишеней, т. е. мишеней, состоящих из матрицы одного металла со вставками других металлов [3]. Метод позволяет получать многокомпонентные пленки с произвольным количеством и содержанием элементов при использовании одного магнетрона. Главный недостаток данного метода – сложность подбора размера вставок для получения требуемого содержания элементов в пленке. Практика показывает, что при магнетронном распылении составных мишеней состав наносимых пленок зависит от ряда факторов (площади вставок, коэффициента распыления каждого из элементов, распределения плотности ионного тока на мишени, энергии бомбардирующих мишень ионов и т. д.) [4]. При реактивном распылении процессы в камере значительно усложняются, и состав наносимых пленок также зависит от реакционной способности материалов мишени и давления реактивного газа. В данном случае применение методов компьютерного моделирования является единственным способом

для определения оптимальных размеров элементов составной мишени и параметров процесса нанесения с точки зрения получения пленок с заданным составом [5].

Для прогнозирования состава наносимых пленок при реактивном магнетронном распылении был предложен ряд моделей, которые в основном базируются на принципах, описанных С. Бергом в [6]. В этой модели проанализированы потоки распыленного материала и реактивного газа, скорости хемосорбции реактивного газа поверхностями мишени, подложками и стенками вакуумной камеры, что позволяет для заданного тока разряда магнетрона и расхода реактивного газа рассчитать скорость нанесения и среднюю стехиометрию наносимых пленок. В последующих работах модель Берга применялась для моделирования процессов нанесения пленок ряда оксидов и нитридов. Однако большинство этих работ было сосредоточено на моделировании реактивного нанесения пленок простых оксидов или нитридов. И только несколько статей посвящено моделированию и прогнозированию состава многокомпонентных пленок [7–10]. При этом отсутствуют работы по прогнозированию состава наносимых пленок при реактивном магнетронном распылении составных мишеней. Таким образом, целью исследований авторов статьи являлась разработка математической модели для прогнозирования состава металлических компонентов пленки тройных систем, таких как $Me_{1-x}Me_xO_y$, наносимых реактивным магнетронным распылением составной мишени, состоящей из двух металлов.

Описание модели

В рассматриваемой модели предполагается, что составная планарная мишень распыляется аксиальной магнетронной распылительной системой (МРС). Мишень состоит из двух металлов *A* и *B* (рис. 1), распыляется в среде Ar/O_2 рабочих газов при давлении в камере менее 0,1 Па. Из-за низкой энергии ионов распыление происходит только из самых верхних атомных слоев и только в виде атомов. Эмиссия частиц более высокого порядка (кластеров Me_2O , MeO и т. д.) на два порядка меньше, чем скорость распыления атомов, и поэтому в модели не учитывалась. Распыление мишени идет только в зоне распыления (рис. 1, *a*). В МРС зона распыления определяется конфигурацией магнитной ловушки и для аксиальных планарных магнетронов представляет собой кольцо, ограниченное двумя радиусами R_{min} и R_{max} . При равномерном распределении плотности бомбардирующих мишень ионов в зоне распыления скорость распыления каждого из материалов должна быть пропорциональна площадям, занимаемым частями мишени в зоне распыления. Однако в МРС распределение плотности бомбардирующих мишень ионов неравномерное (рис. 1, *b*).

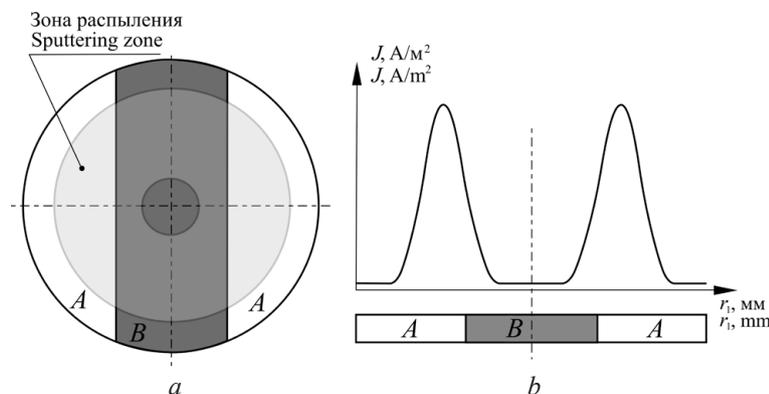


Рис. 1. Схема составной мишени (*a*) и распределение плотности ионного тока на ее поверхности (*b*)
Fig. 1. Scheme of a composite target (*a*) and distribution of the ion current density on the target surface (*b*)

Плотность ионного тока имеет максимум на радиусе \bar{R} и спадает до нуля по краям зоны распыления на радиусах R_{min} и R_{max} . В планарных аксиальных МРС распределение плотности ионного тока на поверхности мишени с достаточной точностью может быть аппроксимировано симметричной гауссианой

$$j_i(r_1) = \frac{I_i}{\sqrt{2\pi^3} (R_{min} + R_{max}) \sigma} \exp \left[-\frac{(r_1 - \bar{R})^2}{2\sigma^2} \right], \quad \sigma = \frac{R_{max} - R_{min}}{6}, \quad (1)$$

где r_1 – текущий радиус точки распыления; I_i – ионный ток мишени, который связан с током разряда магнетрона I_r соотношением

$$I_i = \frac{I_t}{1 + \gamma_t}, \quad (2)$$

γ_t – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени.

При распылении в среде Ar скорость распыления материала

$$v = \frac{I_i}{e} Y_t, \quad (3)$$

где Y_t – коэффициент распыления материала мишени; e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В случае распыления двух материалов количество распыленных атомов с каждой части мишени определяется количеством бомбардирующих эту часть мишени ионов и коэффициентом распыления каждой из частей мишени:

$$v^A = \frac{I_i^A}{e} Y_t^A; \quad v^B = \frac{I_i^B}{e} Y_t^B, \quad (4)$$

где $I_i^A, I_i^B, Y_t^A, Y_t^B$ – частичные ионные токи и коэффициенты распыления частей мишеней A и B соответственно.

В случае распыления двух материалов частичные ионные токи можно рассчитать по формулам:

$$I_i^A = \int_S j_i^A(r_1, \theta) dS; \quad I_i^B = \int_S j_i^B(r_1, \theta) dS, \quad (5)$$

где j_i^A, j_i^B – плотности ионного тока, приходящиеся на части мишеней A и B ; θ – полярный угол на мишени.

Формулы (4), (5) позволяют рассчитать долю каждого из металлов в наносимой пленке при магнетронном распылении составной мишени в среде Ar. При условии, что все распыленные частицы достигают подложки и равномерно распределяются в растущей пленке, атомное содержание металлов A и B :

$$X^A = \frac{v^A}{v^A + v^B} 100; \quad X^B = \frac{v^B}{v^A + v^B} 100. \quad (6)$$

При реактивном магнетронном распылении к основному рабочему газу (Ar) в камеру добавляется реактивный газ (O_2). В данном случае на поверхностях мишени, растущей пленки и стенках камеры происходят адсорбция реактивного газа и гетерогенная химическая реакция образования соединения. Скорость адсорбции реактивного газа поверхностью зависит от парциального давления реактивного газа p_R и температуры газа T

$$F_R = \frac{p_R}{\sqrt{2\pi k T m_R}}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; m_R – масса молекулы реактивного газа.

Химические реакции образования оксидов происходят на всех вовлеченных поверхностях (мишени, подложке, стенках камеры). Но на содержание металлов в пленке влияют только процессы на мишени. В результате химической реакции на поверхности мишени образуется пленка оксида. Однако на мишени одновременно с образованием пленки происходит ее удаление распылением. При этом в стационарном состоянии можно считать, что часть мишени θ_i покрыта соединением с коэффициентом распыления Y_{Co} , а оставшаяся часть поверхности $(1 - \theta_i)$ не покрыта соединением и имеет коэффициент распыления чистого металла Y_{Me} . Бомбардирующий мишень поток ионов распыляет образующееся соединение с покрытой части поверхности мишени θ_i и атомы металла с непокрытой $(1 - \theta_i)$ ее части. Мгновенный баланс частиц на поверхности мишени определяется двумя конкурирующими процессами: формированием соединения MeO_z на непокрытой $(1 - \theta_i)$ и распылением соединения с покрытой θ_i частей поверхности. В данном случае уравнение для поверхности мишени приобретает вид

$$\frac{2}{z} \alpha_s F_R (1 - \theta_i) = Y_{Co} \frac{I_t}{e(1 + \gamma_{Co})} \theta_i, \quad (8)$$

где z – стехиометрический индекс кислорода в соединении; α_s – коэффициент, учитывающий скорость химической реакции образования оксида; Y_{Co} , γ_{Co} – коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии оксида.

Решение этого уравнения позволяет определить степень покрытия каждой части мишени адсорбированными атомами реактивного газа. Зная степень покрытия соединением каждой части мишени, можно рассчитать скорость распыления металлов A и B . Металл распыляется как с непокрытых v_{Me1} , так и с покрытых v_{Me2} участков мишени за счет распыления соединения. Общее количество распыленных с определенного участка мишени атомов материала мишени

$$v = v_{Me1} + v_{Me2}. \quad (9)$$

Количество атомов материала мишени, распыленных в единицу времени с участков, непокрытых и покрытых соединением, рассчитывается соответственно по формулам:

$$v_{Me1} = Y_{Me} \frac{I_t}{e(1 + \gamma_{Me})} (1 - \theta_t); \quad v_{Me2} = \frac{Y_{Co}}{(z + 1)} \frac{I_t}{e(1 + \gamma_{Co})} \theta_t. \quad (10)$$

В случае распыления двух материалов с использованием формул (6)–(10) можно рассчитать долю каждого металла в нанесенной пленке при определенном парциальном давлении реактивного газа.

Верификация модели

Для верификации предложенной модели проведены исследования по нанесению пленок оксида титана-алюминия магнетронным распылением Ti-Al составных мишеней в среде Ar и Ar/O₂ рабочих газов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

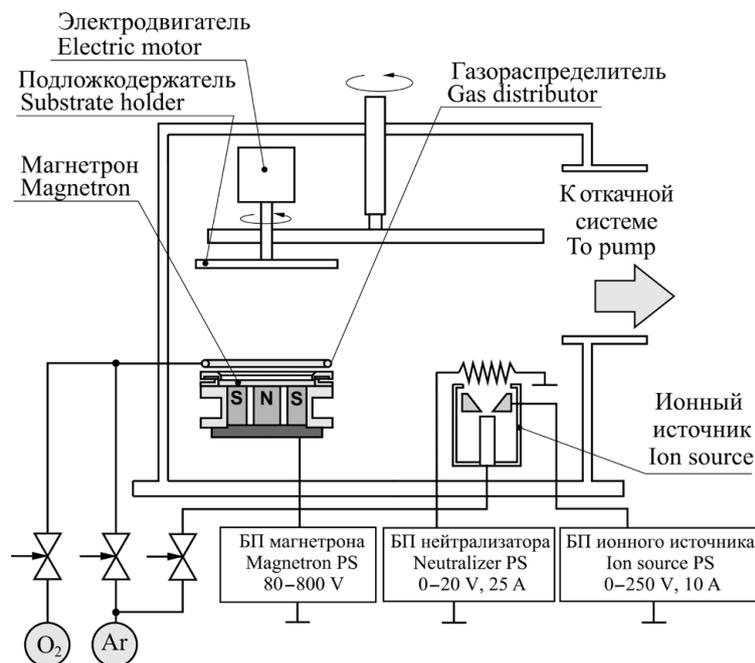


Рис. 2. Схема установки магнетронного нанесения тонких пленок FERO-001
Fig. 2. Experimental setup for magnetron deposition of thin films FERO-001

Камера вакуумной установки ВУ-1Б была оборудована MAPC.011-80 с мишенью Ø80 мм, ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя ЕНРМ.100.005 и вращаемым подложкодержателем. Для распыления использовались Ti-Al-мишени с разным содержанием алюминия. Составные мишени TiAl-10 и TiAl-20 (рис. 3, а, б) представляли собой Ti-основу (99,5 % чистоты) Ø80 мм и толщиной 5 мм, в которую были впрессованы четыре цилиндрических Al-вставки (99,9 % чистоты). Вставки диаметрами 6 и 8 мм соответственно были равномерно распределены по диаметру 46 мм.

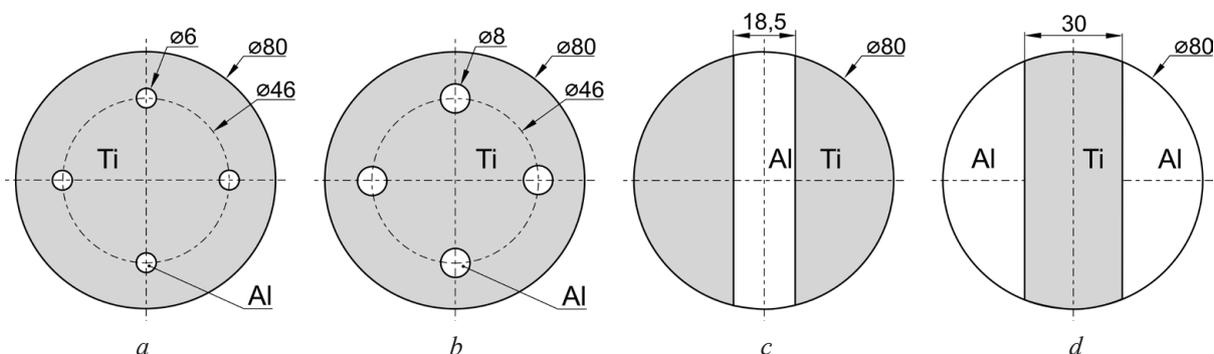


Рис. 3. Схема Ti-Al составных мишеней: *a* – TiAl-10; *b* – TiAl-20; *c* – TiAl-40; *d* – TiAl-70
Fig. 3. Scheme of Ti-Al compound targets: *a* – TiAl-10; *b* – TiAl-20; *c* – TiAl-40; *d* – TiAl-70

Мишень TiAl-40 состояла из трех частей – центральной Al-вставки шириной 18,5 мм и двух боковых Ti-сегментов (рис. 3, *c*), TiAl-70 – из центральной Ti-вставки шириной 30 мм и двух боковых Al-сегментов (рис. 3, *d*). При этом размеры Al-вставок подбирались так, чтобы атомное соотношение Al/Ti в наносимых пленках, рассчитанное по методике [4], составляло 1:9 для мишени TiAl-10, 2:8 – для TiAl-20, 4:6 – для TiAl-40 и 7:3 – для TiAl-70. В ходе экспериментов подложка из монокристаллического кремния *n*-типа ЭКЭС-0.01 (100) устанавливалась на подложкодержатель на расстоянии 120 мм от поверхности мишени магнетрона. Смещение оси подложкодержателя относительно оси магнетрона составляло 100 мм. Скорость вращения подложки 24,5 об/мин. Камера вакуумной установки откачивалась до давления 10^{-3} Па, и производилась ионная очистка подложек. Для этого в ионный источник подавался Ag, поток которого составлял 20 мл/мин. Время очистки, напряжение и ток разряда во всех экспериментах были постоянными: $t = 2$ мин, $U_d = 90$ В, $I_d = 6$ А. Затем наносили пленки. Распыление Ti-Al-мишеней осуществлялось в Ag/O₂ смеси газов при общем расходе газов 60 ссст и концентрации кислорода в смеси газов (Γ_{O_2}) от 0 до 25 %. Во всех экспериментах использовали режим стабилизации тока разряда магнетрона $I_t = 1,5$ А (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, коэффициент заполнения 80 %). Толщина нанесенных пленок составляла около 100 нм и регулировалась временем нанесения. Элементный состав пленок анализировали методом атомной эмиссионной спектроскопии на оптико-эмиссионном спектрометре тлеющего разряда GD-Profilier 2 (HORIBA Jobin Yvon S.A.S.). Первоначально исследовали элементный состав пленок, нанесенных при распылении Ti-Al составных мишеней в среде Ar. Данные о содержании алюминия в пленках приведены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрация алюминия в пленках Ti_{1-x}Al_x
Table 1. Aluminum concentration in Ti_{1-x}Al_x films

Мишень / Target	C _{Al} , ат.%		
	Эксперимент / Experiment	Предварительное моделирование / Preliminary simulation	Уточненное моделирование / Refined simulation
TiAl-10	10,2	10,2	9,8
TiAl-20	16,1	19,6	15,5
TiAl-40	35,6	40,8	36,0
TiAl-70	65,3	69,5	66,2

Как видно из табл. 1, результаты экспериментальных исследований показали меньшие значения содержания алюминия в нанесенных пленках по сравнению с предварительными расчетными данными. Это отклонение связано с тем, что при расчетах принимались табличные данные коэффициентов распыления титана и алюминия при энергии бомбардирующих ионов 300 эВ ($Y_{Al} = 0,65$, $Y_{Ti} = 0,33$) [11]. В магнетронном разряде средняя энергия бомбардирующей мишенью ионов составляет порядка 0,6 от напряжения разряда [12]. При распылении Ti-Al составных мишеней напряжение разряда магнетрона изменялось от 296 до 348 В, что соответствует средней энергии ионов порядка $E_i = 180$ –210 эВ. При таких энергиях ионов коэффициенты распыления

алюминия и титана составляют $Y_{Al} = 0,35$, $Y_{Ti} = 0,20$. При этом соотношения этих коэффициентов $Y_{Al}/Y_{Ti} = 1,96$, если $E_i = 300$ эВ, и $Y_{Al}/Y_{Ti} = 1,75$, если $E_i = 200$ эВ. Поэтому с использованием формул (1)–(6) и значений $Y_{Al} = 0,35$, $Y_{Ti} = 0,20$ провели уточненные расчеты содержания металлов в пленках. Погрешность моделирования не превышала 5 %, и данные коэффициенты использовали в дальнейшем при моделировании процессов реактивного распыления.

Получены зависимости элементного состава пленок от содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов при реактивном распылении Ti-Al-мишеней. На рис. 4 представлена зависимость атомного содержания элементов в нанесенных пленках Ti_{1-x}Al_xO_y от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при распылении мишени TiAl-40. В случае добавления кислорода в камеру наблюдалось резкое увеличение его содержания в пленке. При концентрации кислорода Γ_{O_2} в Ar/O₂ смеси газов до 7 % его содержание в пленках достигало 40 %. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} до 15 % содержание кислорода в пленках увеличивалось до 48 % и далее почти не зависело от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Однако особый интерес для моделирования представляет содержание металлов в нанесенных пленках без учета кислорода (рис. 5, кривые exp).

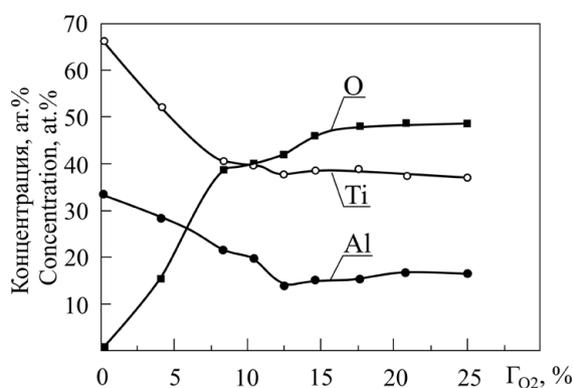


Рис. 4. Зависимость содержания элементов в пленках Ti_{1-x}Al_xO_y от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов (TiAl-40)

Fig. 4. Dependence of the content of elements in Ti_{1-x}Al_xO_y films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture (TiAl-40)

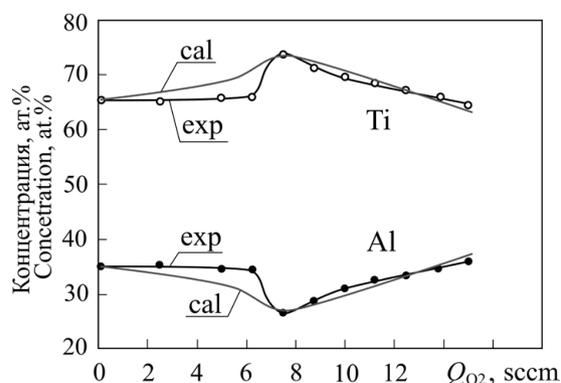


Рис. 5. Экспериментальные (exp) и расчетные (cal) зависимости содержания металлов в пленках от потока кислорода в камеру (TiAl-40)

Fig. 5. Experimental (exp) and calculated (cal) dependences of the content of metals in films on the flow of oxygen into the chamber (TiAl-40)

Как видно из рис. 5, резкое уменьшение содержания алюминия в пленке происходило при потоке кислорода в камеру Q_{O_2} более 6 sccm, и при $Q_{O_2} = 7,5$ sccm наблюдался минимум содержания алюминия – $C_{Al} = 26$ ат.%. В случае дальнейшего увеличения Q_{O_2} содержание алюминия в пленках практически линейно увеличивалось и достигало своего начального значения при $Q_{O_2} = 15$ sccm. Данное поведение связано с процессами формирования пленки оксида на поверхности Ti и Al частей мишени и различием скоростей окисления алюминия и титана. При $Q_{O_2} < 6$ sccm только малая доля титановой и алюминиевой частей мишени покрыта пленкой оксида, а образующиеся пленки оксидов эффективно удаляются распылением. В случае дальнейшего увеличения Q_{O_2} в первую очередь происходит окисление алюминия, что приводит к снижению скорости его распыления и, как следствие, к уменьшению его содержания в пленке.

Окисленный алюминий практически не поглощает кислород, и начинается интенсивное окисление титана. Это приводит к тому, что поверхность титановой части мишени также покрывается пленкой оксида, и скорость его распыления снижается. Дальнейшее изменение концентраций титана и алюминия в пленке определяется коэффициентами распыления их оксидов. С помощью формул (6)–(10) рассчитали содержание металлов в нанесенной пленке при распылении мишени TiAl-40 для исходных данных: $Y_{Al} = 0,35$, $Y_{Ti} = 0,2$; $\gamma_{Al} = 0,091$, $\gamma_{Ti} = 0,11$; $Y_{Al_2O_3} = 0,062$, $Y_{TiO_2} = 0,009$; $\gamma_{Al_2O_3} = 0,19$, $\gamma_{TiO_2} = 0,078$. Эмпирическими коэффициентами являются константы скорости химической реакции образования оксидов алюминия и титана. На рис. 5 кривые cal построены по результатам моделирования содержания металлов в нанесенной пленке с использованием коэффициентов скорости химической реакции $k_{Al_2O_3} = 2,35$ и $k_{TiO_2} = 1,00$.

Предложенная модель довольно точно описывает изменение содержания элементов в пленке при изменении потока кислорода в камеру. Аналогичные результаты получены в случае прогнозирования металлических составляющих в пленках при распылении мишеней TiAl-10, TiAl-20, TiAl-70. Погрешность моделирования – не более 10 %. Значительные отклонения наблюдались при небольших потоках кислорода в камеру, что, скорее всего, связано с тем, что в модели не учитывалось уменьшение парциального давления реактивного газа в камере за счет его поглощения поверхностями мишени и растущей пленки при малых значениях степени покрытия поверхностей мишени и пленки.

Выводы

1. Предложена модель для прогнозирования содержания металлических составляющих в пленках оксидов, наносимых реактивным магнетронным распылением двухкомпонентной составной мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Модель проверена экспериментально при реактивном распылении Ti-Al составных мишеней в среде Ar и Ar/O₂ рабочих газов. Установлено, что при реактивном распылении содержание металлов в пленке зависит от потока кислорода в камеру. Данное поведение связано с процессами формирования пленки оксида на поверхности Ti и Al частей мишени и различными скоростями окисления алюминия и титана.

2. При использовании коэффициентов распыления металлов $Y_{Al} = 0,35$, $Y_{Ti} = 0,20$ и коэффициентов ионно-электронной эмиссии металлов $\gamma_{Al} = 0,091$, $\gamma_{Ti} = 0,110$ погрешность моделирования при прогнозировании состава пленок для всех мишеней в случае распыления в среде Ar составила менее 5 %. При реактивном распылении предложенная модель позволяет предсказать содержание металлов в наносимой пленке с погрешностью менее 10 %.

Список литературы / References

1. Robertson J., Wallace R. M. (2015) High-K Materials and Metal Gates for CMOS Applications. *Materials Science and Engineering R*. (88), 1–41. DOI: 10.1016/j.mser.2014.11.001.
2. Madhuri K. V. (2014) Transition Metal Oxides and their Composite Thin Films. *Advanced Research in Engineering Sciences "ARES" Journal*. 2 (3), 2–13.
3. Nakano J., Miyazaki H., Kimura T., Goto T., Zhang S. (2004) Thermal Conductivity of Ytria-Stabilized Zirconia Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering. *J. Ceram. Soc. of Jap.* 112, S908–S911. DOI: 10.14852/jcersjsuppl.112.0.S908.0.
4. Golosov D. A., Melnikov S. N., Dostanko A. P. (2012) Calculation of the Elemental Composition of Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering of Mosaic Targets. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 48 (1), 52–59.
5. Depla D., Mahieu S. (ed.) (2008) *Reactive Sputter Deposition*. Springer Publ.
6. Berg S., Blom H. O., Larsson T., Nender C. (1987) Modeling of Reactive Sputtering of Compound Materials. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 5 (2), 202–207. DOI: 10.1116/1.574104.
7. Barankova H., Berg S., Nender C., Carlsson P. (1995) Hysteresis Effects in the Sputtering Process Using Two Reactive Gases. *Thin Solid Films*. 260 (2), 181–186. DOI: 10.1016/0040-6090(94)06501-2.
8. Dreer S., Krismer R., Wilhartitz P. (1999) Multidimensional Optimisation of Process Parameters by Experimental Design for the Deposition of Aluminium and Silicon Oxynitride Films with Predictable Composition. *Surface and Coatings Technology*. 114 (1), 29–38. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00017-1.
9. Moradi M., Nender C., Berg S., Blom H. O., Belkind A., Orban Z. (1991) Modeling of Multicomponent Reactive Sputtering. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 9 (3), 619–624. DOI: 10.1116/1.577376.
10. Martin N., Rousselot C. (1999) Modelling of Reactive Sputtering Processes Involving Two Separated Metallic Targets. *Surface and Coatings Technology*. 114 (2–3), 235–249. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00051-1.
11. Laegreid N., Wehner G. K. (1961) Sputtering Yields of Metals for Ar⁺ and Ne⁺ Ions with Energies from 50 to 600 eV. *J. Appl. Phys.* 32 (3), 365–369. DOI: 10.1063/1.1736012.
12. Goeckner M. J., Goree J. A., Sheridan T. E. (1991) Monte Carlo Simulation of Ions in a Magnetron Plasma. *IEEE Trans. Plasma. Sci.* 19 (2), 301–308. DOI: 10.1109/27.106828.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Доан Х. Т., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Голосов Д. А., к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник центра электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур (Центр 2.1) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Джанг Дж., к. т. н., научный сотрудник ведущей лаборатории провинции Шэньси в области технологии тонких пленок и оптических исследований Сианьского политехнического университета

Завадский С. М., к. т. н., доцент, начальник Центра 2.1 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Мельников С. Н., к. т. н., ведущий научный сотрудник Центра 2.1 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Нгуен Т. Д., к. т. н., преподаватель Вьетнамского государственного технического университета имени Ле Куй Дона

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-79
E-mail: dmgolosov@mail.ru
Голосов Дмитрий Анатольевич

Information about the authors

Doan H. T., Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Golosov D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Center of Electronic Technologies and Technical Diagnosis of Technological Media and Solid State Structures (Center 2.1) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Jin Zhang, Cand. of Sci., Researcher at the Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test of the Xi'an Polytechnic University

Zavadski S. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 2.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Melnikov S. N., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 2.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Nguyen T. D., Cand. of Sci., Lecturer at the Le Quy Don Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-79
E-mail: dmgolosov@mail.ru
Golosov Dmitry Anatol'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-26-33>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ИССЛЕДОВАНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОЛИКОРА И GaAs С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

Д. А. КОНДРАШОВ¹, Н. А. ПЕВНЕВА¹, А. В. ГУСИНСКИЙ¹,
А. А. ПАВЛЮЧИК², М. А. ГОНЧАРИК²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Минский НИИ радиоматериалов (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Для исследования S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов поликора и GaAs использованы векторный анализатор цепей P4-MVM-118 со специальной измерительной ячейкой и модифицированный метод Николсона–Росса–Вейра. Применение в P4-MVM-118 при аппроксимации в цифровой фильтрации полиномиальных критериев Чебышева позволило уменьшить искажение достигнутых приближений S-параметров. Использование цифровой фильтрации дало возможность исключить субъективную погрешность оператора при анализе и измерениях с наличием «шумовой» составляющей, качественно улучшить восприятие амплитудно-частотной характеристики и устранить неинформативное изменение показаний прибора в любой точке частотного диапазона. Получены зависимости амплитуд и фаз коэффициентов передачи и отражения, а также диэлектрической проницаемости исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, измерительная ячейка, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент передачи, метод Николсона–Росса–Вейра, поликор, GaAs.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Исследование S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов поликора и GaAs с помощью векторного анализатора цепей / Д. А. Кондрашов [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 26–33. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-26-33>.

ESTIMATION OF S-PARAMETERS AND DIELECTRIC PERMITTIVITY OF POLYCOR AND GaAs SAMPLES USING A VECTOR NETWORK ANALYZER

DENIS A. KONDRASHOV¹, NATALIA A. PEVNEVA¹, ALEXANDER V. GUSINSKY¹,
ALEXEI A. PAVLYUCHIK², MAYA A. GONCHARIK²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Minsk Research Institute of Radiomaterials (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.02.2023

Abstract. To study the S-parameters and dielectric permittivity of polycor and GaAs samples, a vector network analyzer R4-MWM-118 with a special measuring cell and a modified Nicholson–Ross–Weir method were used.

The use of polynomial Chebyshev criteria in R4-MWM-118 for approximation in digital filtering made it possible to reduce the distortion of the achieved approximations of S-parameters. The use of digital filtering made it possible to eliminate the subjective error of the operator in the analysis and measurements with the presence of a “noise” component, to improve qualitatively the perception of the amplitude-frequency characteristic and to exclude uninformative changes in the instrument readings at any point in the frequency range. The dependences of the amplitudes and phases of the transmission and reflection coefficients, as well as the dielectric permittivity of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz are obtained.

Keywords: vector network analyzer, measuring cell, dielectric permittivity, reflection coefficient, transmission coefficient, Nicholson–Ross–Weir method, polycor, GaAs.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kondrashov D. A., Pevneva N. A., Gusinsky A. V., Pavlyuchik A. A., Goncharik M. A. (2023) Estimation of S-Parameters and Dielectric Permittivity of Polycor and GaAs Samples Using a Vector Network Analyzer. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 26–33. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-26-33> (in Russian).

Введение

В последнее десятилетие наблюдается активное освоение миллиметрового диапазона длин волн в радиоэлектронике. Производители радиоэлектронной аппаратуры используют хорошо известные материалы или применяют инновационные технологии. Перед разработкой любого устройства следует досконально изучить физико-технические свойства используемых материалов, которые могут значительно повлиять на его выходные характеристики точности. Одними из самых информативных свойств материала являются его отражающая/пропускная способность и диэлектрическая проницаемость, которые можно определить с помощью векторного анализатора цепей. Большой интерес и широкое применение на практике находят такие материалы, как поликор и арсенид галлия (GaAs). Поликор представляет собой керамическую подложку на основе алюмооксидной керамики с содержанием Al_2O_3 99,7 %. Используется как основание при изготовлении высоконадежных микроминиатюрных схем и микросборок. Поликор обладает такими преимуществами, как теоретическая плотность, полированная поверхность, высокие электрофизические показатели. GaAs используется при изготовлении высокочастотных интегральных схем и дискретных микроэлектронных приборов. Целью исследований являлось определение S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов поликора и GaAs в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц.

Методика проведения расчетов и эксперимента

Измерительная установка включала разработанные в Центре 1.9 «Научно-производственно-образовательный инновационный центр СВЧ и их метрологического обеспечения» БГУИР векторный анализатор цепей (ВАЦ) P4-MVM-118 и измерительную ячейку для диапазона частот 78,33–118,10 ГГц. Принцип действия ВАЦ основан на раздельном выделении падающей на объект измерения, отраженной и прошедшей волн сверхвысокого частотного (СВЧ) сигнала. Напряжения, пропорциональные амплитудам падающей, отраженной и прошедшей волн, после усиления и вычисления по специальным алгоритмам преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль $|S_{11}|$ и фазу $\arg S_{11}$ коэффициента отражения, коэффициент стоячей волны, модуль $|S_{21}|$ и фазу $\arg S_{21}$ коэффициента передачи. Распознаваемая информация отображается в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат с отсчетом, при помощи маркера, значений находимых параметров в любой частотной точке диапазона рабочих частот ВАЦ.

Работа ВАЦ осуществляется следующим образом. Сигнал с выхода твердотельного генератора качающейся частоты поступает на вход измерительного СВЧ-тракта, к которому подключается объект измерений. СВЧ-сигнал, несущий информацию об определяемых S-параметрах, с выхода объекта измерений идет на блок обработки сигналов, который осуществляет ее преобразование и подачу на компьютер в форме сигналов, удобных для представления информации об установленных параметрах на ЖКИ. Упрощенная структурная схема векторного анализатора цепей представлена на рис. 1. Алгоритм проведения измерений с помощью ВАЦ с программным обеспечением (ПО) упрощенно можно свести к блок-схеме, приведенной на рис. 2.

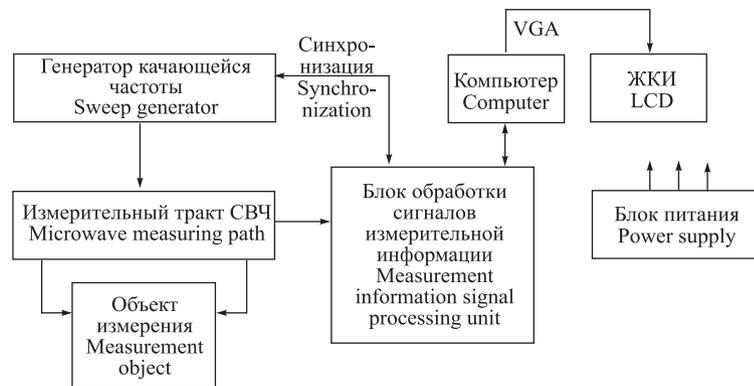


Рис. 1. Упрощенная структурная схема векторного анализатора цепей
Fig. 1. Simplified block diagram of the vector network analyzer

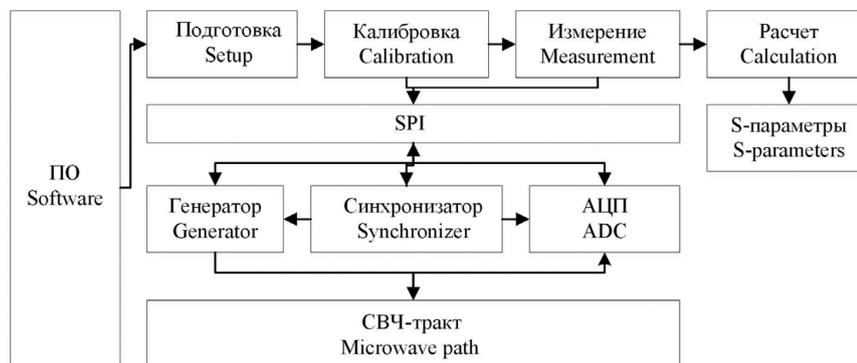


Рис. 2. Упрощенная блок-схема алгоритма проведения измерений S-параметров
Fig. 2. Simplified block diagram of the algorithm for performing measurements of S-parameters

Алгоритм функционирования программно-аппаратного комплекса содержит последовательность приведенных ниже операций.

1. Инициализация шины Serial Peripheral Interface (SPI). Происходит проверка подключения контроллера SPI к системе.

2. Инициализация серверной части ПО. Проводится проверка корректной работы всех блоков, подключенных к шине SPI, проверка готовности сервера к приему запросов клиента.

3. Инициализация клиентской части. Проверяется соединение с сервером. Клиент переводится в режим ожидания действий пользователя.

4. Когда система обнаруживает в очереди сообщений запрос пользователя на соединение с сервером, клиент выходит из режима ожидания и высылает сообщение серверу.

5. Сервер, получив уведомление от нового клиента, сохраняет информацию о появлении нового объекта на обслуживание в списке текущих клиентов, посылает ответ и устанавливает соединение с данным клиентом. При этом сервер остается доступным требованиям на обслуживание от других клиентов благодаря наличию очереди на обслуживание и общего перечня клиентов.

6. Клиенту приходит запрос на начало процедуры измерений.

7. Клиент высылает серверу строку инициализации для СВЧ-генератора, начальную и конечную частоты для задания диапазона измерений. Строка инициализации состоит из команд, которые воспринимает генератор, и может меняться в зависимости от модели генератора.

8. Сервер передает полученные сведения драйверу SPI, тот далее по каналу SPI в СВЧ-генератор. Но генератору требуется некоторое время на отработку команды, поэтому вводится искусственная задержка (вычисленная эмпирическим путем) в обработке запроса клиента.

9. Сервер возвращает клиенту уведомление об успешной инициализации генератора.

10. Клиент начинает процесс калибровки.

11. Клиент передает серверу код коммутации. Код коммутации представляет собой целое число и позволяет указать векторному анализатору, какой из S-параметров будет измеряться в данном случае.

12. Сервер передает полученные сведения драйверу SPI, тот далее в коммутатор, который, в свою очередь, в зависимости от кода коммутации переводит СВЧ-тракт в режим измерения одного из S-параметров.

13. Проводятся измерения выбранного S-параметра, оцифровываются результаты при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и передается массив из 512 точек (данные по двум каналам) в контроллер SPI. Массив кодов состоит из целых чисел без знака.

14. Сервер опрашивает буфер на предмет наличия массива первичных кодов и, получив их, отправляет массив клиенту в виде ответа-уведомления.

15. Клиент проводит обработку массива первичных кодов алгоритмами усреднения и сглаживания для уменьшения влияния посторонних шумов.

16. Клиент запоминает массив обработанных первичных кодов в стеке. Также запоминается номер шага калибровки.

17. Этапы 13–16 повторяются то количество раз, которое необходимо для выбранного типа калибровки.

18. Клиент начинает измерения.

19. Клиент передает серверу код коммутации.

20. Сервер передает полученные сведения драйверу SPI. Тот далее в синхронизатор, который, в свою очередь, в зависимости от кода коммутации переводит СВЧ-тракт в режим измерения одного из параметров.

21. Проводятся измерения выбранного S-параметра, оцифровываются результаты и передается массив из 512 точек (данные по двум каналам) в контроллер SPI и далее в буфер устройства.

22. Сервер опрашивает буфер на предмет наличия массива первичных кодов и, получив их, отправляет массив клиенту в виде ответа-уведомления.

23. Клиент проводит обработку массива первичных кодов алгоритмами усреднения и сглаживания для уменьшения влияния посторонних шумов.

24. Клиент запоминает массив обработанных первичных кодов в очереди на основе стека, также запоминается номер шага измерения.

25. Этапы 21–24 повторяются то количество раз, которое необходимо для выбранного типа измерения.

26. Клиент посылает серверу уведомление о том, что сервер может приступить к обработке сообщений от других клиентов в очереди. Связь между клиентом и сервером при этом не разрывается. Информация о диапазоне частот, запрошенных данным клиентом, сохраняется в процессе сервера. Это необходимо для последующей организации циклических измерений с постоянным обновлением результатов.

27. Клиент осуществляет математические преобразования над сохраненными массивами калибровки и массивами измерения для извлечения информации об S-параметрах измеряемого объекта.

28. Клиент рассчитывает значения массивов ослабления сигнала, фазы, модуля, коэффициента стоячей волны по напряжению.

29. Клиент производит обработку рассчитанных массивов алгоритмами усреднения и сглаживания для уменьшения влияния посторонних шумов.

30. Клиент пересчитывает массивы в координаты точек для отображения на мониторе компьютера.

31. Клиент отображает результаты измерений в виде графиков зависимости S-параметров от частоты в выбранном диапазоне измерения.

32. При проведении постоянных измерений клиент повторяет шаги с 21 по 32 в цикле, пока не поступит запрос от пользователя на завершение измерений.

В ВАЦ предусмотрена цифровая фильтрация на основе критерия Чебышева, которая позволяет:

- сглаживать незначительные по значению флуктуации на отдельных участках характеристики – усреднять отдельные участки характеристики;

- устранять выбросы в отдельных значениях характеристики, обусловленные выбросами в выходных сигналах генератора качающейся частоты (удалять пики);

- аппроксимировать выводимые на экран отдельные участки характеристик, придавать им монотонность – сглаживать отдельные участки характеристик.

Следует отметить, что почти всегда применение при аппроксимации в цифровой фильтрации полиномиальных критериев Чебышева позволяет уменьшить искажение уже достигнутых приближений. Использование цифровой фильтрации дает возможность исключить субъективную погрешность оператора при анализе и измерениях с наличием «шумовой» составляющей. Также

благодаря цифровой фильтрации улучшается качественное восприятие амплитудно-частотной характеристики и исключается неинформативное изменение показаний прибора в любой точке частотного диапазона. Особенно это эффективно в СВЧ-диапазонах, имеющих крайне малые уровни мощности сигнала в измерительном тракте.

Для измерений S-параметров был реализован метод Николсона–Росса–Вейра [1]. Методика измерений и алгоритм расчета диэлектрической проницаемости приведены в [2]. В качестве исследуемых выступали два образца из поликора толщиной 1,0 и 0,5 мм, образец из арсенида галлия GaAs, а в качестве эталонного образца – фторопласт, чья диэлектрическая проницаемость 2,1 согласно ГОСТ 14906. Измерения проводились при температуре 23,4 °С и влажности 42,1 %. Рабочие условия контролировались откалиброванным прибором Testo 605.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные с помощью P4-MVM-118 зависимости амплитуд и фаз коэффициентов передачи и отражения исследуемых образцов от частоты приведены на рис. 3–6. Из рисунков видно, что образцы GaAs заметно отличается приведенными характеристиками от остальных образцов; это отразилось при расчете значений его диэлектрической проницаемости (рис. 7).

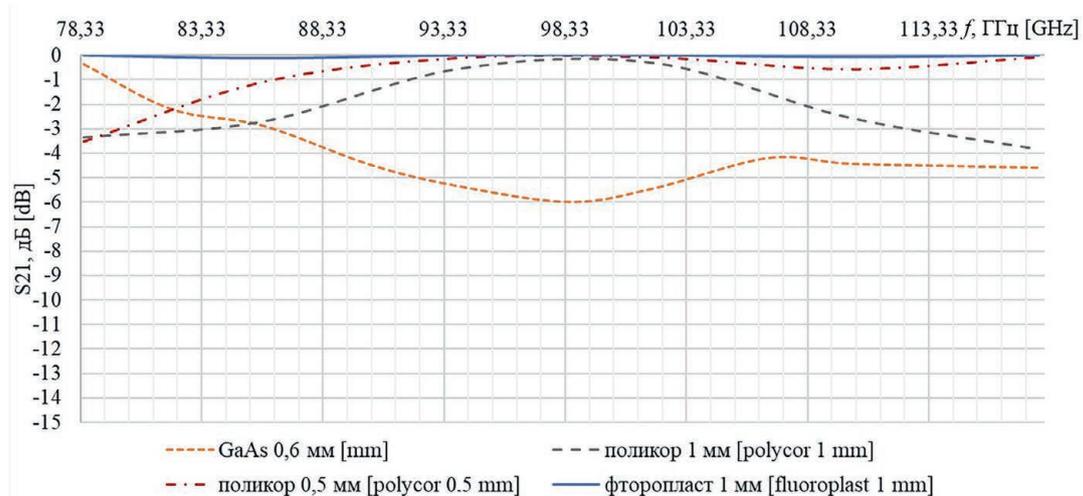


Рис. 3. Зависимость амплитуды коэффициента передачи исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц

Fig. 3. The dependence of the transmission coefficient's amplitude of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz

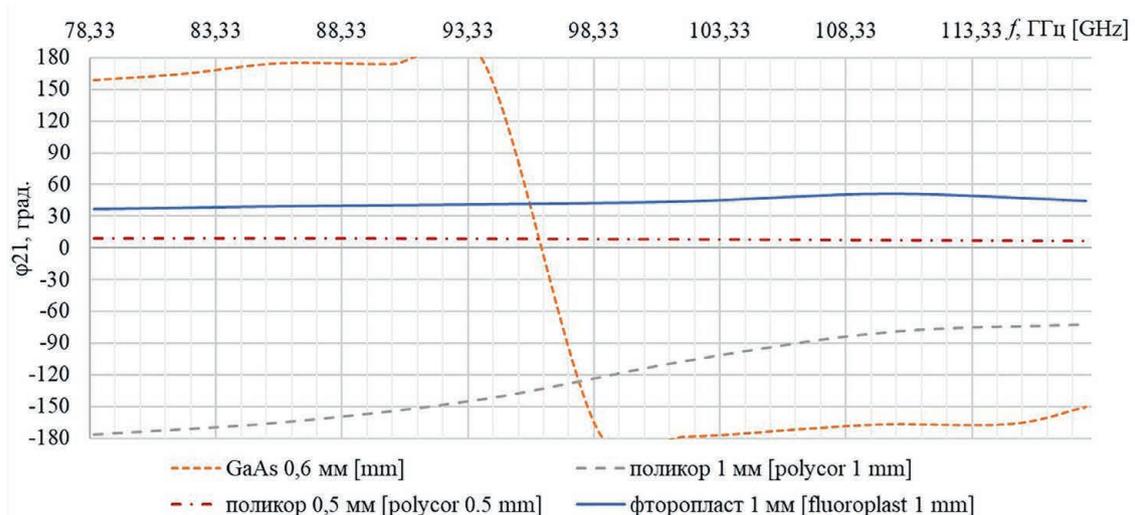


Рис. 4. Зависимость фазы коэффициента передачи исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц

Fig. 4. The dependence of the transmission coefficient's phase of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz

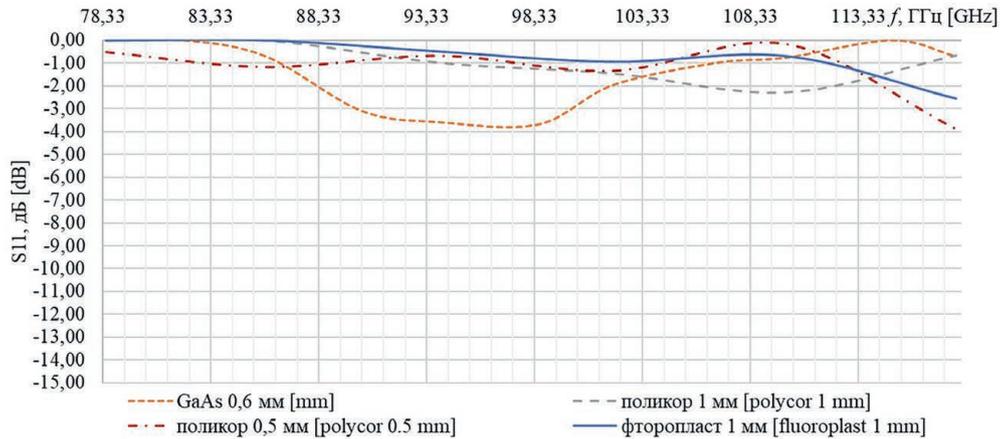


Рис. 5. Зависимость амплитуды коэффициента отражения исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц

Fig. 5. The dependence of the reflection coefficient's amplitude of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz

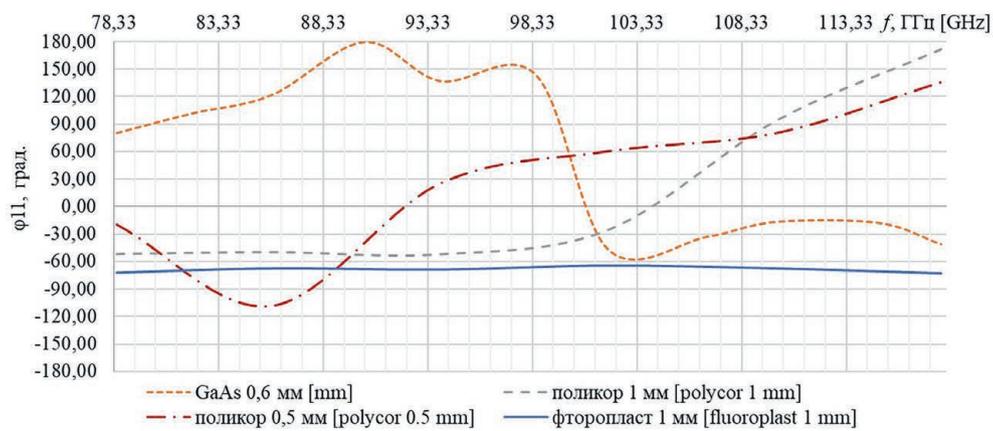


Рис. 6. Зависимость фазы коэффициента отражения исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц

Fig. 6. The dependence of the reflection coefficient's phase of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz

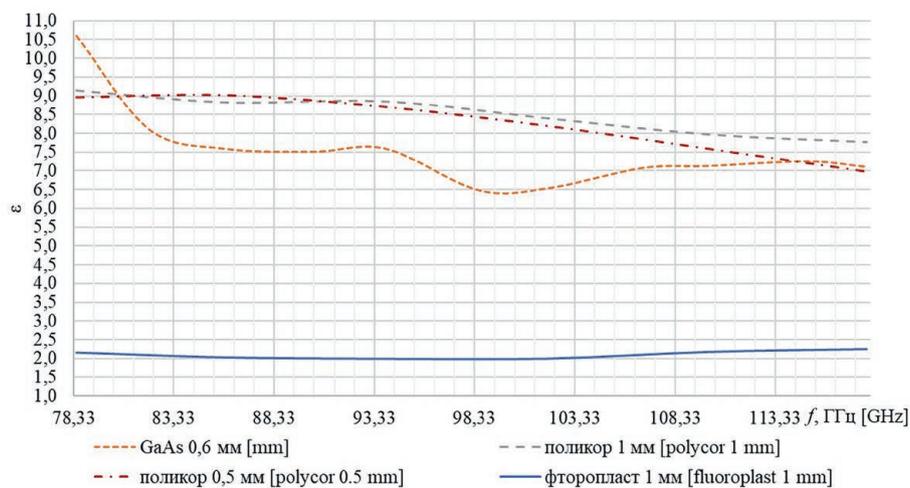


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости исследуемых образцов от частоты в диапазоне 78,33–118,10 ГГц

Fig. 7. The dependence of the dielectric permittivity of the samples under study on the frequency in the range 78.33–118.10 GHz

Как видно из рис. 7, тестовый материал (фторопласт) показал идеальную согласованность результатов со своим значением по ГОСТ 14906-77 «Фторопласт-4Д. Технические условия» (диэлектрическая проницаемость 2,1). На сайте производителя образцов из поликора указано, что относительная диэлектрическая проницаемость в диапазоне частот 8–10 ГГц при 20 °С составляет $(9,70 \pm 0,25)$ (www.polikor.net/katalog/podlozhki.html). Согласно [3], диэлектрическая проницаемость GaAs в высокочастотном диапазоне длин волн при комнатной температуре 11,6. Диэлектрическая проницаемость GaAs, полученная экспериментальным путем (рис. 7), имеет хорошую согласованность с известными результатами в диапазоне частот 78,33–87,00 ГГц и 101,0–118,1 ГГц. Также из рис. 7 вытекает факт, что оба образца поликора обладают достаточно стабильной и монотонной зависимостью диэлектрической проницаемости от частоты, но лучшие показатели – у образца толщиной 1 мм. Значение диэлектрической проницаемости этого образца с ростом частоты уменьшается от 9,2 до 7,7.

Выводы

1. Разработанный алгоритм функционирования программно-аппаратного комплекса векторного анализатора цепей и измерительной ячейки позволяет пошагово управлять этим измерительным прибором в режиме реального времени, производить оптимальную цифровую обработку с применением специальных математических методов, а также критерия Чебышева, осуществлять представление S-параметров в виде, удобном для использования специалистами в различных областях науки и техники.

2. Получены экспериментальные данные для таких материалов, как поликор и арсенид галлия (GaAs), с использованием модифицированного метода Николсона–Росса–Вейра. Результаты исследования хорошо согласовываются с известными значениями, приводимыми в литературе.

Список литературы

1. Luukkonen, O. A Stepwise Nicolson–Ross–Weir-Based Material Parameter Extraction Method / O. Luukkonen, S. I. Maslovski, S. A. Tretyakov // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011. No 10. P. 1295–1298. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2175897.
2. Певнева, Н. А. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах / Н. А. Певнева, А. Л. Гурский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 32–39.
3. Madelung, O. Semiconductors Group IV Elements, IV–IV and III–V Compounds. Part a – Lattice Properties / O. Madelung, U. Rössler, M. Schulz // Springer. 2001. No 683. DOI: 10.1007/b60136.

References

1. Luukkonen O., Maslovski S. I., Tretyakov S. A. (2011) A Stepwise Nicolson–Ross–Weir-Based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. (10), 1295–1298. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2175897.
2. Pevneva N. A., Gurskii A. L., Kostrikin A. M. (2019) Free Space Method Using a Vector Network Analyzer to Determine the Dielectric Permittivity of Materials in Microwave Range. *Doklady BGUIR*. (4), 32–39 (in Russian).
3. Madelung O., Rössler U., Schulz M. (2001) Semiconductors Group IV Elements, IV–IV and III–V Compounds. Part a – Lattice Properties. *Springer*. (683). DOI: 10.1007/b60136.

Вклад авторов

Кондрашов Д. А. представил концепцию исследования, подготовил экспериментальную установку.

Певнева Н. А. провела исследования, подготовила, отредактировала и оформила статью для публикации, обработала данные исследований.

Гусинский А. В. осуществил постановку задачи и выработку технических требований к экспериментальной установке, отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Павлючик А. А. проанализировал и интерпретировал данные исследований.

Гончарик М. А. подготовила исследуемые образцы.

Authors' contribution

Kondrashov D. A. presented the research concept, prepared the experimental equipment.

Pevneva N. A. performed research, prepared, edited and designed the article for publication, processed the data research.

Gusinsky A. V. carried out the formulation of the problem and the development of technical requirements for the experimental equipment, edited and finally approved the manuscript for publication, made its critical revision in terms of significant intellectual content.

Pavlyuchik A. A. analyzed and interpreted the research data.

Goncharik M. A. prepared test samples.

Сведения об авторах

Кондрашов Д. А., ст. н. с. научно-производственно-образовательного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Певнева Н. А., к. т. н., ст. н. с. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Гусинский А. В., д. т. н., профессор, начальник Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Павлючик А. А., заместитель директора по научной работе и инновациям, начальник НПЦ «Технология» ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Гончарик М. А., заместитель начальника отдела СВЧ-устройств ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Певнева Наталья Алексеевна

Information about the authors

Kondrashov D. A., Senior Researcher at the Research and Production and Educational Innovative Center of Microwave Technologies and their Metrological Supply (Center 1.9) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Pevneva N. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Pavlyuchik A. A., Deputy Director for Research and Innovation, Head of SPC “Technology” of the OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”

Goncharik M. A., Deputy Head of the Department of Microwave Devices of the OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Pevneva Natalia Alekseevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-34-40>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3

СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

М. О. ПИКУЗА¹, С. Ю. МИХНЕВИЧ², А. Ю. СЕНКЕВИЧ²

¹«КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Развитие технологий приводит к необходимости пересмотра используемых методов получения криптографических ключей. На параметры случайности последовательностей, сгенерированных физическими генераторами случайных последовательностей, влияют физические параметры регистрирующей аппаратуры и окружающей среды. Получены требования к случайности последовательности при прохождении бинарного теста. Продемонстрировано, что с увеличением длины последовательности требования к возможным отклонениям от равновероятного распределения 0 и 1 возрастают. Оценена стабильность случайности последовательностей, выданных генератором на основе изучения фотонов. Исследуемый генератор состоит из светодиода и кремниевого малогабаритного фотоумножителя, предназначенного для регистрации светового излучения малой мощности. Показаны возможные физические процессы, приводящие к ухудшению случайности последовательностей. Оценена возможность использования генератора случайных числовых последовательностей на основе кремниевого малогабаритного фотоумножителя для криптографических целей.

Ключевые слова: случайная бинарная последовательность, генератор случайных чисел, кремниевый фотоумножитель, достоверность теста, бинарный тест, криптографический ключ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пикюза, М. О. Стабильность характеристик физических генераторов случайных чисел / М. О. Пикюза, С. Ю. Михневич, А. Ю. Сенкевич // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 34–40. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-34-40>.

STABILITY OF CHARACTERISTICS OF PHYSICAL RANDOM NUMBER GENERATORS

MAKSIM O. PIKUZA¹, SVETLANA YU. MIKHNEVICH², ALIONA YU. SIANKEVICH²

¹“KB Radar” – Managing Director Holding Company of “Radar Systems” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13.02.2023

Abstract. The development of technologies leads to the need of revising the methods used to obtain cryptographic keys. The randomness parameters of sequences generated by physical random sequence generators are affected by the physical parameters of the recording equipment and the environment. The requirements for the randomness of the sequence, when passing the binary test, are obtained. It is shown that as the sequence length increases, the requirements for possible deviations from the equiprobable distribution of 0 and 1 increase. The randomness stability of the sequences generated by the generator based on the study of photons is estimated. The oscillator under study

consists of an LED and a compact silicon photomultiplier designed to detect low-power light radiation. Possible physical processes leading to the deterioration of the randomness of sequences are shown. The possibility of using a generator of random numerical sequences based on a small-sized silicon photomultiplier for cryptographic purposes is estimated.

Keywords: random binary sequence, random number generator, silicon photomultiplier, test reliability, binary test, cryptographic key.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pikuza M. O., Mikhnevich S. Yu., Siankevich A. Yu. (2023) Stability of Characteristics of Physical Random Number Generators. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 34–40. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-34-40> (in Russian).

Введение

Развитие квантовых технологий приводит к появлению новых направлений техники и технологий, вместе с тем в некоторых направлениях будет происходить замена или вытеснение существующих технологий. Так, в области криптографии уже сейчас встает вопрос о возможности применения квантовых компьютеров для раскрытия криптографических ключей и, следовательно, для расшифровки сообщений. Таким образом, некоторые криптографические алгоритмы становятся ненадежными при использовании квантовых компьютеров [1]. Учитывая, что начинается создание и поставка на рынок серийных квантовых компьютеров, вопрос надежности криптографических ключей и алгоритмов становится актуальным.

В [1–3] показано, что непредсказуемость случайных процессов может быть обусловлена квантовыми процессами или математической сложностью задачи, связанной с техническими (временными или ресурсными) ограничениями настоящего уровня развития технологий. Поскольку математическая сложность задачи – временная трудность – в большинстве случаев преодолевается развитием технологий (или появлением квантового компьютера), становятся актуальными поиск и разработка надежных физических источников случайных бинарных последовательностей на основе квантовых процессов.

Физические источники случайных последовательностей в основном зависят от параметров окружающей среды, а на сами последовательности влияет регистрирующая и обрабатывающая аппаратура [3]. Поэтому любое изменение может привести к нестабильности последовательности битов и, следовательно, к ухудшению случайности. Изменение параметров случайности в течение времени работы генератора приведет к его ненадежности. В литературе встречаются рекомендации тестировать физические генераторы случайных чисел до и в процессе работы [3].

Проведение исследований

Тестирование случайных последовательностей осуществляется методами на основе серии тестов, приведенных в NIST или FIPS [4, 5]. Согласно этим методикам, тестирование для криптографических целей должно проводиться на последовательности минимум 10^6 бит и с уровнем достоверности теста $\alpha = 0,01$. В любом тесте вычисляют вероятность получения неслучайной последовательности $(1 - P)$, т. е. отличие случайности идеального генератора (полученной методами математической статистики) и случайности проверяемой последовательности с учетом типа оцениваемой данным тестом неслучайности. Если $P > \alpha$, считается, что последовательность с точностью α случайна [4].

Бинарный, или статистический, тест на равновероятность появления 0 и 1 входит в обе серии тестов. Исследуем влияние нестабильности параметров генератора случайных чисел с помощью бинарного теста. Расчет значения P проводится следующим образом. В бинарном тесте в случайной последовательности «0» заменяется на «-1» и находится сумма ряда Sum размера ряда n . Далее вычисляется статистический параметр теста

$$S_n = \frac{Sum}{\sqrt{2n}} \quad (1)$$

и рассчитывается P через дополнительную функцию ошибок

$$P(S_n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{S_n}^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (2)$$

Если $P > 0,01$, то случайная последовательность генерируется с достоверностью 99 %, если $P > 0,001$ – с достоверностью 99,9 % [4]. На рис. 1 приведена функция ошибок от величин S_n , для которой значения $P(S_n) < 0,01$ проходят тест.

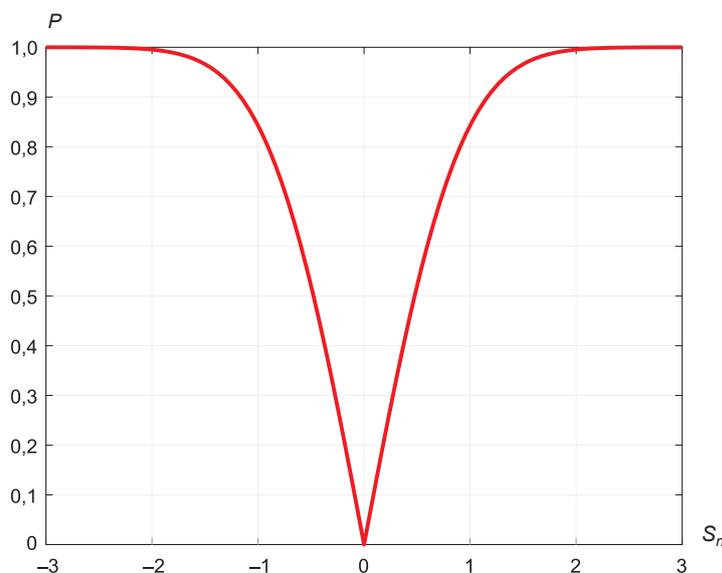


Рис. 1. Функция ошибок
Fig. 1. Error function

На рис. 2 приведен график зависимости максимального значения суммы ряда Sum , при которой последовательность проходит тест с определенным уровнем достоверности α , от размера ряда n . Максимальные значения суммы ряда Sum от размера ряда n приведены в табл. 1.

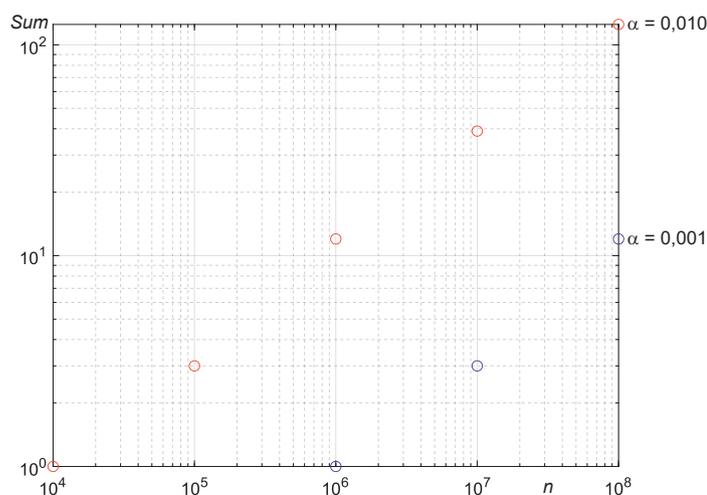


Рис. 2. Зависимость максимального значения суммы ряда Sum от размера ряда n
Fig. 2. Dependence of the maximum value of the sum of the series Sum on the size of the series n

Таблица 1. Максимальные значения суммы ряда Sum в зависимости от размера ряда n
Table 1. Maximum values of the sum of the series Sum depending on the size of the series n

$\alpha = 0,010$	n	1,0000e + 04	1,0000e + 05	1,0000e + 06	1,0000e + 07	1,0000e + 08
	Sum	1,0000e + 00	3,0000e + 00	1,2000e + 01	3,9000e + 01	1,2500e + 02
$\alpha = 0,001$	n	1,0000e + 04	1,0000e + 05	1,0000e + 06	1,0000e + 07	1,0000e + 08
	Sum	0	0	1,0000e + 00	3,0000e + 00	1,2000e + 01

Зависимость максимального значения суммы ряда в логарифмическом масштабе от длины числовой последовательности практически линейна, но коэффициент пропорциональности

не равен единице. Так, для прохождения теста последовательности длиной 10^5 максимальное количество отклонений суммы от нуля должно по модулю равняться 3, т. е. разница допустимой ошибки и длины последовательности составляет 4 порядка. Это значит, что с учетом четности числа знаков в последовательности допускается замена всего лишь одного значения бита противоположным. При последовательности длиной 10^8 максимальное количество отклонений суммы от нуля должно по модулю быть равно 125, т. е. разница – 5 порядков. С учетом четности числа знаков в последовательности допускается замена значений 62 битов противоположными. Таким образом, с увеличением длины последовательности требования к точности возрастают. При тестировании последовательностей для криптографических целей необходимая минимальная длина последовательности составляет 10^6 знаков.

Оценим требуемую стабильность параметров физических источников на примере генератора случайных чисел (рис. 3) на основе квантового явления – излучения единичных фотонов при фотоэффекте [6, 7]. Схема устройства, представленного на рис. 3, состоит из светодиода, испускающего излучение, и детектора излучения.

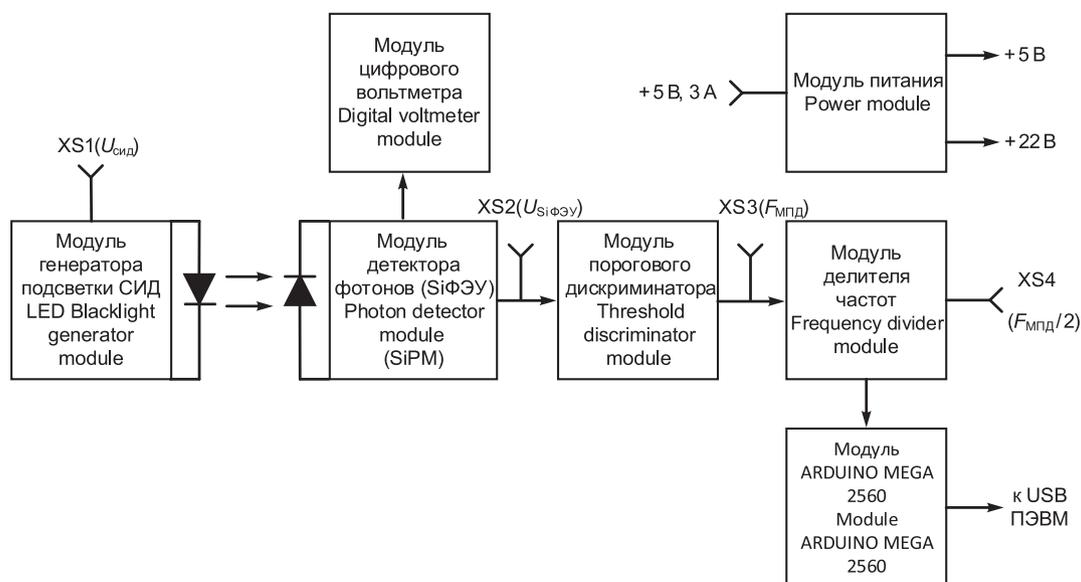


Рис. 3. Схема генератора случайных чисел
Fig. 3. Random number generator circuit

Лавинные фотодиоды (ЛФД) используют в волоконно-оптических линиях связи в качестве детекторов фотонов в криптографических системах. В настоящее время выпускаются кремниевые и германиевые ЛФД. Изучению характеристик кремниевых ЛФД посвящен ряд работ, например [8–12]. Серию кремниевых малогабаритных фотоумножителей также выпускает ОАО «Интеграл».

Параметры кремниевых малогабаритных фотоумножителей (КОФ5-1035, КОФ5-1035А) отличаются от лавинных фотодиодов (КОФ104К1, КОФ104К2, КОФ101Г, КОФ101Г1, КОФ101, КОФ102В, КОФ102В1), выпускаемых ОАО «Интеграл». Лавинные фотодиоды в основном характеризуются малыми коэффициентами умножения (до 100), высокими рабочими напряжениями (180–300 В) и низкой чувствительностью к световому потоку (0,30–0,75 А/Вт). ЛФД предназначены для использования в устройствах оптической локации, дальномерах, для регистрации ионизирующих излучений, в качестве альтернативы фотоэлектронным умножителям. Кремниевый малогабаритный фотоумножитель является функциональным аналогом многопиксельного счетчика фотонов фирмы Hamamatsu (Multi-Pixel Photon Counter, MPPC), он также называется кремниевым фотоумножителем (Silicon Photomultiplier, SiPM).

В приведенной на рис. 3 схеме использовался кремниевый малогабаритный фотоумножитель из пробной партии, который по характеристикам отличался напряжением пробоя. В соответствии с техническими документами основной кремниевых фотоумножителей КОФ5-1035 и КОФ5-1035А является кристалл кремния, на который нанесены пиксели размером 35×35 мкм, являющиеся

лавинными фотодиодами. ЛФД работают в «режиме Гейгера», т. е. при обратном напряжении, превышающем напряжение пробоя, что позволяет получить коэффициент усиления 10^5 – 10^6 . Единичный импульс генерируется детектируемыми фотонами и гасится подключенным к каждому лавинному фотодиоду резистором. Пиксели (лавинные фотодиоды) выполнены из Ti и AlCu на планарной стороне и из Ti, Ni, Ag – на непланарной. Все пиксели через сопротивление соединены в единый канал. Общий выходной сигнал кремниевого фотоумножителя представляет собой сумму выходных сигналов с каждого пикселя. Кремниевые фотоумножители обладают высокой обнаружительной способностью, необходимой для счета фотонов, и используются в различных применениях, в которых требуется детектирование очень слабых световых сигналов на уровне единичных фотонов. Кремниевые фотоумножители КОФ5-1035, КОФ5-1035А характеризуются следующими параметрами:

- диапазоном длин волн – от 380 мкм до 800 нм;
- диапазоном напряжения смещения (выше U_b) – 1–5 В;
- коэффициентом усиления – не менее 10^6 ;
- эффективностью регистрации фотонов (PDE) – не менее 30 %;
- диапазоном рабочих температур среды – от минус 10 до плюс 70 °С;
- повышенной предельной температурой среды 100 °С.

Кремниевые фотоумножители КОФ5-1035, КОФ5-1035А используют для регистрации излучения низкой интенсивности. Однако есть вопрос о возможности их применения в схемах генераторов случайных числовых последовательностей. Результаты проведенных экспериментов по тестированию случайных последовательностей, сгенерированных исследуемым генератором, показывают достаточно хорошую случайность (на длине последовательности $3 \cdot 10^3$ и при $\alpha = 0,1$). Вместе с тем при определении качества случайных последовательностей в соответствии с требованиями NIST для криптографических целей (на длине последовательности 10^6 и при $\alpha = 0,010$ – $0,001$) последовательности проходят тест только в случае очень точной настройки перенапряжения, подаваемого на фотоумножитель, и тока, проходящего через светодиод.

В соответствии с технической документацией коэффициент усиления рассматриваемых фотоумножителей зависит от перенапряжения линейно. При изменении перенапряжения (напряжения более напряжения пробоя, определенного экспериментально как 21 В [9, 10]) от 1,2 до 2,8 В коэффициент усиления меняется приблизительно от $3 \cdot 10^5$ до 10^6 , т. е. почти в 3 раза. Температурная зависимость коэффициента усиления имеет нелинейный характер [9] и в диапазоне температур 293–298 К изменяется примерно на 10 %.

В исследуемой схеме напряжение считывания, т. е. такое, при котором срабатывает компаратор, составляет 100 мВ. В соответствии с технической документацией для этого порога считывания скорость темнового счета при температуре (25 ± 10) °С составляет примерно 100 Гц. То есть с учетом мертвого времени порядка микросекунды [6] кремниевый фотоумножитель регистрирует до 100 темновых импульсов в секунду. Эти случайные импульсы могут лежать в другом спектральном диапазоне, поэтому, согласно технической документации, эффективность их регистрации в 4 и более раз меньше. Вместе с тем, учитывая возможное изменение коэффициента усиления за счет изменения напряжения (почти в 3 раза) или температуры (на 10 %), возможно их усиление до уровня основного сигнала, что приведет к изменению соотношения 0 и 1. Как отмечалось выше, для криптографических целей бинарный тест должен выполняться с точностью 6 бит из 10^6 . Последовательность такой длины считывается с генератора более 15 мин. То есть стабильность напряжения и температуры должна быть такой, чтобы обеспечить эту точность в течение времени считывания. Таким образом, нестабильность случайной последовательности, тестируемой для криптографических целей, объясняется возможностью усиления темновых импульсов и нестабильностью температуры в процессе работы генератора.

Вывод

Проанализирована точность последовательности случайных чисел, необходимая для прохождения тестов на случайность для криптографических целей. Полученные результаты применены для объяснения нестабильности тестов, выдаваемых генератором случайных чисел, на основе излучения и детектирования фотонов. Оценена возможность использования кремниевых фотоумножителей в генераторах случайных чисел для криптографических целей.

Список литературы

1. Bernstein, D. J. Post-Quantum Cryptography / D. J. Bernstein, T. Lange // *Nature*. 2017. Vol. 13, No 549. P. 188–194. DOI: 10.1038/nature23461.
2. Пикуза, М. О. Оптимизация режимов работы генераторов случайных чисел / М. О. Пикуза, С. Ю. Михневич // *Проблемы инфокоммуникаций*. 2022. Т. 2, № 16. С. 46–51.
3. Herrero-Collantes, M. Quantum Random Number Generators / M. Herrero-Collantes, J. C. Garcia-Escartin // *Reviews of Modern Physics*. 2017. Vol. 89, No 1. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015004>.
4. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications / A. Rukhin [et al.]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. 2010. 131 p.
5. Carnahan, L. J. Security Requirements for Cryptographic Modules / L. J. Carnahan, M. E. Smid. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994.
6. Барановский, О. К. Исследование возможности использования лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации для создания квантовых генераторов случайных чисел / О. К. Барановский, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. № 1. С. 34–38. DOI: 10.7868/S0032816218010147.
7. Асаенок, М. А. Исследование возможности использования кремниевых фотоэлектронных умножителей для создания генераторов случайных числовых последовательностей / М. А. Асаенок, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков // *Известия вузов. Электроника*. 2020. Т. 25, № 2. С. 114–122. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-2-114-122.
8. Гулаков, И. Р. Влияние температуры на одноквантовые характеристики лавинных фотоприемников / И. Р. Гулаков, В. Л. Козлов, А. О. Зеневич // *Доклады БГУИР*. 2004. № 4. С. 21–25.
9. Асаенок, М. А. Коэффициент усиления кремниевого фотоэлектронного умножителя с низким напряжением питания / М. А. Асаенок, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // *Проблемы инфокоммуникаций*. 2017. № 2. С. 82–87.
10. Асаенок, М. А. Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаенок, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // *Доклады БГУИР*. 2018. № 2. С. 54–58.
11. Асаенок, М. А. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаенок, А. О. Зеневич // *Прикладная физика*. 2018. № 6. С. 49–53.
12. Асаенок, М. А. Исследование амплитудных характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаенок, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков // *Прикладная физика*. 2019. № 6. С. 97.

References

1. Bernstein D. J., Lange T. (2017) Post-Quantum Cryptography. *Nature*. 13 (549), 188–194. Doi: 10.1038/nature23461.
2. Pikuza M. O., Mikhnevich S. Yu. (2022) Operating Modes Optimization of Random Number Generators. *Problems of Infocommunications*. 2 (16), 46–51 (in Russian).
3. Herrero-Collantes M., Garcia-Escartin J. C. (2017) Quantum Random Number Generators. *Reviews of Modern Physics*. 89 (1). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015004>.
4. Rukhin A., Soto J., Nechvatal J., Smid M., Barker E., Leigh S., Levenson M., Vangel M., Banks D., Heckert A., Dray J., San Vo (2010) *A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology Publ. 131.
5. Carnahan L. J., Smid M. E. (1994) *Security Requirements for Cryptographic Modules*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology Publ.
6. Baranovsky O. K., Gorbadei O. Yu., Zenevich A. O. (2018) Investigation of the Possibility and Use of Avalanche Photodiodes in the Mode of Single-Quantum Registration for the Creation of Quantum Random Number Generators. *Instruments and Technique of Experiment*. (1), 34–38. DOI: 10.7868/S0032816218010147 (in Russian).
7. Asayonok M. A., Zenevich A. O., Novikov E. V. (2020) Study of the Possibility of Using Silicon Photoelectronic Multipliers to Create Generators of Random Numerical Sequences. *University News. Electronics*. 25 (2), 114–122. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-2-114-122 (in Russian).
8. Gulakov I. R., Kozlov V. L., Zenevich A. O. (2004) Influence of Temperature on Single-Quantum Characteristics of Avalanche Photodetectors. *Doklady BGUIR*. (4), 21–25 (in Russian).
9. Asayonok M. A., Gorbadei O. Yu., Zenevich A. O. (2017) Low Voltage Silicon Photomultiplier Gain. *Problems of Infocommunications*. 2 (6), 82–87 (in Russian).
10. Asayonok M. A., Gorbadei O. Yu., Zenevich A. O. (2018) Temperature Characteristics of Silicon Photomultipliers. *Doklady BGUIR*. (2), 54–58 (in Russian).

11. Asayonok M. A., Zenevich A. O. (2018) Study of the Characteristics of Silicon Photomultipliers. *Applied Physics*. (6), 49–53 (in Russian).
12. Asayonok M. A., Zenevich A. O., Novikov E. V. (2019) Investigation of the Amplitude Characteristics of Silicon Photomultipliers. *Applied Physics*. (6), 96–101 (in Russian).

Вклад авторов

Пикуза М. О. осуществил экспериментальные измерения.
Пикуза М. О., Михневич С. Ю. провели теоретический расчет.
Михневич С. Ю., Сенкевич А. Ю. обосновали и описали результаты.

Authors' contribution

Pikuza M. O. made experimental measurements.
Pikuza M. O., Mikhnevich S. Yu. carried out a theoretical calculation.
Mikhnevich S. Yu., Siankevich A. Yu. substantiated and described the results.

Сведения об авторах

Пикуза М. О., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер тематического отдела ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Михневич С. Ю., к. ф.-м. н., доцент, заведующая кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусской государственной академии связи

Сенкевич А. Ю., лаборант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусской государственной академии связи

Адрес для корреспонденции

220062, Республика Беларусь,
г. Минск, просп. Независимости, 117а
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»
Тел.: +375 33 650-31-78
E-mail: maksimpikuza@gmail.com
Пикуза Максим Олегович

Information about the authors

Pikuza M. O., Postgraduate at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Engineer at the Thematic Department of JSC “KB Radar” – Managing Director Holding Company of “Radar Systems”

Mikhnevich S. Yu., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications

Siankevich A. Yu., Laboratory Assistant at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications

Address for correspondence

220062, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 117a
JSC “KB Radar” – Managing Director
Holding Company of “Radar Systems”
Tel.: +375 33 650-31-78
E-mail: maksimpikuza@gmail.com
Pikuza Maksim Olegovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-41-47>

Оригинальная статья

Original paper

УДК 621.396.946

МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА

П. Ю. ЛАКИЗО

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 01.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Одной из главных проблем использования радиочастотного спектра является его дефицит. Это связано не только с его природными свойствами как ресурса, но и с неэффективностью применения. Для высвобождения неэффективно используемой части радиочастотного спектра необходима разработка мер и механизмов управления, создающих максимально невыгодные условия для эксплуатации операторами данной части спектра. В статье рассмотрены предложения по внедрению методики, модели и критериев для символического описания оценки эффективности использования радиочастотного спектра, включая информационную и программную реализацию многоагентной системы, позволяющей осуществить автоматизированное принятие решения комплексной оценки эффективности применения спектра. Предложена модель общей эффективности применения радиочастотного спектра на основе трех видов эффективности, разработана шкала интервалов по этим видам. Выполнена оценка эффективности радиочастотного спектра на базе эталонной сети сотовой подвижной связи. Представлен вариант принятия решения по результатам оценки этой эффективности.

Ключевые слова: радиочастотный спектр, виды эффективности, многоагентная технология, система, структура многоагентной распределенной системы, управление эффективностью.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лакизо, П. Ю. Метод принятия решения на основе комплексной оценки эффективности радиочастотного спектра / П. Ю. Лакизо // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 41–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-41-47>.

DECISION-MAKING METHOD BASED ON A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE RADIO FREQUENCY SPECTRUM

PAVEL YU. LAKIZO

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 01.11.2022

Abstract. One of the main problems in the use of the radio frequency spectrum is its scarcity. This is due not only to its natural properties as a resource, but also to the inefficiency of its use. Work in this direction was carried out by scientists. In order to release the inefficiently used part of the radio frequency spectrum, it is necessary to develop management measures and mechanisms that create the most unfavorable conditions for the operation of this part of the spectrum by operators. The article discusses proposals for the implementation of the methodology, the model and criteria for a symbolic description of the assessment of the effectiveness of the use of the radio frequency spectrum, including information and software implementation of a multi-agent system that allows for automated decision making, for a comprehensive assessment of the effectiveness of the use of the radio frequency spectrum.

A model of the overall efficiency of using the radio frequency spectrum based on three types of efficiency has been proposed, and a scale of intervals for these types has been developed. An assessment of the efficiency of the radio frequency spectrum based on a reference network of cellular mobile communications has been performed. A decision making variant based on the results of evaluating this efficiency is presented.

Keywords: radio frequency spectrum, types of efficiency, multi-agent technology, system, structure of a multi-agent distributed system, efficiency management.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Lakizo P. Yu. (2023) Decision-Making Method Based on a Comprehensive Assessment of the Effectiveness of the Radio Frequency Spectrum. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 41–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-41-47> (in Russian).

Введение

Для реализации перспективных технологий в области эффективного использования радиочастотного спектра (РЧС) необходимо создание благоприятных условий для строительства и модернизации инфраструктуры и развертывания сетей новых поколений подвижной связи. Одна из главных проблем использования РЧС – его дефицит, что связано не только с его природными свойствами как ресурса, но и с неэффективностью применения. Для высвобождения неэффективно используемой части радиочастотного спектра необходима разработка мер и механизмов управления, создающих максимально невыгодные условия для эксплуатации операторами данной части спектра.

Модель оценки эффективности использования радиочастотного спектра

Под эффективностью использования радиочастотного спектра будем понимать совокупность технических, экономических и социальных действий, направленных на максимально возможное обеспечение технических и социально-экономических потребностей государства. В связи с этим эффективность использования РЧС разделим на техническую, экономическую и социальную [1, 2].

Следует отметить, что не для всех радиослужб можно проводить оценку эффективности использования РЧС. Так, некоторые субъекты хозяйствования применяют выделенный им радиочастотный спектр в своих технологических процессах. Поэтому предлагается пользователей радиочастотного спектра разделить на тех, которые получают прямую выгоду от использования РЧС, и тех, кто получает косвенную выгоду. Предлагается субъекты хозяйствования, использующие выделенный им спектр для предоставления радиотехнологий другим субъектам хозяйствования или физическим лицам, отнести к первой группе, всех остальных – ко второй. Модель оценки общей эффективности использования РЧС представлена выражением

$$E = C_1 E_T + C_2 E_э + C_3 E_с, \quad (1)$$

где E_T , $E_э$, $E_с$ – техническая, экономическая и социальная эффективности соответственно; C_1 , C_2 , C_3 – корректирующий коэффициент для технической, экономической и социальной эффективности.

Корректирующие коэффициенты используются для того, чтобы учитывать значимость той или иной эффективности, а также ее отсутствие. Так, если значимость каждой эффективности равноценна, то $C_1 = C_2 = C_3$. В случае, когда та или иная эффективность отсутствует, следует выбирать корректирующий коэффициент, равный нулю. Общая сумма корректирующих коэффициентов $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ [1, 3, 4].

В Республике Беларусь собственником РЧС выступает государство, что обеспечивает приоритетные условия для реализации государственных программ, в том числе обеспечения национальной безопасности, реализации научных проектов [5]. При этом реализация рыночных подходов к выделению РЧС представляется как необходимость отказа от государственной формы собственности, что не совсем верно, так как современная система правоотношений позволяет разработать механизмы обмена совокупностью правомочий без изменения титула собственности, примером является долгосрочная аренда земли.

Для комплексной оценки эффективности РЧС разработаны интервалы показателей по трем видам эффективности, а также общей эффективности с целью выявления разрывов (отклонений)

путем сравнения эталонных значений эффективности с фактически полученными по результатам деятельности операторов. В табл. 1 представлена шкала интервалов показателей технической эффективности использования радиочастотного спектра, где КОЭ – коэффициент отклонения показателей эффективности от эталонной сети.

Таблица 1. Показатели технической эффективности использования радиочастотного спектра
Table 1. Indicators of technical efficiency in the use of the radio frequency spectrum

Интервал технической эффективности / Technical efficiency interval	Ранг интервала / Interval rank	Весомость ранга a_i / Weight rank a_i	КОЭ = $a_i + 1$
1,00–0,89	0	0	1,000
0,88–0,84	1	0,015	1,015
0,83–0,79	2	0,030	1,030
0,78–0,74	3	0,045	1,045
0,73–0,69	4	0,060	1,060
0,68–0,64	5	0,075	1,075
0,63–0,59	6	0,090	1,090
0,58–0,54	7	0,105	1,105
0,53–0,49	8	0,120	1,120
0,48–0,44	9	0,135	1,135
0,43–0,39	10	0,150	1,150
0,38–0,25 и менее	11	0,175	1,175
Итого	66	1,000	–

Интервал 1,00–0,89 определяет ситуацию, когда техническая эффективность работы оператора соответствует эффективности эталонной сети. Экономическая эффективность работы оператора соответствует эффективности параметров экономического развития, социальная – параметрам социального развития, установленного государством. Интервал, характеризующий неэффективное использование РЧС, установлен в границах 0,38–0,25, так как по расчетам при значении эффективности менее 0,38 уменьшается коэффициент покрытия и нарушается требование по обеспечению зоны обслуживания в населенных пунктах республики и по автомобильным дорогам всех значений. Кроме того, снижаются экономический эффект для государства и социальный эффект для государства и пользователей от предоставления радиочастотного спектра операторам. Принятие решения по результатам оценки эффективности на основе данной модели предлагается осуществлять путем экспертных оценок.

Выполнена оценка эффективности радиочастотного спектра на основе такого критерия, как эталонная сеть сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS, построенная на базовых станциях, указанных в табл. 2. Эталонная сеть стандарта UMTS (–103 dBm) позволяет обеспечить зону обслуживания (покрытия) Республики Беларусь со следующими показателями: покрытие территории – 97,3 %, охват населения – 99,9 %.

Таблица 2. Результаты построения эталонной сети стандарта UMTS
Table 2. Results of building a reference network of the UMTS standard

Наименование показателя / Indicator name	Брест и Брестская область	Витебск и Витебская область	Гомель и Гомельская область	Гродно и Гродненская область	Минск и Минская область	Могилев и Могилевская область
Количество базовых станций	498	506	510	422	1234	399
Итого	3569					
Количество радиоканалов	1683	1434	1999	1369	5416	1397
Итого	13 298					

На рис. 1 представлено визуальное отображение рассчитанной эталонной сети сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS. С учетом полученных значений выполнен расчет эффективности использования РЧС радиоэлектронными средствами эталонной сети сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS по методике, представленной в постановлении Совета

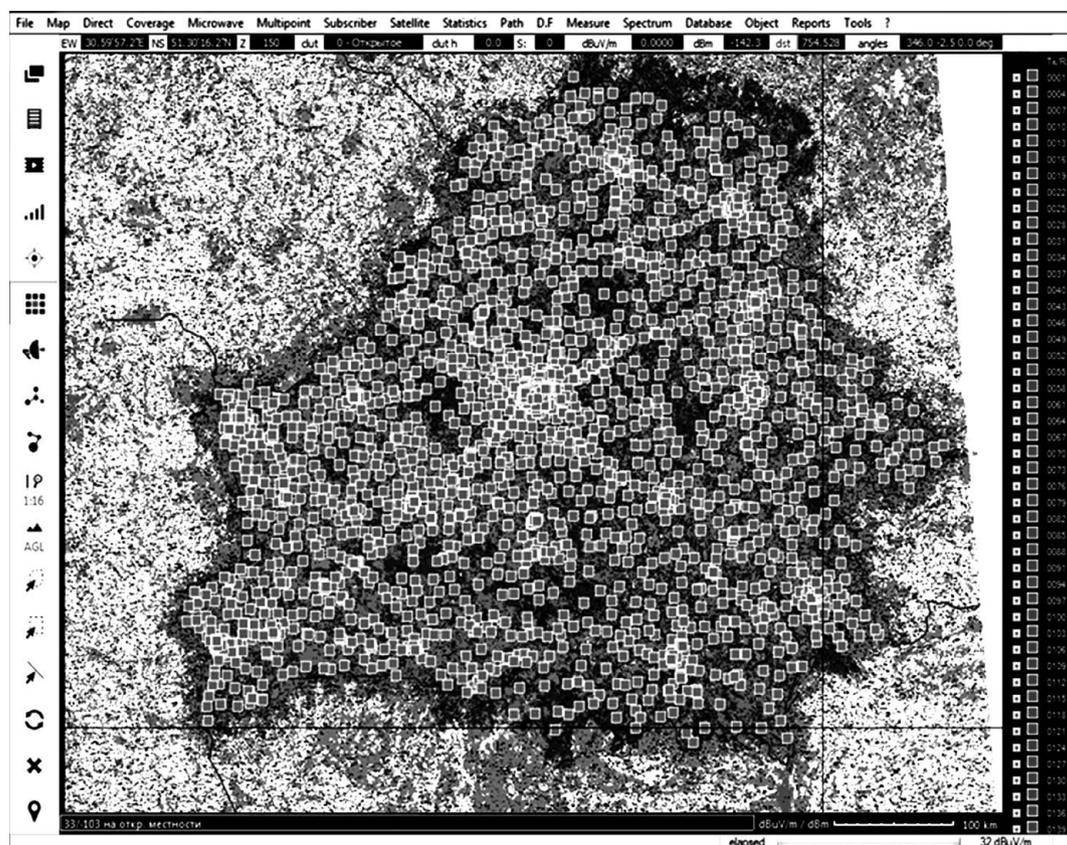


Рис. 1. Визуальное отображение рассчитанной эталонной сети сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS
Fig. 1. Visual display of the calculated reference cellular mobile telecommunication network of the UMTS standard

Министров Республики Беларусь № 1292 «Об утверждении положения о порядке определения эффективности использования радиочастотного спектра». Исходными данными служили следующие показатели: $N_k = 13\,298$ – количество радиочастотных каналов, необходимое для построения эталонной сети с заданными параметрами; $n_{fc} = 4$ – данные, полученные исходя из среднего значения для трех операторов, действующих в Беларуси. В случае меньшего значения n_{fc} все равно необходимо обеспечить наличие 13 298 радиоканалов для достижения параметров эталонной сети.

Планирование сети сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS отличается сложностью определения задач на каждом из этапов, поскольку используемые для ее планирования величины не имеют постоянного значения. Условия для построения эталонной сети сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS – усредняемые динамические переменные. Максимальное количество каналов, выделенных для использования РЧС UMTS (2100 МГц), равно 12. Сегодня операторам выделено по три канала, за исключением оператора 1 (два канала). Вместе с тем существует высокая вероятность прихода на рынок еще одного оператора 4. С учетом вышеизложенного и соблюдения условий равноправного доступа к радиочастотному спектру, как того требует Положение о порядке рассмотрения материалов и выделения полос радиочастот, радиочастотных каналов и радиочастот, а также порядке проведения экспертизы на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств, утвержденное Указом Президента Республики Беларусь от 15.04.2003 № 192 (п. 6, Гл. 2 (7)), для существующих трех операторов сотовой подвижной электросвязи n_{fc} принимаем равным 3. В целях обеспечения условий равноправного доступа к радиочастотному спектру для эталонной сети показатель n_{fc} принимаем равным 4 в связи с высокой вероятностью выделения РЧС четвертому оператору.

Соотношение $n_{fc}/m_f = 1$, так как все выделенные каналы для эталонной сети должны использоваться (m_f – количество радиоканалов). Площадь зоны покрытия $S_{п}$, полученная в результате расчетов и отвечающая требованиям табл. 2, составила 201 995 км², а численность населения X

на территории, где эксплуатируются радиоэлектронные средства стандарта UMTS, – 9 479 511 (99 % от населения Республики Беларусь). На основании значений S_{π} и X , необходимых для расчета по методике, представленной в постановлении Совета Министров Республики Беларусь от 31 декабря 2014 г. № 1292 «Об утверждении положения о порядке определения эффективности использования радиочастотного спектра», получено эталонное значение эффективности использования РЧС по технологии UMTS, равное 0,89. Результаты расчета технической эффективности использования радиочастотного спектра операторами сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета эффективности использования радиочастотного спектра операторами сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS

Table 3. Results of calculating the efficiency of using the radio frequency spectrum by cellular mobile telecommunication operators of the UMTS standard

Оператор / Operator	Эффективность / Efficiency
1	0,33
2	0,64
3	0,54

Разрыв между значениями технической эффективности использования РЧС эталонной сетью и сетями операторов сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS приведен в табл. 4.

Таблица 4. Разрыв между значениями для разных операторов

Table 4. The gap between the values for different operators

Оператор / Operator	1	2	3
Разрыв / Gap	0,56	0,25	0,35

Один из вариантов принятия решения в ситуации, соответствующей представленным в табл. 3 данным, – это учет значения разрыва (табл. 4) при расчете экономической эффективности путем корректировки ее эталонного значения, осуществляемой за счет произведения данного коэффициента и КОЭ при осуществлении расчета платы за использование РЧС. Представленные в табл. 4 значения разрыва в технической эффективности использования РЧС между эталонной сетью и сетями операторов сотовой подвижной электросвязи характеризуют степень развития действующих сетей как имеющее перспективы для дальнейшего освоения. Принятое значение $n/c = 4$ позволяет сравнивать показатели эффективности использования РЧС эталонной и действующих сетей в целом. Вывод об эффективности использования РЧС и многокритериальные решения принимаются радиочастотной службой после проведения расчетов.

Показатель экономической эффективности соответствует обратно пропорциональному значению технической эффективности. Это обусловлено необходимостью увеличения ежегодной платы за используемый спектр операторами в случае образования разрывов между эталонным и фактическим значениями технической эффективности. Таким образом, чем более неэффективно используется спектр, тем более дорогим он станет для оператора сотовой подвижной связи.

Определим значение первичного эталонного показателя экономической эффективности. В качестве критерия используем размер установленной ежегодной платы по выделенному РЧС конкретному оператору. Так, размер ежегодной разовой платы одним конкретным оператором равен 1,00 (первичный эталон) показателя экономической эффективности. Из этого следует, что значение показателя экономической эффективности $E_3 \geq 1,00$. То есть, если данное значение меньше единицы, это означает, что оператор не произвел (либо частично произвел) оплату за выделенный спектр, а, следовательно, он подлежит изъятию. Показатель экономической эффективности будет равен единице в случае, если оператор достигнет значений критериев эталонной сети (технической эффективности), в этом случае оператор произведет оплату в размере установленной ежегодной платы. В случае образования разрыва оператору придется компенсировать его путем достижения показателей экономической эффективности выше единицы (вторичный эталон), что обеспечивается умножением установленной разовой платы за используемый спектр на динамический коэффициент отклонения от эталонной сети.

Произведем расчет общей эффективности РЧС каждого оператора подвижной сотовой связи по эталонной модели исходя из следующих параметров. Значения весовых коэффициентов технической C_1 и экономической C_2 эффективностей прямо пропорциональны друг другу. Данное обстоятельство обосновывается необходимостью поэтапного увеличения размера платы, осуществляемой операторами за спектр в случаях появления (увеличения) разрыва между эталонной и фактической сетями сотовой подвижной электросвязи стандарта UMTS. В связи с тем, что социальная эффективность на этапе развертывания сети может как присутствовать, так и отсутствовать, установим в этом случае значение параметра $C_3 = 0$. Таким образом, если общая сумма весовых коэффициентов $C_1 + C_2 + C_3 = 1$, а значения весовых коэффициентов технической C_1 и экономической C_2 эффективностей прямо пропорциональны друг другу, то $C_1 = 0,5$ и $C_2 = 0,5$. Рассчитаем общую эффективность операторов сотовой подвижной связи по предложенной модели с учетом влияния коэффициента отклонения от эталонной сети

$$E = C_1 E_T + C_2 E_3 \text{КОЭ} + C_3 E_c, \quad (2)$$

где $C_1 = 0,5$; $C_2 = 0,5$; $C_3 = 0$; $E \leq 1$; $E_T \leq 0,89$; $E_3 \geq 1$; $E_c = 1$; КОЭ – коэффициент отклонения показателей эффективности согласно табл. 1.

Для определения эталона экономической эффективности по каждому конкретному оператору выполним анализ ежегодной разовой платы за использование стандарта UMTS. Данные расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5. Расчет показателей эффективности операторов сотовой подвижной связи
Table 5. Calculation of performance indicators of mobile operators

Оператор / Operator	Техническая эффективность	C	Экономическая эффективность (первичный эталон)	C	Социальная эффективность	C	Общая эффективность с учетом экономической эффективности (первичный эталон)	Экономическая эффективность (вторичный эталон)
1	0,33	0,5	1	0,5	1	0	0,665	1,67
2	0,64	0,5	1	0,5	1	0	0,82	1,36
3	0,54	0,5	1	0,5	1	0	0,77	1,46

Расчет варианта принятия решения по результатам оценки эффективности использования радиочастотного спектра приведен в табл. 6.

Таблица 6. Расчет размера ежегодной платы за использование радиочастотного спектра
Table 6. Calculation of the amount of the annual fee for the use of radio frequency spectrum

Оператор сотовой подвижной связи / Mobile operator	КОЭ, согласно табл. 1	Размер ежегодной платы, евро, за использование радиочастотного спектра		Размер дополнительной ежегодной платы, евро, в республиканский бюджет за пользование РЧС
		базовый	фактический	
1	1,175	542069,60	636931,78	94862,18
2	1,075	1853722,00	1992751,15	139029,15
3	1,105	1286348,00	1421414,54	135066,54

Выводы

1. Выполнена оценка эффективности использования радиочастотного спектра на основе разработанной шкалы интервалов показателей общей, технической, экономической и социальной эффективностей. Произведены расчеты технической, экономической и общей эффективности использования радиочастотного спектра по трем операторам сотовой связи. Определены разрывы между фактическими значениями эффективности и эталонными.

2. Предложен вариант принятия решения по результатам оценки эффективности использования радиочастотного спектра.

Список литературы

1. Вишняков, В. А. Модели для оценки эффективности использования радиочастотного спектра на основе мультиагентной технологии / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Вестник связи. 2020. № 6. С. 50–54.
2. Лакизо, П. Ю. Построение эталонных моделей сетей сотовой связи стандартов GSM и UMTS / П. Ю. Лакизо, А. А. Карпук, Н. И. Кабак // Проблемы инфокоммуникаций. 2021. № 2. С. 12–19.
3. Вишняков, В. А. Информационная оценка эффективности радиочастотного спектра с использованием многоагентной технологии / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Проблемы инфокоммуникаций. 2019. № 2. С. 53–58.
4. Вишняков, В. А. Информационное управление эффективностью при использовании радиочастотного спектра в Республике Беларусь / В. А. Вишняков, А. В. Табаньков // Системный анализ и прикладная информатика. 2014. № 1–3. С. 29–33.
5. Об объектах, находящихся только в собственности государства, и видах деятельности, на осуществление которых распространяется исключительное право государства [Электронный ресурс] // Закон Республики Беларусь от 15 июля 2010 г. № 169-3. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H11000169>. Дата доступа: 05.08.2022.

References

1. Vishnyakov V. A., Lakizo P. Yu. (2020) Models for Evaluating the Efficiency of Using the Radio Frequency Spectrum Based on Multi-Agent Technology. *Messenger of Communication*. (6), 50–54 (in Russian).
2. Lakizo P. Yu., Karpuk A. A., Kabak N. I. (2021) Construction of Reference Models of GSM and UMTS Cellular Communication Networks. *Problems of Infocommunications*. (2), 12–19 (in Russian).
3. Vishnyakov V. A., Lakizo P. Yu. (2019) Informational Assessment of the Effectiveness of the Radio Frequency Spectrum Using Multi-Agent Technology. *Problems of Infocommunications*. (2), 53–58 (in Russian).
4. Vishnyakov V. A., Tabankov A. V. (2014) Information Efficiency Management when Using the Radio Frequency Spectrum in the Republic of Belarus. *System Analysis and Applied Informatics*. (1–3), 29–33 (in Russian).
5. On Objects That Are Only Owned by the State, and Types of Activities, the Implementation of Which is Subject to the Exclusive Right of the State. *Law of the Republic of Belarus, July 15, 2010, No 169-3*. Available: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H11000169> (Accessed 5 August 2022) (in Russian).

Сведения об авторе

Лакизо П. Ю., магистр управления, проректор
Белорусской государственной академии связи

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Франциска Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: +375 17 272-96-45
E-mail: plan_vgks@mail.ru
Лакизо Павел Юрьевич

Information about the author

Lakizo P. Yu., Master of Management, Vice-Rector
of the Belarusian State Academy of Communications

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Francysk Skaryna St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: +375 17 272-96-45
E-mail: plan_vgks@mail.ru
Lakizo Pavel Yurievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.962.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОРАДАРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

И. Ю. МАЛЕВИЧ, А. С. ЛОПАТЧЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 09.12.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В последние годы активно проводятся исследования, направленные на развитие концепции построения и путей технической реализации георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением. Ключевыми предпосылками создания таких систем являются комплексный учет условий работы радиоканала в ближней зоне, включая особенности, связанные с многоканальным просачиванием компонент зондирующего сигнала в тракт приема, наличием многолучевых отражений от укрывающей поверхности, переменной скоростью электромагнитной волны, и обеспечение линейной обработки непрерывного группового широкополосного радиосигнала с большим динамическим диапазоном. Предложена и описана схема лабораторного стенда, предназначенного для исследования и оптимизации энергетических характеристик георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением в режимах с критическими уровнями отражений. Представлены результаты экспериментов по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала. Выполнены исследования откликов для двух типов антенн на разных высотах подвеса. Проведена оценка реакции системы на увеличение длительности зондирующего импульса и изменение типа оконной функции. Установлена эмпирическая зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением. Выполненные исследования позволят усовершенствовать энергетические характеристики георадаров с непрерывным ЛЧМ-излучением, повысив эффективность обнаружения малозаглубленных и приповерхностных объектов.

Ключевые слова: георадар, непрерывный сигнал, линейно-частотно-модулированное излучение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Малевич, И. Ю. Экспериментальная оптимизация энергетических характеристик георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55>.

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A GROUND PENETRATING RADAR WITH CONTINUOUS LINEAR-FREQUENCY-MODULATED RADIATION

IGOR YU. MALEVICH, ALEKSANDR S. LOPATCHENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 09.12.2022

Abstract. In recent years, research has been actively carried out aimed at developing the concept of construction and ways of technical implementation of ground penetrating radars with continuous wave linear-frequency-modulated (LFM) radiation. The key prerequisites for the creation of such systems are the complex consideration of the operating conditions of the radio channel in the near field, including the features associated with multi-

channel leakage of the probing signal components into the reception path, the presence of multipath reflections from the covering surface, the variable speed of the electromagnetic wave, and the provision of linear processing of a continuous group broadband radio signal with large dynamic range. The paper proposes and describes a scheme of a laboratory stand for LFM GPR research and optimization of the energy characteristics in modes with critical levels of reflections. The results of experiments on the analysis and optimization of the parameters of the end-to-end transfer characteristic of the radio channel are presented. Response studies were performed for two types of antennas at different suspension heights. The responses of the system to an increase in the duration of the probing pulse and a change in the type of window function were evaluated. An empirical dependence of signal losses during propagation in radio channels of LFM GPR has been established. The conducted studies will improve the energy characteristics of ground penetrating radars with continuous LFM radiation by increasing the detection efficiency of shallow and near-surface objects.

Keywords: ground penetrating radar, continuous signal, linear-frequency-modulated radiation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. (2023) Experimental Optimization of the Energy Characteristics of a Ground Penetrating Radar with Continuous Linear-Frequency-Modulated Radiation. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55> (in Russian).

Введение

В последние годы активно проводятся исследования, направленные на развитие концепции построения и путей технической реализации георадаров (ГР) с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) излучением [1–4]. Ключевыми предпосылками создания таких ГР являются комплексный учет условий работы радиоканала в ближней зоне, включая особенности, связанные с многоканальным просачиванием компонент зондирующего сигнала (ЗС) в тракт приема, наличием многолучевых отражений от укрывающей поверхности, переменной скоростью электромагнитной волны, и обеспечение линейной обработки непрерывного группового широкополосного радиосигнала с большим динамическим диапазоном. Эти обстоятельства обуславливают актуальность экспериментального исследования и оптимизации энергетических характеристик ГР с ЛЧМ ЗС.

Методика проведения эксперимента

Георадиолокационное зондирование с использованием непрерывного широкополосного ЛЧМ-сигнала основано на излучении, гомодинном приеме отраженных сигналов и оценке частот полученных компонент биений (f_{Bi}), соответствующих отражающим объектам:

$$f_{Bi} = 2\Delta f(r_z + r_m \varepsilon^{1/2})/cT_p, \quad (1)$$

где $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})$ – диапазон перестройки частот генератора, управляемого напряжением (ГУН); r_z – расстояние между антенной и поверхностью среды; r_m – расстояние между поверхностью среды и заглубленным объектом; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; T_p – время развертки по частоте.

Разрешающая способность по глубине, обеспечиваемая классическими методами спектрального оценивания, для таких ГР описывается выражением

$$\Delta L = c/(2\Delta f \varepsilon^{1/2}). \quad (2)$$

Разрешение ГР по поверхности в ближней зоне фактически определяется размерами антенн, а для получения поверхностной проекции обнаруживаемого объекта при площадных исследованиях обычно выполняется продольное и поперечное сканирование антенного блока. При поиске приповерхностных и малоуглубленных объектов важно, наряду с хорошим пространственным разрешением и большим (не менее 60 дБ) динамическим диапазоном ЛЧМ ГР, обеспечить энергетический баланс сигналов в радиоканале даже при наличии высокого уровня отражений от укрывающей поверхности.

На рис. 1 представлена функциональная схема лабораторного стенда, предназначенного для исследования и оптимизации энергетических характеристик ГР с ЛЧМ ЗС в режимах с критическими уровнями отражений.

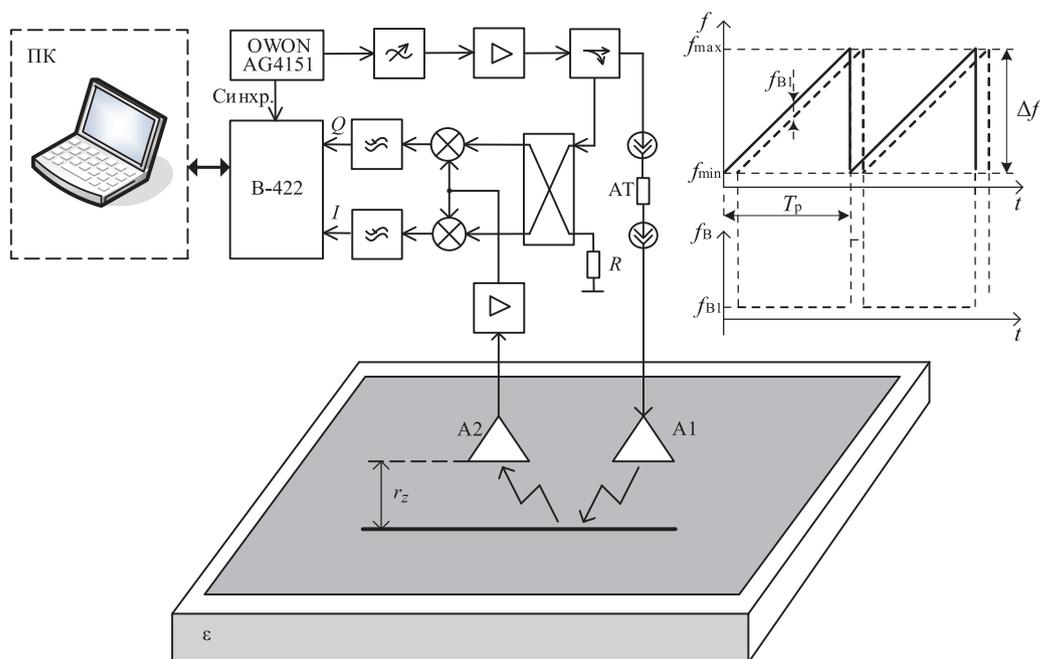


Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда для исследования георадаров с линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом

Fig. 1. Function diagram of a laboratory stand for linear-frequency-modulated ground penetrating radars research

В качестве поверхности раздела сред использовался лист фольгированного стеклотекстолита FR4 размерами 125×110 см, расположенный на бетонной поверхности. Высота подвеса r_z антенного блока, состоящего из излучающей A1 и приемной A2 антенн, регулировалась в диапазоне 0,1–1,5 м.

ГР выполнен по бистатической схеме с гомодинной обработкой принимаемых сигналов в квадратурных каналах. Радиотракт ГР, разработанный с учетом результатов, приведенных в [1–4], позволяет формировать и обрабатывать ЛЧМ-сигналы в диапазоне 1000–2000 МГц, дискретно (с помощью диссипативных SMA аттенюаторов (АТ)) регулировать от плюс 22 до минус 4 дБм выходную мощность ЗС и апробировать различные типы антенн (A1 и A2). Коэффициент шума тракта не превышает 7 дБ, а значение динамического диапазона – не менее 70 дБ.

Генератор OWON AG4151 (рис. 1) формирует для ГУН модулирующий линейный пилообразный импульс с управляемыми длительностью, периодом, амплитудой и смещением. Синхровыход генератора в начале каждого периода пилообразного импульса формирует строб, синхронизирующий цифровой осциллограф В-422, что позволяет получать десятиразрядные реализации сигналов биений, привязанные во времени к формированию ЗС. Персональный компьютер ПК выполняет управление программным обеспечением осциллографа, при помощи которого производится предварительная обработка сигналов, в частности, наложение временных окон, дополнение сигнала нулями и вычисление энергетического спектра при помощи быстрого преобразования Фурье с выводом результатов на монитор в реальном времени и удобном для восприятия формате.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

На первом этапе исследований энергетических характеристик ЛЧМ ГР выполняли эксперименты по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала при полном отражении ЗС от листа фольгированного стеклотекстолита. На рис. 2 приведены результаты выходных спектрограмм ГР для различных затуханий АТ: 0, 10, 20 и 26 дБ. Первый высокий отклик на графиках соответствует отражению от раскрытия антенны A1, второй (маркированный) с амплитудными значениями соответственно –1,5 дБм; –5,2 дБм; –13,0 дБм и –18,9 дБм – от металлизированной поверхности. На спектрограммах рис. 2, а, б зафиксированы компрессия принятого сигнала и «перетекание» энергии из основного лепестка в соседние. Наблюдаются также искажения амплитудной структуры откликов с высокими частотами биений и уменьшение динамического диапазона выходного сигнала.

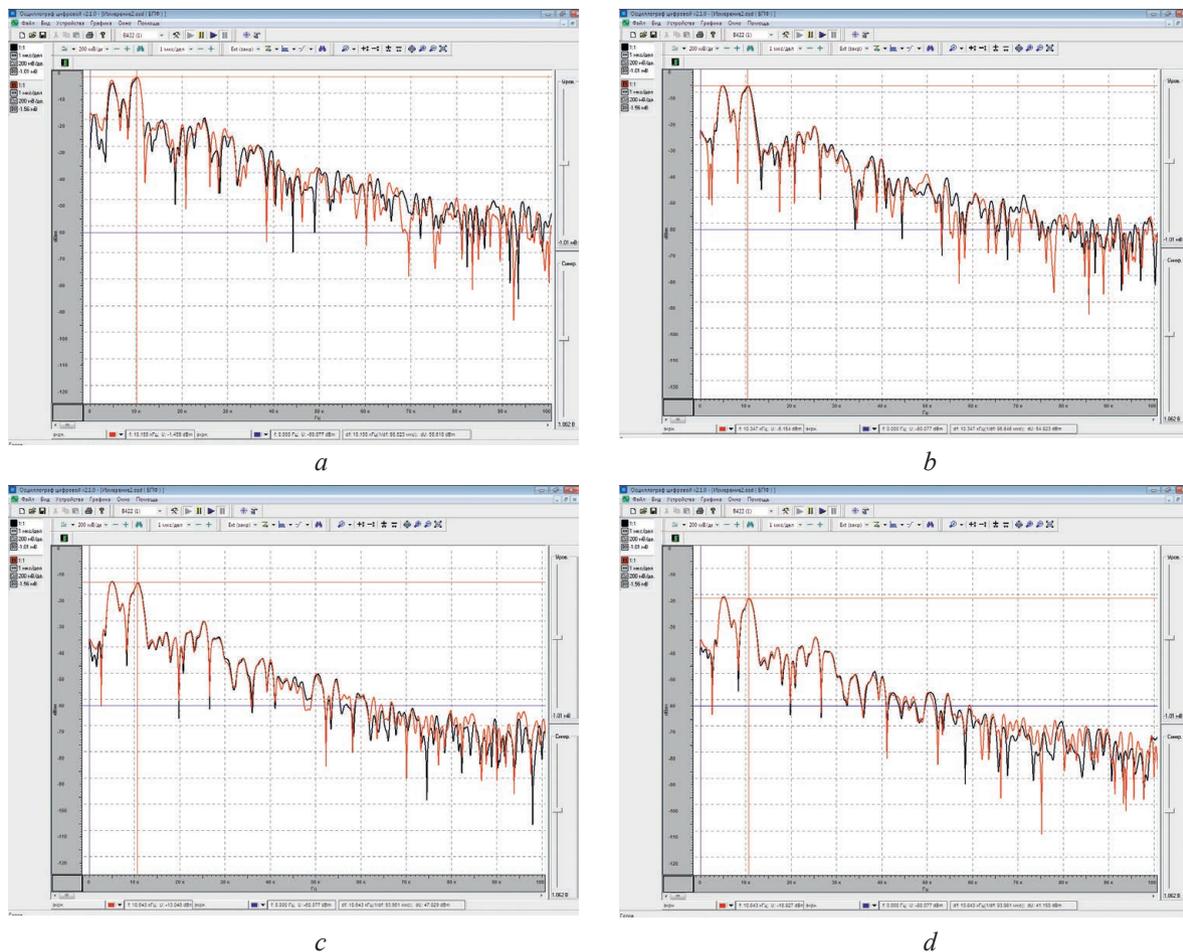


Рис. 2. Экспериментальная оптимизация сквозной передаточной характеристики радиоканала с линейно-частотно-модулированным георадаром

Fig. 2. Experimental optimization of the end-to-end transmission characteristics of radio channel with linear-frequency-modulated ground penetrating radar

Спектрограммы на рис. 2, *c, d* показывают сходный характер полученных реализаций и пропорциональность реакций на вносимое АТ-затухание, что свидетельствует об отсутствии перегрузки радиоканала.

С учетом полученных характеристик ГР для проведения последующих экспериментов мощность ЗС устанавливалась на уровне -4 дБм. На рис. 3 последовательно (сверху вниз) представлены результаты лабораторного тестирования ГР с различными высотами подвеса ($r_z = 150; 100$ и 50 см) над металлизированной поверхностью антенного блока с рупорами (рис. 3, *a*) и блока из антенн типа «бабочка» (рис. 3, *b*) [5].

Анализ спектрограмм, полученных в ГР с рупорными антеннами (рис. 3, *a*) показывает высокую степень пространственной концентрации энергии в радиоканале, что гарантирует хорошее разрешение такого прибора по поверхности при площадных исследованиях. Однако в выходном спектре наблюдается мощный отклик, обусловленный отражением от раскрытия А1, который при приближении антенного блока к укрывающей поверхности может маскировать объекты поиска, расположенные в ближней зоне ГР.

Для антенн «бабочка» над металлизированной поверхностью (рис. 3, *b*) очевидно, что уровень выходного сигнала для всех высот подвеса в сравнении с рупорными антеннами меньше на $7-8$ дБ, что практически соответствует разнице в коэффициентах усиления этих антенных блоков. Заметно также влияние расположения элементов лабораторной установки на результаты измерений при уменьшении высоты подвеса антенного блока. Однако отклик от металлической поверхности в таком ГР является доминирующим и хорошо спектрально структурирован, что позволяет надежно [2, 4] обнаруживать приповерхностные и малозаглубленные объекты.

На рис. 4 представлены результаты лабораторного тестирования ГР с антеннами типа «бабочка» [5] для трех высот подвеса ($r_z = 150; 100$ и 50 см) над бетонным основанием.

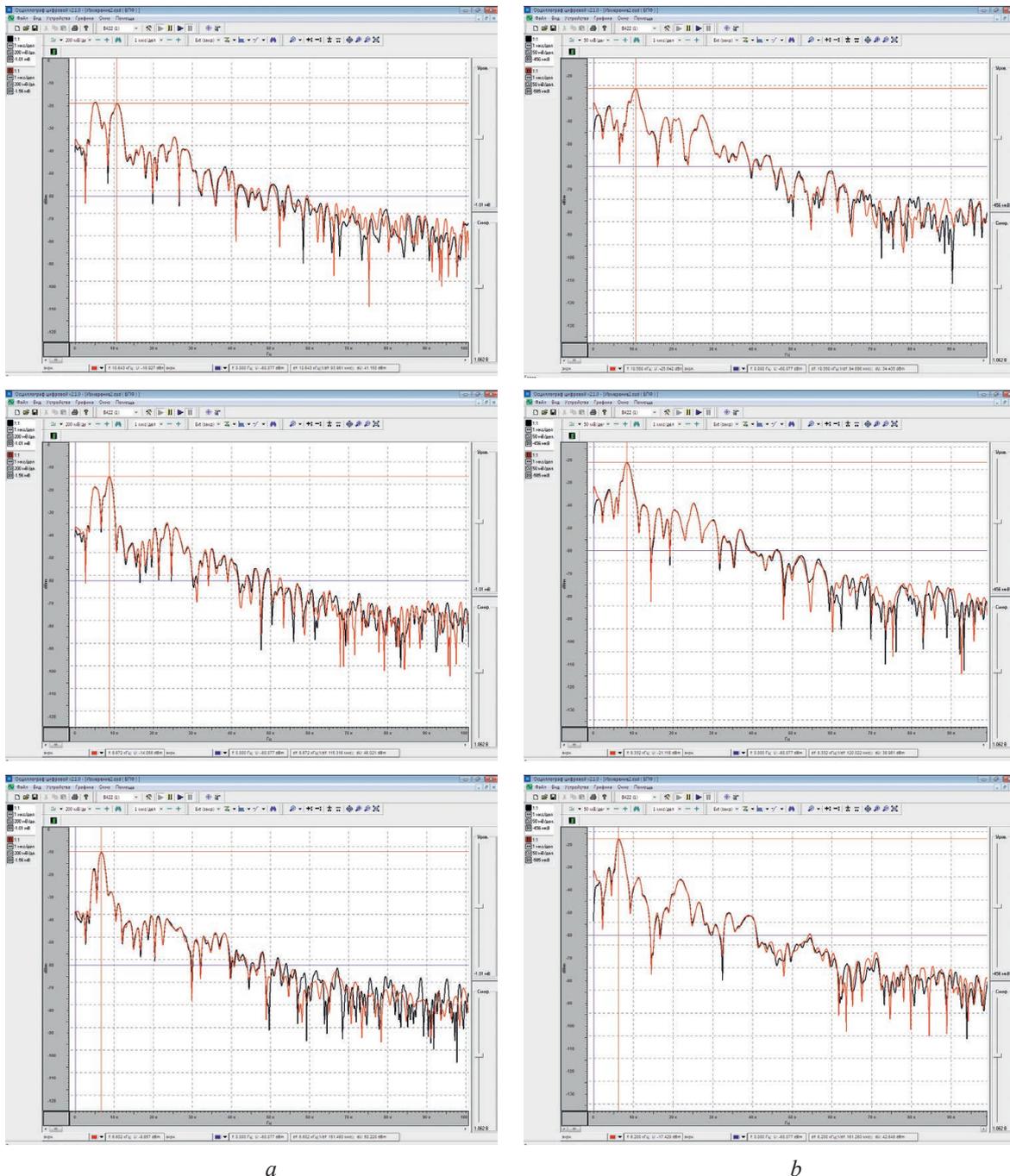


Рис. 3. Экспериментальные исследования откликов линейно-частотно-модулированных георадаров с регулируемой высотой подвеса антенн над металлизированной поверхностью
Fig. 3. Experimental studies of linear-frequency-modulated ground penetrating radars with adjustable antenna suspension height on the metallized surface

Экспериментальные зависимости на рис. 4 показывают, что наряду с подобием амплитудной структуры спектрограмм, уровень отраженного от поверхности сигнала на 7–8 дБ меньше, чем в случае листа фольгированного стеклотекстолита (рис. 3, *b*). Также имеет место наличие увеличения глубины проникновения ЗС в среду зондирования, что фиксируется большим динамическим диапазоном амплитуд отклика в дальней зоне спектрограммы.

На рис. 5 представлены результаты вычислений потерь сигнала P_{Π} при распространении в радиоканале ЛЧМ ГР в зависимости от высоты подвеса блока антенн r_z для отражающих поверхностей из фольгированного стеклотекстолита и бетона.

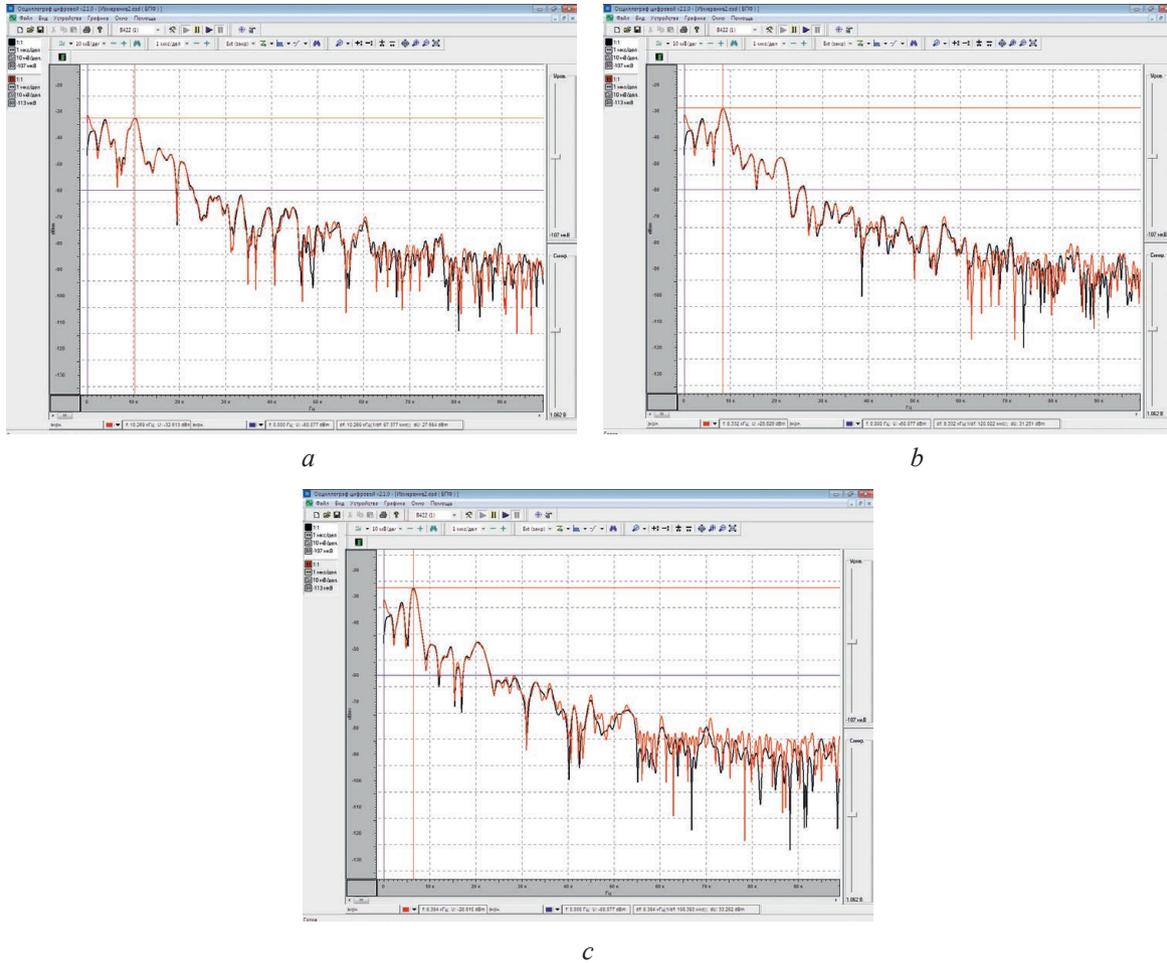


Рис. 4. Экспериментальные исследования откликов линейно-частотно-модулированных георадаров с регулируемой высотой подвеса антенн типа «бабочка» над бетонной поверхностью r_z , см:

$a - 150$; $b - 100$; $c - 50$

Fig. 4. Experimental studies of linear-frequency-modulated ground penetrating radars with adjustable height suspension of “butterfly” type antennas above the concrete surface r_z , cm:
 $a - 150$; $b - 100$; $c - 50$

С достаточной для практики точностью потери сигнала P_n , дБ, при распространении в радиоканале ЛЧМ ГР могут быть аппроксимированы зависимостью

$$P_n \approx 0,1r_z + M_{pc} - G_{аб}, \quad (3)$$

где M_{pc} – эмпирический поправочный коэффициент, зависящий от типа поверхности раздела сред (для бетона $M_{pc} \approx 28$ дБ, для металлических поверхностей $M_{pc} \approx 20$ дБ); $G_{аб}$ – коэффициент усиления антенного блока, дБ.

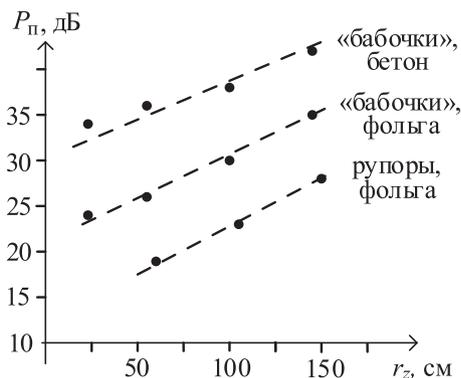


Рис. 5. Зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах линейно-частотно-модулированных георадаров от высоты подвеса
Fig. 5. Dependence of losses propagation in linear-frequency-modulated ground penetrating radars radio channels on the height of the suspension

На рис. 6 представлены результаты лабораторного тестирования ГР с антеннами типа «бабочка».

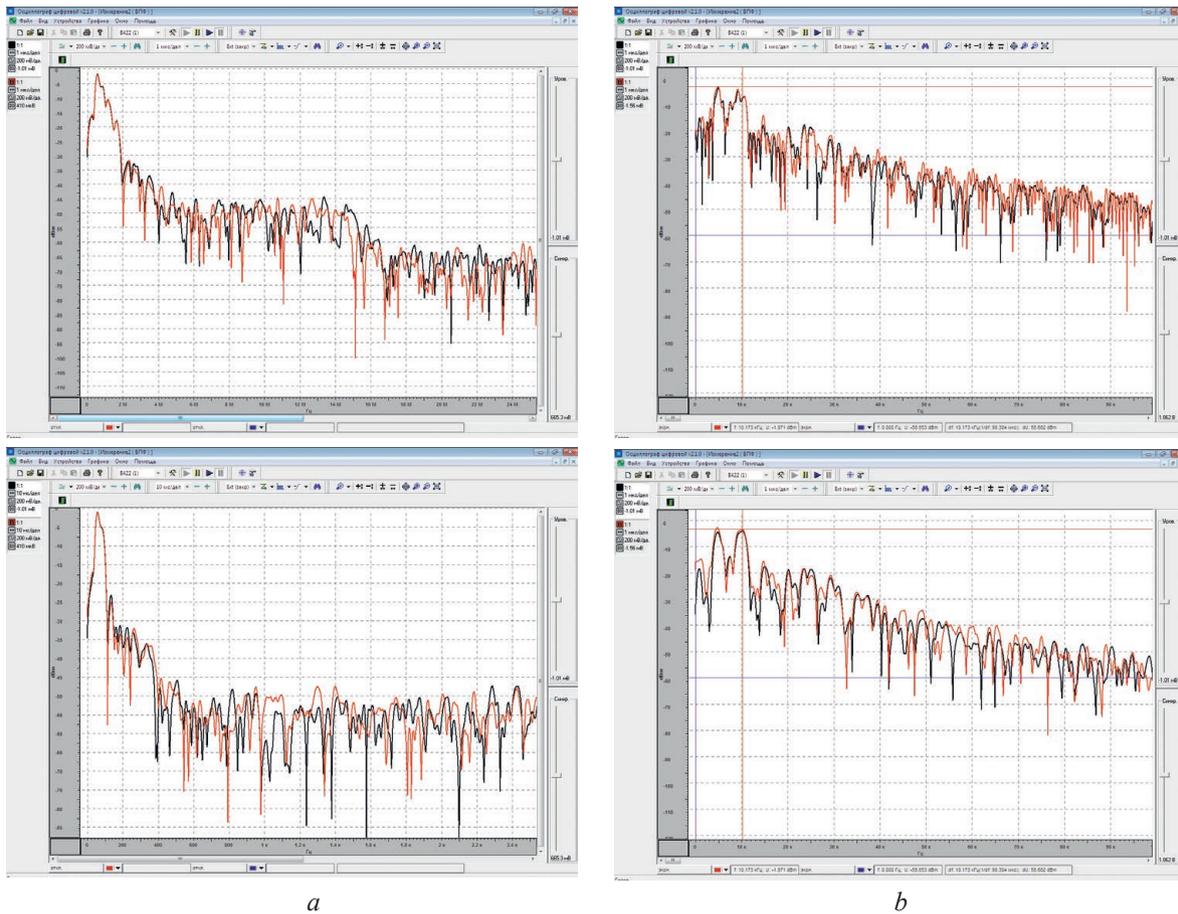


Рис. 6. Результаты тестирования линейно-частотно-модулированных георадаров:
a – для длительностей линейного пилообразного импульса (сверху вниз) $T_p = 10,24$ мкс и $T_p = 102400,0$ мкс;
b – с типами оконных функций (сверху вниз) – прямоугольным и Кайзера, $\beta = 4$

Fig. 6. Linear-frequency-modulated ground penetrating radars test results:
a – for durations of a linear sawtooth pulses (from top to bottom) $T_p = 10.24 \mu\text{s}$ and $T_p = 102400.0 \mu\text{s}$;
b – with types of window functions (from top to bottom) – rectangular and Kaiser, $\beta = 4$

Увеличение длительности модулирующего импульса с 10,24 мкс до 102400,0 мкс приводит к пропорциональному смещению составляющих компонент биений к началу координат. То есть ширина спектра отражений уменьшается, но без изменения разрешающей способности системы. На верхней спектрограмме рис. 6, *a* четко фиксируется область, выделяемая фильтрами нижних частот ГР, на нижней видно, что увеличение длительности T_p повышает энергию ЗС. Это позволяет улучшить отношение сигнал/шум и разделить влияние шумов тракта и шумов аналого-цифрового преобразователя. Изменение оконных функций (рис. 6, *b*) приводит к адекватным реакциям ЛЧМ ГР. Поэтому их подбор может быть выполнен на стадии настройки режимов работы ГР эмпирически, соблюдая компромисс между уровнем боковых лепестков спектрального преобразования и расширением главного лепестка.

Выводы

1. Рассмотрены вопросы разработки и технической реализации лабораторного стенда для исследования и оптимизации энергетических характеристик георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением в режимах с критическими уровнями отражений.
2. Представлены результаты экспериментов по анализу и оптимизации параметров сквозной передаточной характеристики радиоканала. Выполнены исследования откликов для двух типов антенн на разных высотах подвеса. Проведена оценка реакций системы на увеличение длительности зондирующего импульса и изменение типа оконной функции. Установлена эмпирическая зависимость потерь сигнала при распространении в радиоканалах георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением.

3. Проведенные исследования позволят усовершенствовать энергетические характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением, повысив эффективность обнаружения малозаглубленных и приповерхностных объектов.

Список литературы

1. Малевич, И. Ю. Самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель малозаглубленных объектов / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко, Т. В. Шукевич // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 5. С. 65–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72>.
2. Малевич, И. Ю. Портативный ЛЧМ радар подповерхностного зондирования / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко // Доклады БГУИР. 2019. Т. 119, № 1. С. 75–82.
3. Приемо-передающий тракт гомодинного типа с квадратурными каналами для ЛЧМ радара подповерхностного зондирования / И. Ю. Малевич [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. 2019. Т. 10, № 2. С. 12–17.
4. Лопатченко, А. С. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью / А. С. Лопатченко, И. Ю. Малевич, С. А. Савенко // Доклады БГУИР. 2015. № 3. С. 43–48.
5. Экспериментальные исследования и обоснование типа антенны для радара подповерхностного зондирования с непрерывным излучением / С. А. Савенко [и др.] // Наука и военная безопасность. 2014. Т. 41, № 1. С. 14–18.

References

1. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2022) Self-Propelled Subsurface Radar Detector of Low-Depth Objects. *Doklady BGUIR*. 20 (5), 65–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72> (in Russian).
2. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. (2019) Portable FMCW Ground Penetrating Radar. *Doklady BGUIR*. 119 (1), 75–82 (in Russian).
3. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V., Meledin K. I. (2019) Priyemo-Peredayushchiy Trakt Gomodinnogo Tipa s Kvadraturnymi Kanalami dlya LCHM Radara Podpoverkhnostnogo Zondirovaniya. *Problemy Infokommunikatsiy*. 10 (2), 12–17 (in Russian).
4. Lopatchenko A. S., Malevich I. Yu., Savenko S. A. (2015) LFM Ground Penetrating Radar with Increasing Resolution. *Doklady BGUIR*. (3), 43–48 (in Russian).
5. Savenko S. A., Malevich I. Yu., Bobkov Yu. Yu., Lopatchenko A. S. (2014) Eksperimental'nyye Issledovaniya i Obosnovaniye Tipa Antenny dlya Radara Podpoverkhnostnogo Zondirovaniya s Nepreryvnyim Izlucheniym. *Nauka i Voyennaya Bezopasnost*. 41 (1), 14–18 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Малевич И. Ю., д. т. н., профессор, гл. н. с. научно-исследовательской лаборатории помехозащищенности радиотехнических устройств и систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Лопатченко А. С., магистр, ст. преп. кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-96
E-mail: malevich@bsuir.by
Малевич Игорь Юрьевич

Information about the authors

Malevich I. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Principal Research Scientist at the Research Laboratory of Noise Protection of RF Devices and Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Lopatchenko A. S., M. of Sci., Senior Lecturer at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-96
E-mail: malevich@bsuir.by
Malevich Igor Yurievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-56-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.324

АВТОМАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА ПУТЕЙ ФИЗИЧЕСКИ НЕКЛОНИРУЕМОЙ ФУНКЦИИ ТИПА «АРБИТР»

А. Ю. ШАМЫНА, А. А. ИВАНЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 10.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрены особенности построения на базе программируемых логических интегральных схем физически неклонируемых функций типа «арбитр» (АФНФ). Обозначена проблема асимметрии пар путей АФНФ, отмечено негативное влияние данного явления на их характеристики. Приведено описание времяизмерительной системы на базе схемы кольцевого осциллятора, используемой для анализа временных характеристик путей АФНФ. Предложена методика автоматической балансировки задержек распространения сигнала через пути АФНФ на основе расчета корректирующего значения. Экспериментально подтверждена состоятельность методики балансировки исходя из улучшения характеристик АФНФ после ее применения. Представлено схематическое решение данной методики, которое может лечь в основу разработки схемы автокоррекции задержек через пути АФНФ с различным уровнем автономности.

Ключевые слова: физическая криптография, физически неклонируемые функции типа «арбитр», кольцевой осциллятор, автоматическая балансировка, программируемые логические интегральные схемы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шамына, А. Ю. Автоматическая балансировка путей физически неклонируемой функции типа «арбитр» / А. Ю. Шамына, А. А. Иванюк // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 56–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-56-62>.

AUTOMATIC BALANCING OF “ARBITER” PHYSICAL UNCLONABLE FUNCTION PATHS

ARTSIOM YU. SHAMYNA, ALEXANDER A. IVANIUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10.02.2023

Abstract. The features of building on the basis of programmable logic integrated circuits of “arbiter” physical unclonable functions (APUF) are considered. The problem of asymmetry of pairs of APUF paths is indicated and the negative impact of this phenomenon on their characteristics is noted. A time measuring system based on a ring oscillator scheme, which is used to analyze the time characteristics of APUF paths, is described. A method for automatic balancing of signal propagation delays through the APUF paths based on the calculation of the corrective value is proposed. The consistency of the proposed balancing technique is experimentally confirmed based on the improvement in the characteristics of the APUF after its implementation. A digital scheme of this technique is presented, which can form the basis for the development of a delay auto-correction scheme through APUF paths with different levels of autonomy.

Keywords: physical cryptography, “arbiter” physical unclonable functions, ring oscillator, automatic balancing, programmable logic integrated circuits.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Shamyna A. Yu., Ivaniuk A. A. (2023) Automatic Balancing of “Arbiter” Physical Unclonable Function Paths. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 56–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-56-62> (in Russian).

Введение

Применение физически неклонируемых функций (ФНФ) [1, 2] является одним из перспективных направлений развития физической криптографии. Решения на их основе задействованы в областях защиты цифровых устройств от нелегального копирования и использования, протоколах аутентификации, проверки подлинности, а также как источник случайности в различного рода генераторах случайных чисел.

Особое место среди видов ФНФ занимают ФНФ типа «арбитр» (АФНФ) [3]. Их принцип работы основывается на различиях в прохождении сигнала через симметричные пути цифровых устройств. Зачастую условие симметрии пары путей является обязательным для функционирования АФНФ. Однако на практике данное условие сложно соблюсти при реализации АФНФ на таких популярных платформах, как программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). В статье предлагается подход к синтезу схем АФНФ, основанный на корректировке заведомо несимметричных пар путей, что позволяет улучшить основные характеристики АФНФ.

Анализ задержек через пути физически неклонируемых функций типа «арбитр»

Для оценки необходимости коррекции проведены экспериментальные исследования путей классической схемы АФНФ, построенных на последовательно соединенных n парах мультиплексов [3]. С целью измерения значений задержек распространения сигналов через пути АФНФ была спроектирована и реализована на плате быстрого прототипирования экспериментальная установка (рис. 1), содержащая времяизмерительную систему на базе схемы кольцевого осциллятора.

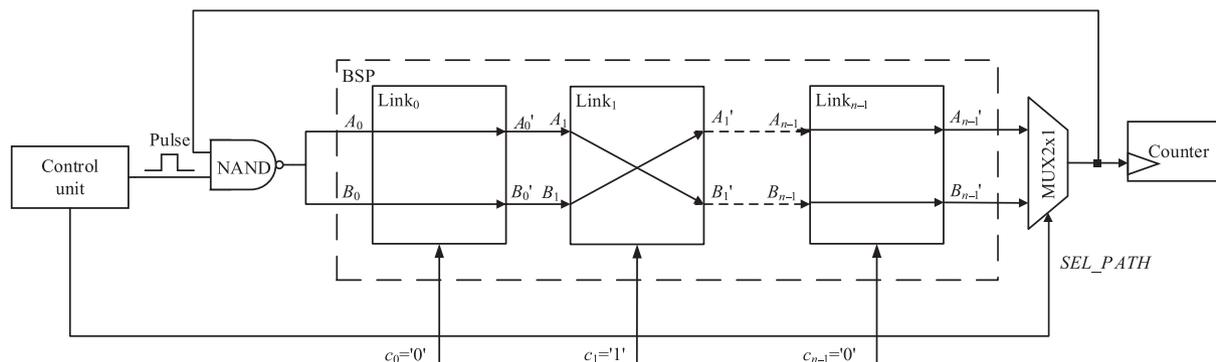


Рис. 1. Схема времяизмерительной системы на базе кольцевого осциллятора для классической схемы неклонируемых функций типа «арбитр»

Fig. 1. Scheme of a time measuring system based on a ring oscillator for a classical scheme of “arbiter” physical unclonable functions

Структура эксперимента аналогична схеме, описанной в [4]. Схема содержит блок управления Control unit, элемент NAND, обеспечивающий управление работой схемы в режиме осциллятора, а также исследуемый блок симметричных путей (БСП) BSP, используемый в классической АФНФ. БСП состоит из последовательно соединенных звеньев Link_{*i*}, $i \in [0, n-1]$, каждое из которых обеспечивает прямую либо перекрестную передачу сигнала с уникальной задержкой с входов A_{*i*} и B_{*i*} на выходы A'_{*i*} и B'_{*i*} соответственно в зависимости от значения разряда $c_i \in \{0, 1\}$ запроса C. Таким образом обеспечивается функционирование пары путей A и B, которые будут обладать уникальной конфигурацией для каждого значения запроса. Для подсчета импульсов, генерируемых схемой в режиме осцилляции, применяется двоичный синхронный счетчик. Обозначим задержку распространения через пути A и B как Δ_A и Δ_B соответственно. Двухвходной

мультиплексор MUX2x1 используется для выбора активного пути на основе значения селектирующего сигнала SEL_PATH . Разницу между задержками прохождения тестового сигнала двух путей для одного запроса определим как $\Delta(\Delta_A, \Delta_B)$. Перевод значения счетчика $Count_{Path}$ в величину задержки Δ_{Path} , где $Path \in \{A, B\}$, для каждого измерения осуществляется по формуле

$$\Delta_{Path} = \frac{MW}{Count_{Path}}, \quad (1)$$

где MW – окно измерения.

Для оценки временного распределения задержек для пути используется оценка среднеарифметического значения задержек, которое определяется по формуле

$$\mu_{Path} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \Delta_{Path}(C_k)}{N}, \quad (2)$$

где N – количество запросов; C_j – некоторый фиксированный запрос, $j \in [0, N-1]$ – порядковый номер запроса.

Эксперимент проводили для пары путей АФНФ с количеством звеньев $n = 64$. Всего было подано $N = 4 \cdot 10^6$ запросов, созданных с использованием генератора М-последовательности на базе LFSR. Эксперимент осуществляли на плате быстрого прототипирования Digilent Nexys 4 для четырех копий АФНФ на одном кристалле с ПЛИС Artix-7 xc7a100t csg324-1. Индексы копий АФНФ определяли как $d \in [0, D-1]$. Временное окно измерений $MW = kP_{SYS_CLK} = 0,384$ мс, где k – коэффициент масштабирования (принимали $k = 38\,400$), P_{SYS_CLK} – период системного синхросигнала, $P_{SYS_CLK} = 10$ нс. Результаты измеренных задержек Δ_A и Δ_B одной из копий АФНФ с индексом $d = 0$ на одном кристалле представлены на рис. 2 и в табл. 1.

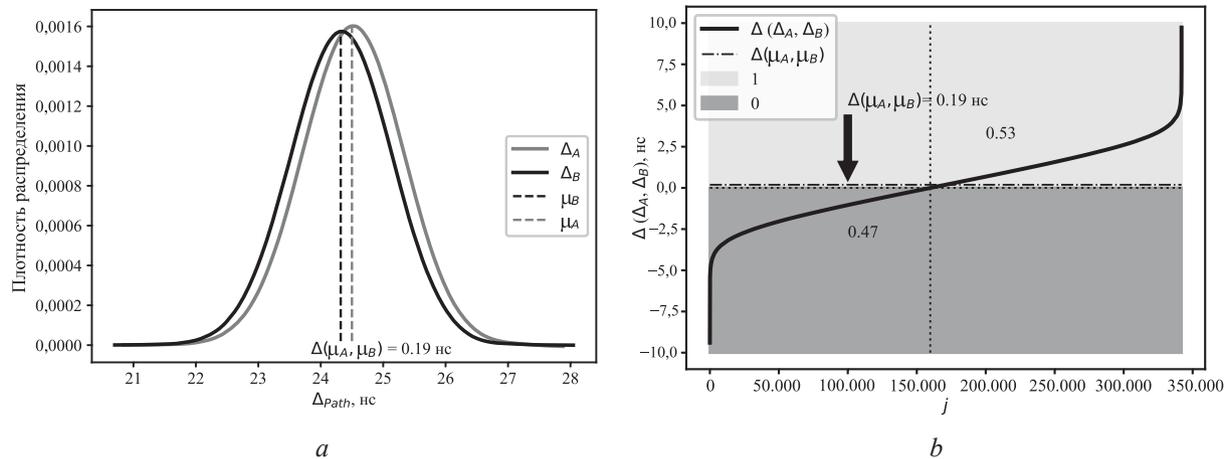


Рис. 2. Временное распределение измеренных задержек для схемы физически неклонлируемых функций типа «арбитр» с $n = 64$: a – плотность распределения значений задержек; b – разница задержек
Fig. 2. Time distribution of the measured delays for the “arbiter” physical unclonable functions scheme with $n = 64$: a – distribution density of delay values; b – delay difference

Таблица 1. Временные характеристики путей A и B для четырех копий физически неклонлируемых функций типа «арбитр»
Table 1. Time characteristics of “arbiter” physical unclonable functions paths A and B for four copies

d	μ_A	μ_B	$\Delta(\mu_A, \mu_B)$, нс
0	24,46229	24,27132	0,19097
1	23,26062	23,26379	-0,00317
2	24,99607	25,08964	-0,09357
3	22,83252	22,90313	-0,07061

Как видно из рис. 2, графики временных распределений задержек для двух путей копий АФНФ сдвинуты относительно друг друга во временной области, что может быть выражено как разница между средними значениями задержек для двух путей μ_A и μ_B соответственно. Этот факт подтверждается и данными табл. 1. Наличие такого сдвига свидетельствует об асимметрии построенных путей. Связано это, прежде всего, с реализацией рассматриваемой схемы на ПЛИС и ее автоматизированным синтезом. Такая особенность может привести к ухудшению характеристик АФНФ.

Балансировка путей физически неклонлируемых функций типа «арбитр»

Методология построения и использования АФНФ сводится к определению из пары пути, который при некотором запросе обладает большей (или меньшей) задержкой прохождения тестового импульса и выработки на основе этого бита ответа R , где $R \in \{0,1\}$. Аналитически эту процедуру можно свести к определению значения $\Delta(\Delta_A(C_j), \Delta_B(C_j))$. Таким образом, значение бита ответа R будет соответствовать знаку рассчитанной разницы $\Delta(\Delta_A(C_j), \Delta_B(C_j))$. При таком подходе важны не абсолютные значения задержек, а разница между ними. Поэтому при непосредственном их измерении можно произвести процедуру коррекции, включающую предварительное вычисление средних значений задержки для каждого пути μ_A и μ_B и определение корректирующего значения $\Delta(\mu_A, \mu_B)$. Затем полученная величина используется для коррекции каждого измерения [4]. Одним из способов оценки случайности вырабатываемых ответов ФНФ является расчет метрики единообразия *Uniformity*, которая выражает отношение нулевых и единичных ответов ФНФ. В статье данная метрика применяется в нормализованном к единичному значению виде согласно формуле

$$Uniformity = 1 - \frac{||R_0| - |R_1||}{N}, \quad (3)$$

где $|R_0|, |R_1|$ – мощность множеств ответов ФНФ $R = 0$ и $R = 1$ соответственно.

Рассчитанная характеристика единообразия ответов АФНФ составила для $d=0$ $Uniformity=0,8$. Такое значение может являться неудовлетворительным для большинства приложений, где используются ФНФ. С целью проверки данного предположения вычисляли средние значения для каждого пути, причем при расчете среднего использовалось различное число измерений F . Затем они были пересчитаны с учетом коррекции величины метрики *Uniformity* для разных вариантов корректирующего значения (рис. 3).

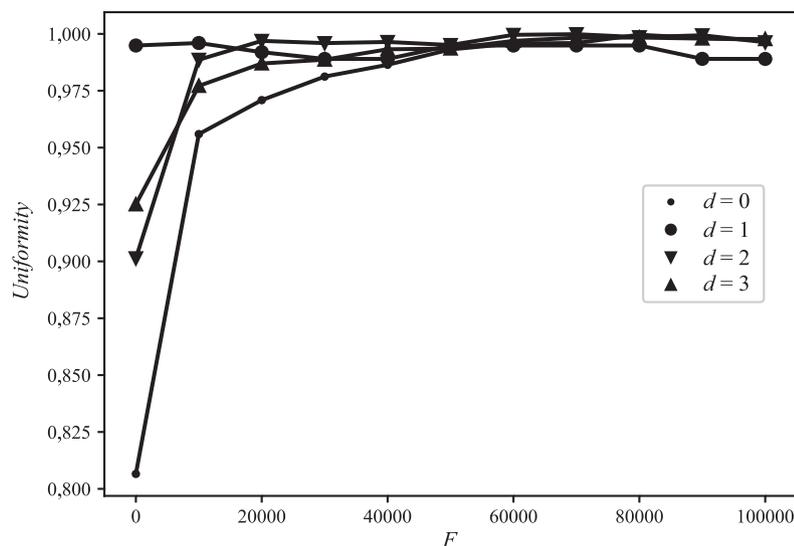


Рис. 3. Зависимость метрики от количества измерений для расчета среднего значения физически неклонлируемых функций типа «арбитр» с $n = 64$
Fig. 3. Dependence of the metric on the number of measurements to calculate the average value for the “arbiter” physical unclonable functions scheme with $n = 64$

Как видно из рис. 3, при расчете корректирующей величины от большого значения F и дальнейшей коррекции всех измерений эксперимента улучшается характеристика единообразия *Uniformity*. График временного распределения полученных задержек с учетом коррекции представлен на рис. 4.

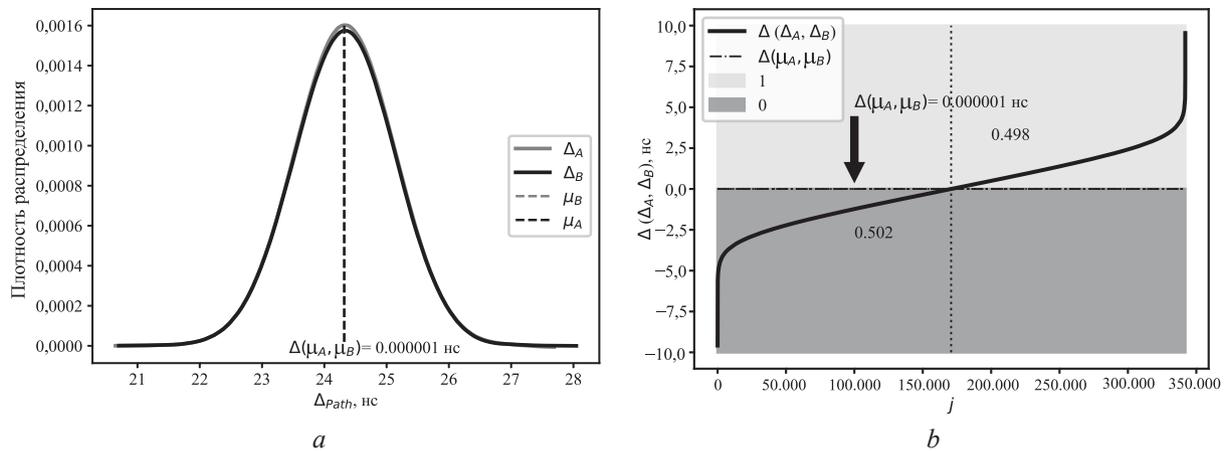


Рис. 4. Временное распределение измеренных задержек с применением коррекции для схемы физически неклонированных функций типа «арбитр» с $n = 64$:
 a – плотность распределения значений задержек; b – разница задержек

Fig. 4. Time distribution of the measured delays with correction applied for the “arbiter” physical unclonable functions scheme with $n = 64$:
 a – distribution density of delay values; b – delay differences

С учетом полученных результатов можно предположить, что добиться приемлемого значения корректирующего коэффициента можно за сравнительно небольшое число измерений. Допустим, что искомым значением будет $Uniformity = 0,99$. Тогда для всех копий АФНФ эксперимента достаточно $5 \cdot 10^4$ измерений для расчета корректирующего коэффициента. Стоит также отметить, что значения коррекции для каждого конкретного экземпляра являются различными (табл. 1). Поэтому существует необходимость в разработке решения, которое позволит автоматически производить расчет значения для коррекции за приемлемое время.

В результате выбрали корректирующее значение, дающее наилучшую величину $Uniformity$, с которой были пересчитаны другие характеристики. Для расчета основных характеристик АФНФ эксперимент воспроизводили $E = 20$ раз на $M = 4$ идентичных платах. До и после коррекции значения характеристики межкристальной U_{cmp} уникальности [5] составили $U_{cmp} = 0,01$ и $U_{cmp} = 0,02$ соответственно. Значения внутрикристальной уникальности и стабильности в результате коррекции также были немного улучшены. Характеристики единообразия $Uniformity$ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики физически неклонированных функций типа «арбитр»
Table 2. Characteristics of “arbiter” physical unclonable functions

d	<i>Uniformity</i>	
	до коррекции / before correction	после коррекции / after correction
0	0,80657	0,99589
1	0,99489	0,99599
2	0,90136	0,99957
3	0,92504	0,99837

Полученные результаты расчетных характеристик АФНФ демонстрируют улучшение после применения коррекции по предложенной методике балансировки. Это подтверждает состоятельность описанного подхода.

Схема балансировки путей физически неклонированных функций типа «арбитр»

При использовании АФНФ с предложенной методикой балансировки путей можно выделить две стадии: подготовки и нормального функционирования. На стадии подготовки выполняются следующие действия:

- вычисление среднего значения задержек μ_A и μ_B для путей A и B за приемлемое время;
- формирование корректирующих значений $\Delta(\mu(\text{Count}_A), \mu(\text{Count}_B))$ как целочисленных разностей между средними целочисленными величинами соответствующих путей.

Вычисление средних $\mu(\text{Count}_{\text{path}})$ и корректирующих $\Delta(\mu(\text{Count}_A), \mu(\text{Count}_B))$ значений в целочисленном домене не влияет на конечный результат, но менее затратно с точки зрения потенциальной аппаратной реализации. Этап подготовки может выполняться как при запуске устройства, так и с определенной периодичностью в зависимости от условий использования. В свою очередь, для работы АФНФ в нормальном режиме необходимо внедрение в схему выработки ответа АФНФ *Comparison* (рис. 5) учета корректирующего значения в виде сложения со значением одного из счетчиков схемы на каждом измерении. Разрядность счетчика выбирается исходя из формулы вычисления корректирующего значения.

Методику балансировки путей АФНФ, описанную выше, целесообразно представить в виде схемного описания. Такой подход благодаря наглядности позволяет перейти не только к целиком аппаратному решению, но и к комбинированному, где часть действий балансировки может быть перенесена на выполнение другими компонентами системы, в которой предполагается использование АФНФ. Схема выработки бита ответа ФНФ R основана на сравнении значений счетчиков Count_A и Count_B , полученных в результате измерения количества импульсов, регистрируемых за фиксированное время работы схемы в режиме кольцевого осциллятора (рис. 5).

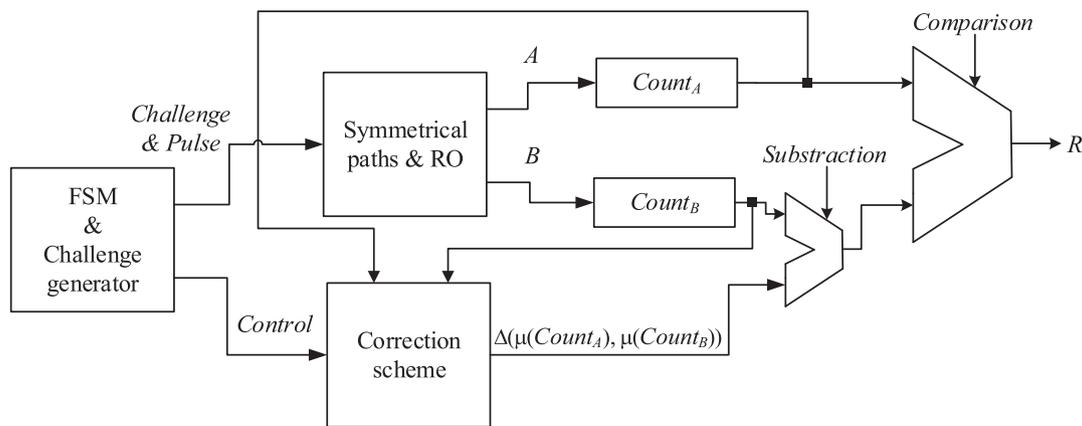


Рис. 5. Схема неклонировемых функций типа «арбитр» с коррекцией
Fig. 5. Scheme of “arbiter” physical unclonable functions with correction

Коррекция соответствует операции вычитания корректирующих значений $\Delta(\mu(\text{Count}_A), \mu(\text{Count}_B))$ с выбранного значения счетчика для каждого измерения, выполняемой блоком *Substraction*. Расчет корректирующих значений $\Delta(\mu(\text{Count}_A), \mu(\text{Count}_B))$ соответствует вычислению разницы между средними значениями двух счетчиков. Количество итераций для измерения среднего $\mu(\text{Count}_{\text{path}})$ может быть значительно уменьшено за счет генерации противоположных запросов с точки зрения результирующей разницы [6]. Конечный автомат FSM используется для управления режимом функционирования схемы. Генератор запросов *Challenge generator* применяется для подачи запросов, блок *Correction scheme* – для вычисления $\Delta(\mu(\text{Count}_A), \mu(\text{Count}_B))$ на этапе подготовки.

Выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют о состоятельности предложенного подхода. Процедура балансировки путей физически неклонировемых функций типа «арбитр» может значительно улучшить их характеристики. Применение таких функций с автокоррекцией потенциально может решить проблему их использования при временной и эксплуатационной деградации кристаллов цифровых устройств. В совокупности данное решение позволяет избежать проблем физически неклонировемых функций типа «арбитр», связанных с применением в качестве арбитра схемы на базе триггеров различных модификаций.

2. В дальнейшем планируется продолжить исследования в данном направлении, прежде всего, с улучшением расчета корректирующего коэффициента и со снижением аппаратных затрат.

Список литературы

1. Pappu, R. *Physical One-Way Functions: PhD Thesis in Media Arts and Sciences* / R Pappu. USA: Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2001. 154 p.
2. Silicon Physical Random Functions / B. Gassend [et al.] // *Proc. of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security*, Novem. 2002. P. 148–160.
3. Ярмолик, В. Н. Физически неклонлируемые функции / В. Н. Ярмолик, Ю. Г. Вашинко // *Информатика*. 2011. Т. 30, № 2. С. 92–103.
4. Шамына, А. Ю. Исследование временных параметров физически неклонлируемой функции типа арбитр с использованием кольцевого осциллятора / А. Ю. Шамына, А. А. Иванюк // *Цифровая трансформация*. 2022. Т. 28, № 1. С. 27–38. <https://doi.org/10.35596/2522-9613-2022-28-1-27-38>.
5. Ярмолик, В. Н. Физически неклонлируемые функции типа арбитр с заведомо асимметричными парами путей / В. Н. Ярмолик, А. А. Иванюк // *Доклады БГУИР*. 2022. 20, № 4. С. 71–79.
6. Клыбик, В. П. Метод увеличения стабильности физически неклонлируемой функции типа «АРБИТР» / В. П. Клыбик, С. С. Заливако, А. А. Иванюк // *Информатика*. 2017. № 1. С. 31–43.

References

1. Pappu R. (2001) *Physical One-Way Functions: PhD Thesis in Media Arts and Sciences*. USA, Cambridge, Massachusetts Institute of Technology. 154.
2. Gassend B., Clarke D., Van Dijk M., Devadas S. (2002) Silicon Physical Random Functions. *Proc. of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security, November*. 148–160.
3. Yarmolik V. N., Vashinko Y. G. (2011) Physical Unclonable Functions. *Informatika = Informatics*. 30 (2), 92–103 (in Russian).
4. Shamyna A. Yu, Ivaniuk A. A. (2022) Investigation of the Timing Parameters of the Arbitr-Based Physically Unclonable Function Using a Ring Oscillator. *Cifrovaya Transformaciya = Digital Transformation*. 28 (1), 27–38 (in Russian).
5. Yarmolik V. N., Ivaniuk A. A. (2022) Arbitr Physical Unclonable Functions with Asymmetric Pairs of Paths. *Doklady BGUIR*. 20 (4), 71–79 (in Russian).
6. Klybik V. P., Zalivako S. S., Ivanjuk A. A. (2017) Method of Increasing Stability Physically Non-Cloneable Function of “ARBITER” Type. *Informatika = Informatics*. (1), 31–43 (in Russian).

Вклад авторов

Шамына А. Ю. провел экспериментальные исследования, проанализировал и обобщил полученные результаты.

Иванюк А. А. осуществил постановку задачи для проведения исследования.

Authors' contribution

Shamyna A. Yu. conducted experimental studies, analyzed, and summarized the results.

Ivaniuk A. A. carried out the formulation of the problem for the study.

Сведения об авторах

Шамына А. Ю., магистр, ст. преп. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Иванюк А. А., д. т. н., доцент, профессор кафедры информатики, заведующий совместной учебной лабораторией «СК хайникс мемори солюшнс Восточная Европа» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 25 941-60-45
E-mail: shamyna@bsuir.by
Шамына Артём Юрьевич

Information about the authors

Shamyna A. Yu., M. of Sci., Senior Lecturer at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Ivaniuk A. A., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor at the Computer Science Department, Head of the Joint Educational Laboratory “SK Hynix Memory Solutions Eastern Europe” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 941-60-45
E-mail: shamyna@bsuir.by
Shamyna Artsiom Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-63-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 623.482

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОШИБОК КУРСА ПРИ НАВЕДЕНИИ САМОЛЕТА НА МАНЕВРИРУЮЩУЮ ВОЗДУШНУЮ ЦЕЛЬ

Д. В. ВЫСОЦКИЙ, Е. И. ХИЖНЯК, А. В. ХИЖНЯК

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Представлены теоретические расчеты, поясняющие происхождение ошибок расчета курса самолета в автоматизированной системе управления при наведении его на маневрирующую воздушную цель. Особенностью наведения на маневрирующую цель является выполнение виражей, для которых характерны перегрузки. Кривизну траектории на таких участках принято аппроксимировать окружностью определенного радиуса, зависящего от величины перегрузки и скорости полета на перехват. В автоматизированной системе управления текущий курс летательного аппарата определяется как направление движения по двум отметкам, соответствующим текущему и предыдущему моментам времени обновления информации. Для цели, движущейся прямолинейно, такой подход справедлив. Однако при совершении виража, когда траектория наведения есть кривая линия, истинный курс будет соответствовать касательной в точке виража. Разница этих подходов определяет ошибку вычисления курса. В статье приведен формульный расчет радиусов виражей для скоростей полета на перехват воздушной цели и перегрузок, а также расчет истинного и текущего курсов. Особенность методики состоит в строгом формализованном математическом описании. Приведены зависимости ошибок по курсу от скорости полета самолета на перехват и перегрузок на примере многофункционального истребителя Су-27.

Ключевые слова: наведение самолета, курс самолета, вираж.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Высоцкий, Д. В. Методика расчета ошибок курса при наведении самолета на маневрирующую воздушную цель / Д. В. Высоцкий, Е. И. Хижняк, А. В. Хижняк // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-63-69>.

METHODOLOGY FOR CALCULATING COURSE ERRORS WHEN AIMING AN AIRCRAFT AT A MANEUVERING AIR TARGET

DMITRY V. VYSOTSKI, EKATERINA I. KHIZHNIAK, ALEXANDER V. KHIZHNIAK

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.02.2023

Abstract. The article presents theoretical calculations that explain the origin of errors in the course of an aircraft in an automated control system when pointing at a maneuvering air target. The peculiarity of pointing at a maneuvering target is related to the execution of turns, which are characterized by overloads. The curvature of the trajectory in such areas is usually approximated by a circle of a certain radius, depending on the value of the overload and flight speed to intercept. In the automated control system, the current course of the aircraft is determined as the direction of movement by two marks corresponding to the current and previous moments of information update time. For a target moving in a straight line, this approach is valid. However, in a turn where the guidance path is a curved line, the true heading will correspond to the tangent at the turn point. The difference in these approaches

determines the error of the course calculation. This article provides a formulaic calculation of turn radii for flight speeds to intercept an air target and overloads, as well as the calculation of true and current courses. The peculiarity of the methodology is a strict formalized mathematical description. The article presents the dependences of heading errors from the aircraft's intercept flight speed and overloads using the example of the Su-27 multifunctional fighter.

Keywords: aircraft guidance, aircraft course, turn.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vysotski D. V., Khizhniak E. I., Khizhniak A. V. (2023) Methodology for Calculating Course Errors when Aiming an Aircraft at a Maneuvering Air Target. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 63–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-63-69> (in Russian).

Введение

Успешное наведение истребителя-перехватчика (ИП) на воздушную цель невозможно без эффективного взаимодействия между расчетом автоматизированного пункта наведения авиации (АПНА) и экипажем ИП [1–4]. Это связано, прежде всего, с тем, что пункт наведения обеспечен радиолокационной информацией о воздушной обстановке от радиолокационных станций (РЛС) и взаимодействующих пунктов управления во всей зоне ответственности. При этом, с одной стороны, ИП не обладает такими же возможностями всеракурсного обзора, как и наземные РЛС. С другой – для обеспечения скрытности наведения бортовые РЛС следует применять на конечном этапе наведения с целью применения оружия. При движении ИП по прямолинейной траектории или близкой к ней ошибки по курсу будут незначительными.

В статье приведены как теоретическое обоснование, так и расчеты оценок ошибок текущего курса самолета, выдаваемого АПНА¹, по отношению к истинному курсу для маневрирующей цели. Это связано с ошибками, обусловленными дискретностью обработки и выдачи информации в элементах автоматизированной системы управления, с ошибками измерения координат РЛС, ошибками передачи информации на борт по командной радиолинии управления и др.² Вычисления выполнялись для интервала времени, соответствующего темпу обновления информации в автоматизированной системе управления, равного 10 с, и установившегося выража летательного аппарата в горизонтальной плоскости [5, 6]. Данную методику можно применять и для другого темпа обновления информации.

Математическая формализация расчета ошибок курса

В современной научной литературе выражи, выполняемые ИП на i -м участке траектории, принято описывать радиусом некоторой окружности [7]

$$r_i = \frac{v_i^2}{g\sqrt{n_i^2 - 1}}, \quad (1)$$

где v_i – скорость летательного аппарата на i -м участке траектории, м/с; n_i – перегрузка летательного аппарата на выраже на i -м участке траектории; g – ускорение свободного падения ($\sim 9,8$ м/с²).

На рис. 1 показан выраж, выполняемый по окружности радиусом r_i в системе координат X, Y с центром в точке O [8]. Точкам A и B соответствуют моменты времени предыдущего и текущего обновления информации. Траектория, по которой пролетел ИП за это время, обозначена l . Координаты (x_2, y_1) и (x_1, y_2) соответствуют началу и концу этапа выража за указанный промежуток времени, т. е. точкам A и B .

Рассмотрим пример, в котором в качестве самолета используется многофункциональный ИП Су-27³. Исходя из тактико-технических характеристик, диапазон скоростей при движении на перехват зададим от 300 до 700 м/с, перегрузки летательного аппарата на выражах – в диапазоне от 2 до 9. Задаваясь скоростями и перегрузками самолета, рассчитаем радиусы выражей, используя выражение (1). Полученные значения радиусов сведены в табл. 1.

¹ Программное обеспечение изделия 7В800. Описание применения: ЕИРВ.10101-01 31 01. 2007. 91с.

² Каменский, В. Н. Межсамолетная навигация и наведение самолетов (вертолетов) / В. Н. Каменский. Монино: Военно-воздушная академия, 2003. Ч. 2. 403 с.

³ Руководство по летной эксплуатации самолета Су-27П. Книга I. 1987. 276 с.

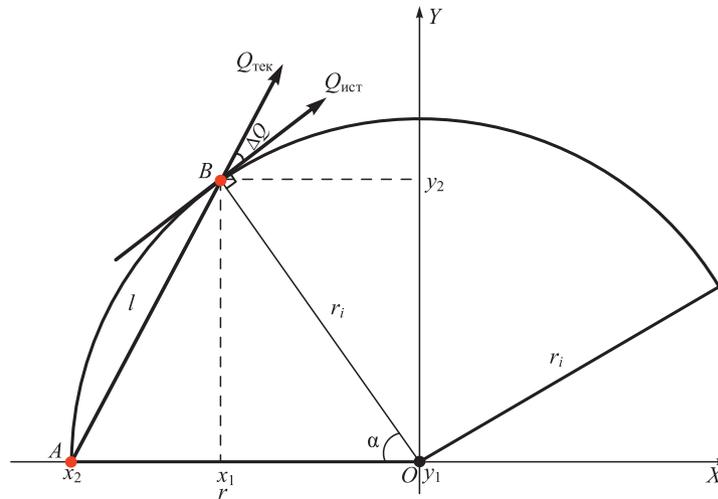


Рис. 1. Пример виража полета самолета в горизонтальной плоскости с заданным радиусом
Fig. 1. Example of a turn of an airplane flight in a horizontal plane with a given radius

Таблица 1. Результаты расчета радиуса виража самолета в зависимости от скорости полета и перегрузки
Table 1. Aircraft turn radius calculation results depending on flight speed and overload

Перегрузка n / Overload n	Радиус виража самолета, м, при скорости полета, м/с / Aircraft turn radius, m, at flight speed, m/s				
	300	400	500	600	700
2	5302,20	9426,13	14728,32	21208,79	28867,51
3	3246,92	5772,30	9019,22	12987,68	17677,67
4	2371,21	4215,49	6586,71	9484,86	12909,94
5	1874,61	3332,64	5207,25	7498,44	10206,21
6	1552,32	2759,69	4312,01	6209,30	8451,54
7	1325,55	2356,53	3682,08	5302,20	7216,88
8	1157,03	2056,95	3213,98	4628,14	6299,41
9	1026,77	1825,36	2852,13	4107,06	5590,17

На основании табл. 1 сформулируем математическую постановку задачи. Известны диапазон изменения скоростей полета ИП на перехват воздушной цели, возможные перегрузки и соответствующие им радиусы виражей. Требуется определить ошибку ΔQ по курсу полета ИП между текущим курсом $Q_{\text{тек}}$, рассчитанным в АПНА, и истинным курсом $Q_{\text{ист}}$ (рис. 1). Зная радиус и мгновенную скорость самолета, можно определить длину его пути за время обновления информации в автоматизированной системе управления ($T = 10$ с).

В АПНА текущий курс в момент времени, соответствующий точке B , определяется как луч, проведенный из A через B . Для упрощения вычислений расположим точку A на оси абсцисс, ее координаты $[x_2, O]$. Длины AO и BO равны r . Длина дуги окружности⁴ AB вычисляется по формуле

$$l_i = v_i T, \quad (2)$$

где v_i – мгновенная скорость летательного аппарата на i -м участке траектории; T – темп обновления информации в автоматизированной системе управления.

Угол α , град., равен отношению длины дуги к длине окружности⁵ (рис. 1)

$$\alpha = \frac{360l}{2\pi r}. \quad (3)$$

⁴ Ильин, В. А. Аналитическая геометрия / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. М., 1988. 223 с.

⁵ Яблонский, А. А. Курс теоретической механики / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. М., 1977. 367 с.

Уравнение прямой OB можно записать в виде

$$y = (\operatorname{tg} \alpha)x. \quad (4)$$

Координата точки B определяется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y = (\operatorname{tg} \alpha)x; \\ y^2 = r^2 - x^2, \end{cases} \quad (5)$$

решение которой запишется в виде:

$$\begin{cases} x_B = \frac{r}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{360l}{2\pi r} \right)}}; \\ y_B = \sqrt{r^2 - x_B^2}, \end{cases} \quad (6)$$

где x_B, y_B – координаты точки B .

Используя каноническую форму прямой, проходящей через две точки на плоскости, запишем уравнение прямой, проходящей через точки A и B [9]:

$$\frac{x - x_A}{x_B - x_A} = \frac{y - y_A}{y_B - y_A}. \quad (7)$$

Преобразуя (7) и взяв производную dy/dx , вычислим текущий курс самолета

$$Q_{\text{тек}} = \operatorname{arctg} \left(\frac{dy}{dx} \right). \quad (8)$$

Полученные значения текущего курса самолета для заданных радиусов виража, скорости полета и перегрузки представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета текущего курса самолета для разных радиусов виража в зависимости от скорости полета и перегрузки

Table 2. Results of calculating the current heading of the aircraft for different turn radius depending on speed and overload

Перегрузка n / Overload n	Текущий курс самолета, град., при скорости полета, м/с / Aircraft current heading, degrees, at flight speed, m/s				
	300	400	500	600	700
2	26,21°	22,16°	19,73°	18,10°	16,95°
3	36,47°	29,85°	25,88°	23,23°	21,34°
4	46,24°	37,18°	31,75°	28,12°	25,53°
5	54,15°	44,38°	37,51°	32,92°	29,65°
6	44,64°	51,52°	43,22°	37,68°	33,73°
7	35,16°	51,37°	48,90°	42,42°	37,79°
8	25,72°	44,29°	54,57°	47,14°	41,83°
9	16,30°	37,22°	49,78°	51,85°	45,87°

Истинное значение курса должно определяться как касательная к траектории в точке B , т. е. необходимо взять производную dy/dx в точке B для уравнения окружности

$$\frac{dy}{dx} = \left(\sqrt{r^2 - x^2} \right)' = \frac{-x}{\sqrt{r^2 - x^2}}. \quad (9)$$

Подставляя в выражение (9) $x = x_B$, можно вычислить истинный курс самолета

$$Q_{\text{ист}} = \operatorname{arctg} \left(\frac{-x_B}{\sqrt{r^2 - x_B^2}} \right). \quad (10)$$

Рассчитанные значения истинного курса самолета для заданных радиусов виража, скорости полета и перегрузок приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета истинного курса самолета для разных радиусов виража в зависимости от скорости полета и перегрузки

Table 3. Results of calculating the true heading of aircraft for different turn radius depending on speed and overload

Перегрузка n / Overload n	Истинный курс самолета, град., при скорости полета, м/с / The true heading of the aircraft, degrees, at flight speed, m/s				
	300	400	500	600	700
2	42,42°	34,31°	29,45°	26,21°	23,89°
3	62,94°	49,70°	41,76°	36,47°	32,69°
4	82,49°	64,37°	53,49°	46,24°	41,07°
5	98,31°	78,77°	65,02°	55,85°	49,30°
6	79,27°	93,05°	76,44°	65,36°	57,46°
7	60,33°	92,75°	87,80°	74,84°	65,57°
8	41,44°	78,58°	99,14°	84,28°	73,67°
9	22,59°	64,45°	89,56°	93,70°	81,75°

Уравнение прямой истинного курса запишем как уравнение прямой, проходящей через точку в заданном направлении (в рассматриваемом случае – через точку B)

$$y - y_B = k(x - x_B). \quad (11)$$

Тогда

$$y = kx + y_B - ky_B. \quad (12)$$

Математический расчет ошибок курса полета самолета

В табл. 4 представлен расчет ошибок между текущим курсом, выдаваемым АПНА, и истинным курсом полета самолета в зависимости от его скорости и перегрузки.

Таблица 4. Результаты расчета ошибок курса полета самолета в зависимости от его скорости и перегрузки
Table 4. Results of calculating the errors of the aircraft flight course depending on its speed and overload

Перегрузка n / Overload n	Ошибка курса самолета, град., при скорости полета, м/с / Aircraft heading error, degrees, at flight speed, m/s				
	300	400	500	600	700
2	16,21°	12,16°	9,73°	8,10°	6,95°
3	26,47°	19,85°	15,88°	13,23°	11,34°
4	36,24°	27,18°	21,75°	18,12°	15,53°
5	44,15°	34,38°	27,51°	22,92°	19,65°
6	34,64°	41,52°	33,22°	27,68°	23,73°
7	25,16°	41,37°	38,90°	32,42°	27,79°
8	15,72°	34,29°	44,57°	37,14°	31,83°
9	6,30°	27,22°	39,78°	41,85°	35,87°

С использованием значений радиусов виража на разных скоростях и перегрузках, приведенных в табл. 1, а также расчетов ошибок по курсу полета самолета (табл. 4) построены графики изменения ошибок по курсу от скорости полета и перегрузки (рис. 2).

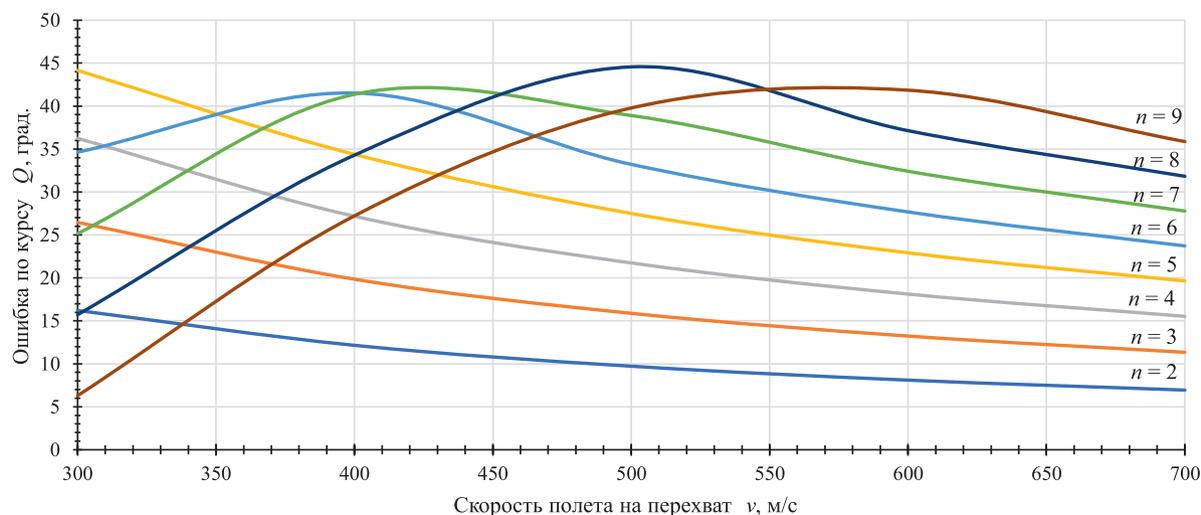


Рис. 2. Изменение ошибок по курсу полета самолета в зависимости от его скорости и перегрузки
Fig. 2. Change of errors in the flight course of the aircraft depending on its speed and overload

Выводы

1. Теоретические расчеты показывают, что ошибка по курсу между истинными и текущими значениями может составить до 45° . При этом в расчетах не были учтены некоторые факторы (например, ошибки измерения координат радиолокационных станций, задержки передачи информации на борт по командной радиолинии управления, погодные условия полета и другие), которые могут привести к изменению суммарной ошибки. Возникновение таких ошибок напрямую влияет на увеличение допустимых значений их отклонений по курсу⁶. Это особенно критично на конечном этапе наведения, поскольку приводит к увеличению времени выхода на рубеж ввода в бой, а также к смещению рубежа уничтожения (выполнения боевой задачи) [10].

2. Боевой расчет автоматизированного пункта наведения авиации должен знать природу возникновения этих ошибок, уметь рассчитывать и компенсировать их в процессе наведения. Учет ошибок при постоянных тренировках позволит отработать навыки по успешному наведению истребителя-перехватчика на реальную маневрирующую воздушную цель.

Список литературы

1. Паньков, С. Я. Теория и методика управления авиацией. В 2 ч. / С. Я. Паньков, Ю. Е. Забураев, А. М. Матвеев; под общ. ред. В. А. Мещерякова. Ульяновск: Ульянов. ин-т гражд. авиации, 2006. Ч. 1. 190 с.
2. Паньков, С. Я. Теория и методика управления авиацией. В 2 ч. / С. Я. Паньков, Ю. Е. Забураев, А. М. Матвеев; под общ. ред. В. А. Мещерякова. Ульяновск: Ульянов. ин-т гражд. авиации, 2006. Ч. 2. 156 с.
3. X. Rong Li. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I. Dynamic Models / X. Rong Li, Vesselin P. Jilkov // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39, No 4. P. 1333–1363.
4. Высоцкий, Д. В. Применение компьютерных симуляторов авиационной техники для подготовки боевых расчетов АПНА «Спрут» в режиме «Тренаж» / Д. В. Высоцкий, А. В. Хижняк // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2022. № 4. С. 24–31.
5. Остославский, И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И. В. Остославский, И. В. Стражева. М., 1969.
6. Чепурных, И. В. Динамика полета самолетов / И. В. Чепурных. Комсом.-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре госуд. ун-т, 2014. 112 с.
7. Дятко, А. А. Алгоритм моделирования траектории движения воздушного объекта / А. А. Дятко, С. М. Костромицкий, П. Н. Шумский // Доклады БГУИР. 2014. № 4. С. 41–47.
8. Математические модели относительного движения воздушных объектов в процедурах наблюдения в авиационных бортовых РЛС. Ч. 1. Математические модели в траекторной системе координат / А. С. Богачев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/5/text.pdf>. Дата доступа: 22.02.2023.
9. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. М.: Наука, 1980. 976 с.

⁶ Курс боевой подготовки пунктов управления авиацией ВВС и войск ПВО: приказ команд. ВВС и ВПВО от 17.04.2010 № 156. Прил. 14. Минск, 2010.

10. Постнов, А. А. Боевое управление авиацией. В 2 ч. / А. А. Постнов, С. Я. Паньков, Ю. Е. Забуряев; под общ. ред. В. А. Мещерякова. Ульяновск: Ульянов. ин-т гражд. авиации, 2007. Ч. 1. 120 с.

References

1. Pan'kov S. Y., Zaburaev Y. E., Matveev A. M. (2006) *Theory and Methodology of Aviation Management. Part 1*. Ul'yanovsk, Ulyanovsk Civil Aviation Institute. 190 (in Russian).
2. Pan'kov S. Y., Zaburaev Y. E., Matveev A. M. (2006) *Theory and Methodology of Aviation Management. Part 2*. Ul'yanovsk, Ulyanovsk Civil Aviation Institute. 156 (in Russian).
3. X. Rong Li, Vesselin P. Jilkov (2003) Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I. Dynamic Models. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*. 39 (4), 1333–1363.
4. Vysotski D. V., Khizhniak A. V. (2022) Application of Computer Simulators of Aviation Equipment for the Training of Combat Crews of APNA "Sprut" in the "Training" Mode. *Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*. 4, 24–31 (in Russian).
5. Ostoslavskiy I. V., Strajeva I. V. (1969) *Dynamics of Flight. Aircraft Trajectories*. Moscow (in Russian).
6. Chepurnyh I. V. (2014) *Dynamics of Aircraft Flight*. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University. 112 (in Russian).
7. Dyatko A. A., Kostromitski S. M., Shumski P. N. (2014) Algorithm of Modeling the Trajectory of an Aerial Object. *Doklady BGUIR*. (4), 41–47 (in Russian).
8. Bogachev A. S., Merkulov V. I., Chernov V. S., Gusarov S. B. (2018) Mathematical Models of Relative Motion of Air Objects in Observation Procedures in Airborne Radars. Part 1. Mathematical Models in a Trajectory Coordinate System. *Journal of Radio Electronics*. (2). Available: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/5/text.pdf> (Accessed 22 February 2023) (in Russian).
9. Bronshtejn I. N., Semendyaev K. A. (1980) *Handbook of Mathematics*. Moscow, Science Publ. 976 (in Russian).
10. Postnov A. A., Pan'kov S. Ya., Zaburaev Y. E. (2007) *Combat Aircraft Management. Part 1*. Ulyanovsk, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation. 120 (in Russian).

Вклад авторов

Хижняк А. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования и формулировку выводов.

Хижняк Е. И. осуществила математическую формализацию расчета ошибок курса.

Высоцкий Д. В. осуществил математические расчеты и обобщил результаты расчетов.

Authors' contribution

Khizhniak A. V. formulated the problem for the study and the conclusions.

Khizhniak E. I. carried out a mathematical formalization of the calculation of course errors.

Vysotski D. V. performed mathematical calculations and summarized the results of the calculations.

Сведения об авторах

Высоцкий Д. В., адъюнкт Военной академии Республики Беларусь

Хижняк Е. И., ст. преп. кафедры высшей математики Военной академии Республики Беларусь

Хижняк А. В., к. т. н., доцент, вед. н. с. 2-й группы научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления Военной академии Республики Беларусь

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, просп. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
Тел.: +375 25 789-35-95
E-mail: ludic2008@yandex.ru
Высоцкий Дмитрий Владимирович

Information about the authors

Vysotski D. V., Adjunct of the Military Academy of the Republic of Belarus

Khizhniak E. I., Senior Lecturer at the Department of Higher Mathematics of the Military Academy of the Republic of Belarus

Khizhniak A. V., Cand of Sci, Associate Professor, Leading Researcher of the 2nd Group of the Research Laboratory at the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220
Military Academy of the Republic of Belarus
Tel.: +375 25 789-35-95
E-mail: ludic2008@yandex.ru
Vysotski Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-70-77>

Original paper

UDK 681.3

ALGORITHMS FOR SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR MANUFACTURING SAMPLES OF STRUCTURALLY COMPLEX PRODUCTS

ALEXANDER V. PETUKHOV

Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Submitted 28.10.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

Abstract. The aim of the study is to develop a mathematical model for the synthesis of technological operations in the structure of algorithms for a system of automated design of technological processes. When solving the problem of synthesis of technological operations in the structure of algorithms of the automated design system of technological processes for manufacturing prototypes of structurally complex products, the following algorithms are used: solving the direct choice problem; formation of a set of possible alternatives; checking possible alternatives for admissibility; formation of a set of acceptable alternatives; determining the set of desired typical technological solutions and optimizing the choice of solutions. A block diagram of the system of algorithms for the process of synthesis of technological operations, based on a combination of individual and standard technological solutions in the design of technological processes for the experimental production of prototypes of structurally complex products, has been obtained.

Keywords: synthesis problem, technological operations, structurally complex products, modeling of decision making.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interest.

For citation. Petukhov A. V. (2023) Algorithms for Synthesis of Technological Operations for Manufacturing Samples of Structurally Complex Products. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 70–77. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-70-77>.

АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. В. ПЕТУХОВ

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(г. Гомель, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 28.10.2022

Аннотация. Разработана математическая модель синтеза технологических операций в структуре алгоритмов системы автоматизированного проектирования технологических процессов. При выполнении данной задачи в случае изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий используются алгоритмы: решения задачи прямого выбора, формирования множества возможных альтернатив, проверки возможных альтернатив на допустимость, формирования множества допустимых альтернатив, определения множества искомых типовых технологических решений и оптимизации выбора решений. Получена структурная схема системы алгоритмов процесса синтеза технологических операций на основе сочетания индивидуальных и типовых технологических решений при проектировании технологических процессов экспериментального производства опытных образцов структурно-сложных изделий.

Ключевые слова: задача синтеза, технологическая операция, структурно-сложное изделие, моделирование принятия решений.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Петухов, А. В. Алгоритмы синтеза технологических операций изготовления опытных образцов структурно-сложных изделий / А. В. Петухов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 70–77. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-70-77>.

Introduction

When creating a new product, a special place is occupied by the production of a prototype. This process completes the design development of the product. After it, the technological preparation of serial production begins [1]. Increased competition among developers and manufacturers of high-tech modern equipment demonstrates examples of a significant reduction in the production time of a prototype of a structurally complex product. The study of the functional structure of the system of technological preparation for the production of prototypes [2] shows that the most significant time is spent on the design of technological processes. This circumstance served as motivation for studying the problem of synthesizing technological operations in the structure of algorithms for the automated design of technological processes for manufacturing prototypes of structurally complex products.

The use of the theory of choice and decision making in the synthesis of rational options for technological operations in the production of prototypes of structurally complex products makes it possible to determine the following system parameters:

- composition and structure of system algorithms;
- input and output data of algorithms;
- reference data of the system;
- interconnection of system algorithms.

In the theory of choice and decision making, a formal description of the decision problem is expressed by the formula

$$\langle \Omega_A, PO \rangle, \quad (1)$$

where Ω_A is represented by many possible solutions (alternatives); PO is the principle of optimality, allowing one to choose the best solutions [3].

The solution of problem (1) showed that the following algorithms are needed to automate the synthesis of technological operations under the specified conditions:

- solution of the problem of direct choice;
- formation of a set of possible alternatives Ω_P ;
- checking possible alternatives for admissibility;
- formation of a set of feasible alternatives Ω_D ;
- determination of the set Ω_{r_T} of required typical technological solutions;
- optimization of the solution choice [4].

The aim of the study was to develop a block diagram of a system of algorithms for the process of synthesis of technological operations based on a combination of individual and standard technological solutions in the design of technological processes for the experimental production of prototypes of structurally complex products.

Algorithms for solving the problem of direct choice and the formation of a set of possible alternatives

The mathematical expression of the PO optimality principle is the selection function C_{PO} , and the solution to problem (1) is a subset Ω_{PO} of the set of alternatives Ω_A , i. e. $\Omega_{PO} \subset \Omega_A$; while $C_{PO}(\Omega_A) = \Omega_{PO}$. To apply problem (1) and methods for its solution to the choice of typical technological solutions, depending on the previously made individual decisions, first of all, it is necessary to determine the set of alternatives Ω_A .

In the general case, all possible complete technological solutions r with fixed, i. e. individual technological solutions specified by the technologist $r'_i : r = (r'_i, r_T)$ are fed to the input of the process of making technological decisions [5]. For the technological process being designed, from all solutions r submitted

to the input of the technological decision-making process, only those are selected for which the condition is satisfied $r_T = f(r_i')$. Since the decisions r_i' are fixed for each designed technological process, then in fact these decisions are fed to the input of the technological decision-making process, and the set of typical technological solutions R_T is a set of alternatives $\Omega_A = R_T$.

To ensure the solvability and reduce the complexity of solving problem (1), as well as to reduce the time of searching for solutions, it is necessary to perform a phased narrowing of the search area. To do this, on the set Ω_A , a set of possible r_i' alternatives Ω_P is allocated. Then, on the set Ω_P , the set of feasible alternatives Ω_D is allocated, which constitutes the desired set of alternatives. At the same time, $\Omega_P \subset \Omega_A$, $\Omega_D \subset \Omega_P$, the sequential selection of sets Ω_P and Ω_D from the set of alternatives Ω_A becomes possible after a specific solution r_i' is received at the input of the system. In this case, two selection problems arise: which constitutes the desired set of alternatives:

$$\langle \Omega_A, PO_1 \rangle; \quad (2)$$

$$\langle \Omega_P, PO_2 \rangle. \quad (3)$$

The solution to problem (2) is the set Ω_P , and the solution to problem (3) is the set Ω_D of alternatives, of which as a result of solving the problem

$$\langle \Omega_D, PO_3 \rangle \quad (4)$$

the desired typical technological solution r_T' is determined that satisfies the condition f for a given r_i' .

In the general case, the solution to problem (4) may turn out to be not one, but a number of solutions r_T' , which will make up the set $\Omega_{r_T'} : C_{PO_3}(\Omega_D) = \Omega_{r_T'}$. Then, in order to identify one (optimal) solution r_T' it is necessary to solve the problem

$$\langle \Omega_{r_T'}, PO_4 \rangle. \quad (5)$$

Since in this case it is possible to provide all sets $\Omega_{r_T'}$ (for example, sets of similar drills, gauges, etc.) and formulate in advance the optimality principle PO_4 for all $r_T' \in \Omega_{r_T'}$, task (5) will be an optimization problem. Let us explain the above with a specific example. Suppose that it is necessary to develop a technological process for manufacturing a part. The result of choosing the type of production of the part from the existing alternatives (casting, forming, machining, welding, etc.) depends on the configuration, material and production volume of the part. Suppose that the technologist has made a directive decision to manufacture the part by machining. This is a prior individual decision r_i' . It defines the set of existing alternatives Ω_A as a complete set of existing machining operations. This set constitutes a set of typical technological solutions R_T , which in this case is a set of alternatives $\Omega_A = R_T$. The gradual narrowing of the search area occurs when taking into account the specific composition of the factory equipment. At the same time, on the set Ω_A , a set of possible operations for manufacturing the part Ω_P is distinguished. Definition of valid alternatives Ω_D , i. e. the set of operations that make up the desired set of operations (screw-cutting operation, CNC turning operation, etc.) is determined by comparing the parameters of the part (overall dimensions, machining accuracy, annual output) with the technical characteristics of the machines on which a particular operation is performed. If there are several feasible alternatives Ω_D , then it is necessary to use the previously formulated principle of optimality. In this case, alternatives Ω_D can be evaluated at the minimum cost per hour of work to operate the machine to perform the operation.

One of the features of the computer-aided design of technological processes, which implements the method of combining solutions, is the ability of the technologist to directly set standard technological solutions, which are conveniently called directive. The need to specify directive technological solutions may, for example, arise in the development of technological processes that require the use of a special tool in certain operations that is not in the regulatory and reference base of the system.

Let us designate the set of directive technological solutions as R_{Dir} . Then problem (1) is a direct choice problem if for the considered transition (operation) the typical solution r_T' is contained in R_{Dir} , i. e. $r_T' \in R_{Dir}$. In this case, the solution to problem (1) is the typical solution $r_T' : C_{PO}(\Omega_A) = \{r_T' | \forall r_T' \in R_{Dir}\}$ given by the technologist. In this case, there is no need to solve problems (2)–(5).

The input data of the algorithm for solving the direct choice problem are the elements of the set R_{Dir} of directive decisions. The output of the algorithm is the elements of the set $C_{PO}(\Omega_A)$, i. e. typical technological solutions specified in this case by the technologist-user of the system. At the same time, it is advisable to arrange the set R_{Dir} in the form of the initial data of the system, adding to it all the individual decisions of the technologist, adopted by him for this technological process. Then the functional purpose of the algorithm under consideration will be the selection of explicitly specified standard technological solutions from the entire flow of initial data of the system.

If absent in R_{Dir} , i. e. in the initial data of the system, standard technological solutions or when they are exhausted, i. e. when the condition $\neg \exists r_T^i \in R_{Dir}$ for the next transition of the technological operation is met, control is transferred to the algorithms for generating the desired set of alternatives. Following formula allows us to present an algorithm for generating a set of possible alternative solutions:

$$C_{PO}(\Omega_A) = \Omega_P^{r_{me}} \cup \Omega_P^{r_{cut}} \cup \Omega_P^{r_{aux}} \cup \Omega_P^{r_{meas}}, \quad (6)$$

where $\Omega_P^{r_{me}}$ is the name and model of the equipment; $\Omega_P^{r_{cut}}, \Omega_P^{r_{aux}}, \Omega_P^{r_{meas}}$ is the cutting, tool; measuring tools.

The input of the algorithm for determining possible solutions is the set R_{Dir} containing the solution r_{to} (operation name) represented as an operation code. For the functioning of the algorithm, a directory of operations is needed, in which each operation is associated with a certain type of equipment. The output of the algorithm is the elements of the set $\Omega_P^{r_{me}}$. Upon completion of the algorithm, control is transferred to the algorithm for determining transition texts.

The input data for determining codes of possible wordings of transition texts are descriptions of the surfaces to be machined and the selected type of cutting tool. When functioning, the algorithm uses a directory of parts surfaces, where a correspondence is established between the surface type and a possible transition code, and a cutting tool directory, in which a correspondence is established between the types of cutting tool and possible transition text wording codes. Further control is transferred to the algorithm for determining the admissible wordings of transition texts.

The input data for the algorithm for selecting possible types of cutting tools are the descriptions of the surfaces to be machined (when creating systems with graphical support), the text of the transition and the given model of the equipment on which this operation is performed. For the functioning of the algorithm, a directory of parts surfaces is required, in which each type of surface is associated with one or more specific types of cutting tools and an equipment directory, where each equipment code corresponds to certain types of cutting tools. The output of the algorithm is the elements of the set $\Omega_P^{r_{cut}}$ of possible types of cutting tool. Upon completion of the algorithm, control is transferred to the algorithm for determining the permissible types of cutting tool.

The input data for the algorithm for determining the possible types of auxiliary tool is the type of the selected cutting tool and the given equipment model. The algorithm works using a cutting tool directory containing the established correspondence between the types of cutting tool, auxiliary tool and equipment directory, which reflects the correspondence between the equipment model specified by the code and the types of auxiliary tools that can be installed on this equipment. The output of the algorithm is the elements of the auxiliary tool set $\Omega_P^{r_{aux}}$. Upon completion of the algorithm, it is advisable to transfer control to the algorithm for determining the permissible types of auxiliary tool.

The input data for the algorithm for determining possible types of measuring tools (when creating systems with graphical support) are descriptions of the surfaces to be machined, reflecting their shape, controlled dimensions and location relative to other surfaces of the part. For the functioning of the algorithm, a directory of parts surfaces is needed, in which certain types of measuring tools correspond to each surface type. For systems without graphical support, the input data can be a processed element and its characteristic. It is convenient to transfer further control to the algorithm for determining the permissible types of the measuring tool.

Algorithms for generating a set of feasible alternatives and determining the desired solutions

The solution of problem (3) – the set of feasible alternatives can be represented as

$$C_{PO_2}(\Omega_P) = \Omega_D = \Omega_D^{r_{me}} \cup \Omega_D^{r_{cut}} \cup \Omega_D^{r_{aux}} \cup \Omega_D^{r_{meas}}. \quad (7)$$

Formula (7) shows that the set Ω_D of feasible alternatives can be formed using four algorithms, each of which generates one of the following feasible technological solutions: $\Omega_D^{r_{me}}$ – equipment name; $\Omega_D^{r_{cut}}$, $\Omega_D^{r_{aux}}$, $\Omega_D^{r_{meas}}$ – cutting, auxiliary, measuring tools. Now let's consider a number of statements that are quite obvious from a technological point of view for the formation of a set of alternatives.

Statement 1. The permissible type of equipment corresponds to the name of the machine tool operation, i. e. $r_{me} \sim r_{to}$. If we denote the set of admissible types of equipment on which r_{to} operations are performed by Ω_D^{me} , then we can write

$$\Omega_D^{me} = \left\{ \forall r_{me} \in \Omega_P^{me} \mid \theta_{me}^{r_{me}} = \theta_{me}^{r_{to}} \right\}. \quad (8)$$

Statement 2. For processing in one transition a combination of surfaces of various shapes, such types of cutting tools are acceptable that are designed to process each of the specified surfaces and can be installed on a given equipment, i. e. $\bigwedge_{i=1}^n (r_{cut} \sim r_{surf_i}) \wedge (r_{cut} \sim r_{me})$. Denoting the set of solutions r_{cut} admissible for a given transition as $\Omega_D^{r_{cut}}$, taking into account that every surface has a certain shape and involves a certain processing method (pm) assigned to the equipment (turning, milling, planing, etc.), we obtain

$$\Omega_D^{r_{cut}} = \left\{ \forall r_{cut} \in \Omega_P^{r_{cut}} \mid \bigwedge_{i=1}^n (\theta_f^{r_{surf_i}} = \theta_f^{r_{cut}}) \wedge (\theta_{pm}^{r_{me}} = \theta_{pm}^{r_{cut}}) \right\}. \quad (9)$$

Statement 3. In order to ensure that a cutting tool of a given type is mounted on a given equipment, it is acceptable to have an auxiliary tool that can match the cutting tool (cut) with a given equipment, i. e. $(r_{aux} \sim r_{cut}) \wedge (r_{aux} \sim r_{me})$. A formal description of the set $\Omega_D^{r_{aux}}$ of solutions r_{aux} that are admissible for the chosen r_{cut} and given r_{me} has the form

$$\Omega_D^{r_{aux}} = \left\{ \forall r_{aux} \in \Omega_P^{r_{aux}} \mid (\theta_{cs}^{r_{aux}} = \theta_{cs}^{r_{cut}}) \wedge (\theta_{vco}^{r_{aux}} = \theta_{vco}^{r_{me}}) \right\}. \quad (10)$$

Statement 4. The permissible type of the measuring tool is determined by the type of the controlled surface, i. e. $r_{meas} \sim r_{surf}$. Denoting by $\Omega_D^{r_{meas}}$ the set of solutions r_{surf} admissible for a given solution r_{surf} , we will have, proceeding from Statement 4

$$\Omega_D^{r_{meas}} = \left\{ \forall r_{meas} \in \Omega_P^{r_{meas}} \mid \theta_f^{r_{meas}} = \theta_f^{r_{surf}} \right\}. \quad (11)$$

Formulas (8)–(11) give grounds to conclude the following:

- the input data of the algorithms for determining acceptable alternatives are the elements of the corresponding sets of possible technological solutions;
- no additional reference information is required for the functioning of the algorithms;
- the output data of the algorithms are the elements of the corresponding sets of feasible technological solutions.

Upon completion of the work of the next algorithm for determining a feasible solution, it is most expedient to transfer control to the corresponding algorithm for determining the desired solution. An analysis of formula (6) shows that the sets of possible and admissible solutions r_{me} coincide, and the algorithm that determines the sets $\Omega_D^{r_{me}} = \Omega_P^{r_{me}}$ is at the same time the algorithm for determining the desired solution r_{me} . The dynamic formation of selection criteria makes it possible to put into practice the most important principle of creating computer-aided design systems – the independence of software from the regulatory and reference base and, as a result, ensure high adaptability of the system to changes in the external environment.

Since the set d_3 of characteristics of solutions r_{to} contains one characteristic each – “name of operations”, it should be assumed that $\Omega_{r_r}^{r_{to}} = \Omega_D^{r_{to}}$. For other typical technological solutions, taking into account formulas (9)–(11), the relations take place:

$$\Omega_{r_T}^{r_{cut}} = \left\{ \forall r_{cut} \in \Omega_D^{r_{cut}} \left[\bigwedge_{i=1}^n (t_i^{r_{cut}} h t_i^{r_{surf}}) \right] \wedge \left[\bigwedge_{i_2=1}^m (t_{i_2}^{r_{cut}} h t_{i_2}^{r_{me}}) \right] \right\}; \quad (12)$$

$$\Omega_{r_T}^{r_{aux}} = \left\{ \forall r_{aux} \in \Omega_D^{r_{aux}} \left[\bigwedge_{i=1}^n (t_i^{r_{aux}} h t_i^{r_{cut}}) \right] \wedge \left[\bigwedge_{i_2=1}^m (t_{i_2}^{r_{aux}} h t_{i_2}^{r_{me}}) \right] \right\}; \quad (13)$$

$$\Omega_{r_T}^{r_{meas}} = \left\{ \forall r_{meas} \in \Omega_D^{r_{meas}} \left[\bigwedge_{i=1}^n (t_i^{r_{meas}} h t_i^{r_{surf}}) \right] \right\}. \quad (14)$$

In general, the solution to problem (4) has the form

$$C_{PO3}(\Omega_D) = \Omega_{r_T} = \Omega_{r_T}^{r_{to}} \cup \Omega_{r_T}^{r_{cut}} \cup \Omega_{r_T}^{r_{aux}} \cup \Omega_{r_T}^{r_{meas}} \cup \Omega_{r_T}^{r_{to}}. \quad (15)$$

Formulas (12)–(14) show that the desired solutions r_{cut} , r_{aux} , r_{meas} are determined based on the analysis of the values of the characteristics of these solutions. Since each of the types of these tools has its own set of characteristics, it is advisable to determine the required technological solutions r_{cut} , r_{aux} , r_{meas} using separate algorithms, the number of which is equal to the number of types of each of the indicated technological solutions.

The input data of the algorithms for determining the desired solutions r_{cut} , r_{aux} , r_{meas} are the values of the dimensional and accuracy characteristics of the processed elements (surfaces) of the part, the values of the dimensional characteristics of the seats for the equipment tool and the sets of characteristics of the desired solutions that belong to the set of feasible solutions. At the same time, the values of the characteristics of particular technological solutions should be stored in the relevant reference books (technical characteristics of equipment, cutting auxiliary and measuring tools). The output data of these algorithms r'_{cut} , r'_{aux} , r'_{meas} are solutions represented by their designations in accordance with regulatory documents.

Algorithms for optimizing the choice of technological solutions and generating data for designing tools

The presence of a certain property α for a specific particular technological solution r_ξ can be expressed using the corresponding predicate E_α . Then the statement “a particular technological solution r_ξ has the property α ” will be written as follows:

$$E_\alpha(r_\xi). \quad (16)$$

The presence of property α for a given solution r_ξ , i. e. the “true” value of the predicate $E_\alpha(r_\xi)$ is completely determined by the presence of the corresponding characteristic t_α in the set d_3 of the considered solution r_ξ . But since each characteristic t_α of the set d_3 takes its values from d_4 , it makes sense to assume that the property α has a number of values θ_α . For example, one of the characteristics of a particular technological solution r_{surf} (processed surface) is the shape of the surface to be processed t_f . The characteristic t_f determines the property E_f of the solution r_{surf} to have one form or another. Denoting the value of the property α of the solution r_ξ as $\theta_\alpha^{r_\xi}$ and using predicate (16), we can formalize the statement “a particular technological solution r_ξ has the property α , and the value of this property is $\theta_\alpha^{r_\xi}$ ” as follows:

$$E_\alpha(r_\xi) \wedge \theta_\alpha^{r_\xi}. \quad (17)$$

Each value d_2 of the name of a particular technological solution (individual or standard) corresponds to one set of characteristics d_3 , which determines the specific properties of a particular technological solution. Each characteristic t_i from the set d_3 of characteristics of a particular technological solution r_ξ , by virtue of axiom (17), corresponds to a particular property of the solution r_ξ . The selection function $C_{PO4}(\Omega_{r_T}^{r_\xi})$, i. e. solution of problem (5), for r_ξ can be represented as

$$C_{PO4}(\Omega_{r_T}^{r_\xi}) = C_{P_i}(\Omega_{r_T}^{r_\xi}). \quad (18)$$

Optimization of the choice of the desired technological solutions by the ideal point method, as shown by formula (18), is based on a comparison of the values of particular technological solutions with the given values of the established optimality criteria. Practice shows that in the general case, each

type of a typical technological solution corresponds to an individual set of optimality criteria. Therefore, optimization should be carried out for each using separate algorithms for each type of typical technological solutions. At the same time, the values of the characteristics of the found particular technological solutions belonging to the sets Ω_{r_r} are fed to the input of the solution selection optimization algorithms. For the functioning of optimization algorithms, it is required to introduce directories containing the values of optimization criteria into the regulatory and reference base of the system. The output of the algorithms is the final standard technological solutions. At any stage of choosing a particular technological solution for a specific technological transition, one of the following situations may occur:

$$\Omega_P^{r_\xi} = \emptyset; \tag{19}$$

$$\Omega_D^{r_\xi} = \emptyset; \tag{20}$$

$$\Omega_{r_r}^{r_\xi} = \emptyset. \tag{21}$$

The fulfillment of conditions (19) and (20) means that the required type of technological solution r_ξ has not been found at all. The fulfillment of condition (21) means that it was possible to determine the type of technological solution, but a specific value of r_ξ was not found. With error-free initial data of the system and a reliable reference base in these cases, it is necessary to generate data for the design of a special tool [6]. Registration of data for the design of a tool is carried out in the form of an application for design in the absence of a computer-aided design system for technological equipment at the enterprise. In the presence of such a system, it is advisable to arrange the design data in the form of a file and use it as the input file of the specified system. To implement this function, it is necessary to develop an appropriate algorithm that receives control when the marked situations occur. The block diagram of the system of algorithms for the process of synthesis of technological operations based on a combination of individual and standard technological solutions is shown in Fig. 1.

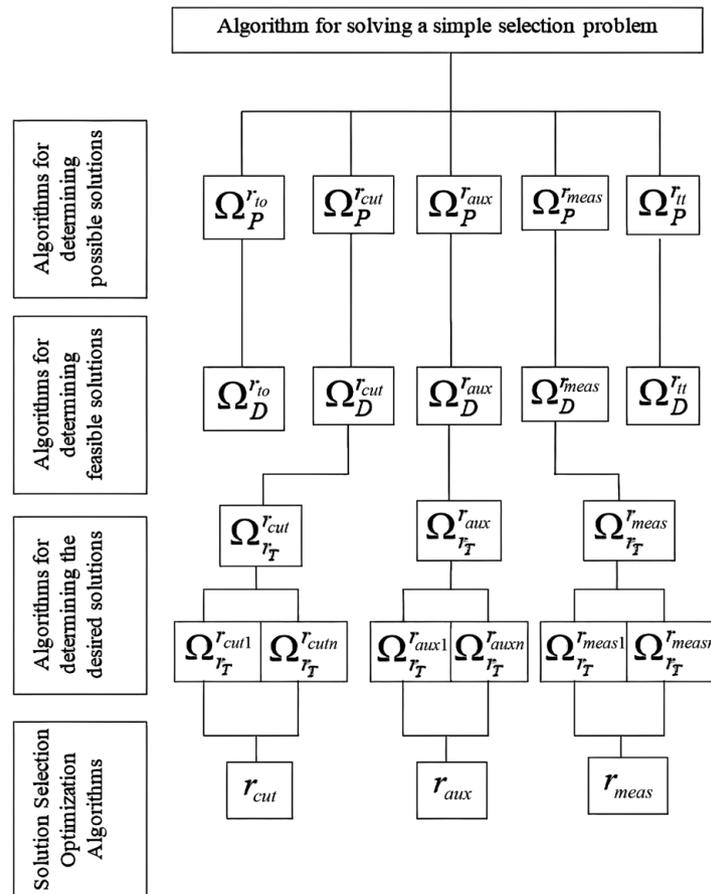


Fig. 1. Block diagram of the system of algorithms

Conclusion

The system has a three-level structure, is characterized by a modular construction, a strict hierarchy of modules. All modules of the system are independent from each other as well as from the reference base of the system. The functionality of the system as a whole is increased by adding new modules to the lower level of the system with a constant core.

References

1. Petukhov A. V. (1993) Automation of the Design of Technological Processes for the Production of Prototypes. *Tractors and Agricultural Machines*. (12), 33–35. Available: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15229/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2003.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).
2. Petukhov A. V. (1993) Study of the Functional Structure of the System of Technological Preparation for the Production of Prototypes. *Tractors and Agricultural Machines*. (6), 26–29. Available: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15228/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).
3. Petukhov A. V. (2000) Modeling Decision-Making when Choosing Methods for Automating the Technological Preparation for the Production of Prototypes of Forage Harvesting and Grain Harvesting Equipment. *Modern Problems of Machine Science: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Technical Conference (Scientific Readings Dedicated to P. O. Sukhoi)*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel Publ. 70–73. Available: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/15242/%d0%a4%d0%b0%d0%b9%d0%bb%2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).
4. Solov'yova A. A. (2021) Automation of Technological Design in the Manufacture of Agricultural Machinery. *Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex – Today and Tomorrow*. Gomel, Scientific and Technical Center of Combine Building JSC “Gomselmash” Publ. 165–166. Available: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/25951/165-166.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).
5. Petukhov A. V. (2006) Decision-Making Model in the Design of Technological Processes for the Manufacture of Prototypes. *Modern Problems of Machine Science: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Technical Conference (Scientific Readings Dedicated to P. O. Sukhoi)*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel Publ. 85–86. Available: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/12231/%d0%9f%d0%b5%d1%82%d1%83%d1%85%d0%be%d0%b2%2c%20%d0%90.%20%d0%92.%20%d0%9c%d0%be%d0%b4%d0%b5%d0%bb%d1%8c....pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).
6. Petukhov A. V. (2022) Information Support of CAD of Technological Processes of Structurally Complex Product Prototypes. *Informatics*. 19 (4), 69–83. Available: <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-4-69-83> (Accessed 4 March 2023) (in Russian).

Information about the author

Petukhov A. V., Senior Lecturer at the Department Technology of Mechanical Engineering of the Sukhoi State Technical University of Gomel

Address for correspondence

246746, Republic of Belarus,
Gomel, Octiabria Ave., 48
Sukhoi State Technical University of Gomel
Tel.: +375 29 734-25-13
E-mail: petukhov_2000@gstu.by
Petukhov Alexander Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932

ЛОКАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МЕТРИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОМБИНИРОВАНИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. Ю. ЛОВЕЦКИЙ^{1,2}, В. Ю. ЦВЕТКОВ¹, А. А. БОРИСКЕВИЧ¹,
В. А. ЛАПИЦКАЯ², С. А. ЧИЖИК²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14.10.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрена задача оценки качества комбинирования компонентных изображений, формируемых в двух синхронных каналах атомного силового микроскопа (АСМ-изображений). Предложена вычислительно простая метрика качества комбинирования компонентных АСМ-изображений на основе коэффициентов локальной корреляции, учитывающая вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение и корреляцию между компонентными АСМ-изображениями. Показано, что локальная корреляция обеспечивает более высокую точность оценки качества комбинирования АСМ-изображений по сравнению с глобальной корреляцией.

Ключевые слова: атомная силовая микроскопия, оценка качества комбинирования изображений, глобальная корреляция изображений, локальная корреляция изображений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена в рамках задания 3.03.3 подпрограммы «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии» (ГПНИ «Конвергенция-2025»).

Для цитирования. Локальная корреляционная метрика для оценки качества комбинирования АСМ-изображений / М. Ю. Ловецкий [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 78–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86>.

LOCAL CORRELATION METRIC FOR ASSESSING THE QUALITY OF COMBINED AFM IMAGES

MIKHAIL YU. LAVETSKI^{1,2}, VIKTAR YU. TSVIATKOU¹, ANATOLY A. BORISKEVICH¹,
VASILINA A. LAPITSKAYA², SERGEI A. CHIZHIK²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14.10.2022

Abstract. The problem of assessing the quality of combining component images formed in two synchronous channels of an atomic force microscope (AFM images), is considered. A computationally simple quality metric for combining component AFM images, based on local correlation coefficients is proposed, taking into account the contribution of each of the component AFM images to the resulting combined AFM image and the correlation

between component AFM images. It is shown that local correlation provides a higher accuracy of AFM images combination quality estimation in comparison to the global correlation.

Keywords: atomic force microscopy, image combination quality assessment, global image correlation, local image correlation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was performed within the framework of task 3.03.3 of the subprogram “Interdisciplinary research and new emerging technologies” (SPNI “Convergence-2025”).

For citation. Lavetski M. Yu., Tsviatkou V. Yu., Boriskevich A. A., Lapitskaya V. A., Chizhik S. A. (2023) Local Correlation Metric for Assessing the Quality of Combined AFM Images. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 78–86. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-78-86> (in Russian).

Введение

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) при сканировании фрагмента поверхности материала могут использоваться несколько параллельных синхронизированных измерительных каналов для различных физических величин. Формируемые в этих измерительных каналах значения комбинируются в несколько двумерных матриц чисел, эффективно представляемых многоканальными АСМ-изображениями, в которых яркости пикселей каждого канала отражают значения измеряемой физической величины в соответствующих точках поверхности. Наиболее часто используются каналы, описывающие высоту, вязкость и жесткость поверхности, а также деформацию зонда и рассеивание энергии во время сканирования.

При визуальном анализе многоканальных АСМ-изображений возникает необходимость объединения их каналов для совместного отображения на стандартных мониторах, имеющих относительно узкий динамический диапазон, с минимальными искажениями и потерями деталей. Комбинированное изображение, формируемое в результате объединения изображений измерительных каналов, может быть цветным (т. е. трехканальным) или полутоновым. В статье рассматривается формирование комбинированных полутоновых АСМ-изображений на основе двух измерительных каналов.

Для объединения изображений широко используются подходы, основанные на взвешенном сложении, методе главных компонент [1], дискретном вейвлет-преобразовании [2] и др. Среди них нет подходов, специально ориентированных на объединение изображений, формируемых в измерительных каналах атомного силового микроскопа. Отсутствуют также рекомендации по выбору алгоритма для эффективного формирования комбинированных АСМ-изображений. Разработка этих рекомендаций требует оценки качества таких изображений. Для оценки качества комбинированных полутоновых изображений широко используются показатели, основанные на анализе краев [3, 4], взаимной информации [5], оценке количества информации в изображении [6], оценке точности визуальной информации в различных масштабах представления изображения [7] и др. Ни один из этих показателей специально не ориентирован на оценку качества комбинированных АСМ-изображений. Относительной простотой вычислений отличается коэффициент корреляции. Он основан на вычислении средних значений изображений и не учитывает локальные особенности распределения яркости. АСМ-изображения отличаются существенными локальными неоднородностями распределения яркости, что снижает точность оценки их качества с помощью коэффициента корреляции. Целью исследований авторов являлось повышение точности оценки качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента корреляции.

Выбор метода формирования комбинированных АСМ-изображений

На рис. 1 приведены примеры АСМ-изображений, полученных в нескольких синхронных измерительных каналах атомно-силового микроскопа Dimension FastScan компании Bruker. Изображения каждого канала имеют размер 256×256 пикселей и разрядность 8 бит. Для оценки точности показателей качества комбинированных АСМ-изображений необходимо выбрать метод их формирования. Исходя из предположения о независимости эффективности методов объединения изображений и точности показателей качества комбинированных изображений для формирования комбинированных АСМ-изображений выбран простейший метод взвешенного сложения.

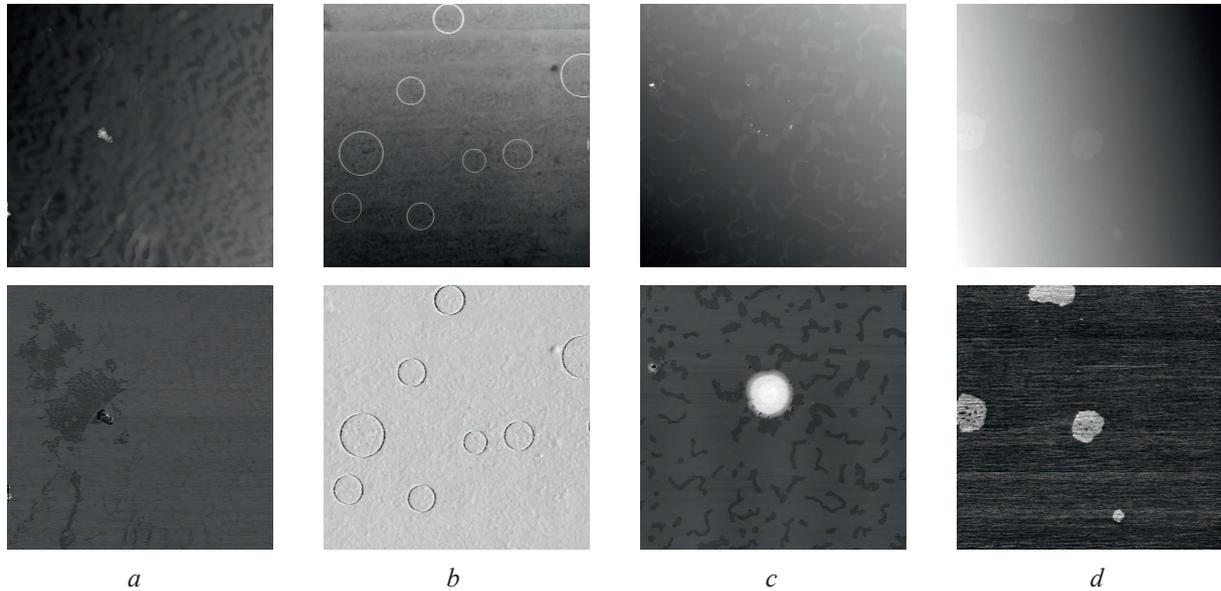


Рис. 1. АСМ-изображения в двух измерительных каналах атомного силового микроскопа:
a – металлизированная наноструктурированная никелевая поверхность;
b–d – металлизированные наноструктурированные никелевые поверхности с полимерными пленками
Fig. 1. AFM images in two measuring channels of an atomic force microscope:
a – metallized nanostructured nickel surface; *b–d* – metallized nanostructured nickel surfaces with polymer films

Согласно данному методу, значения пикселей $m_c(y, x)$ комбинированного АСМ-изображения $M_c = \|m_c(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ вычисляются на основе значений пикселей АСМ-изображений $M_1 = \|m_1(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ первого и $M_2 = \|m_2(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ второго измерительных каналов атомного силового микроскопа с помощью выражения

$$m_c(y, x) = [k m_1(y, x) + (1 - k) m_2(y, x)], \text{ при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяющий вклад значений пикселей каждого компонентного АСМ-изображения M_1 и M_2 в значения пикселей комбинированного АСМ-изображения M_c , $0 < k < 1$; Y, X – размеры (в пикселях) компонентных и комбинированного АСМ-изображений по вертикали и горизонтали; $[]$ – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

На рис. 2 приведена схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе выражения (1). Для согласования динамических диапазонов компонентных АСМ-изображений в схеме предусмотрено линейное контрастирование на основе минимаксного растяжения гистограммы без насыщения.

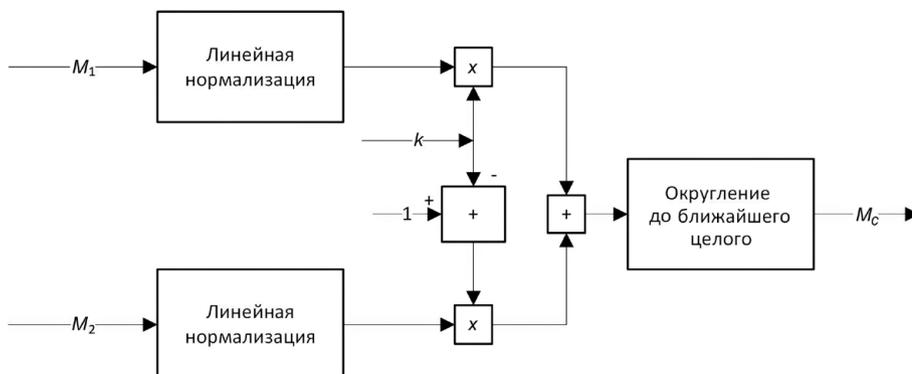


Рис. 2. Схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения
Fig. 2. Scheme for forming a combined AFM image based on weighted summation

На рис. 3 показаны результаты формирования комбинированных АСМ-изображений для приведенных на рис. 1 примеров компонентных АСМ-изображений при трех значениях коэффициента k : 0,3, 0,5 и 0,7. Меньшие значения коэффициента k соответствуют меньшей относительной доле значений компонентного АСМ-изображения M_1 в комбинированном АСМ-изображении M_C по сравнению с M_2 .

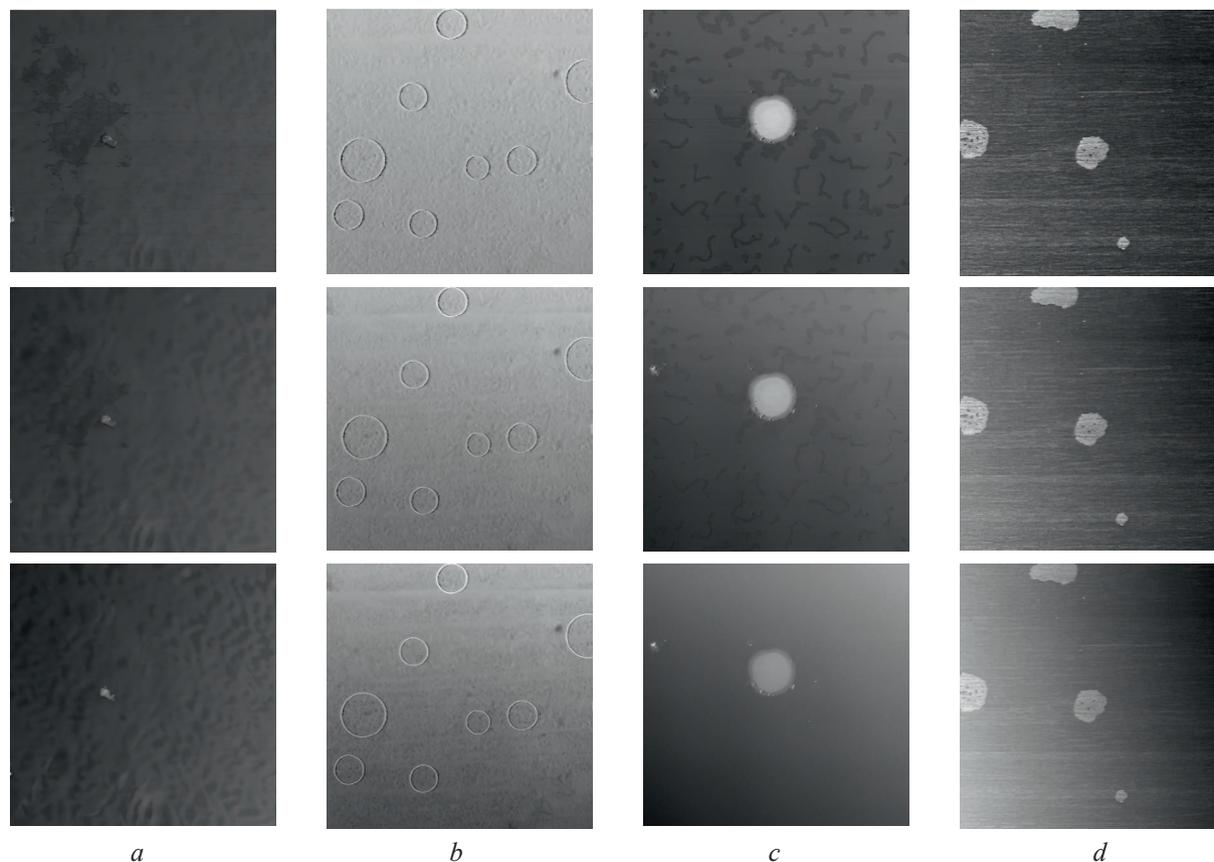


Рис. 3. Комбинированные АСМ-изображения при значениях $k = 0,7$ (верхний ряд), $k = 0,5$ (средний), $k = 0,3$ (нижний): a – металлизированная наноструктурированная никелевая поверхность; $b-d$ – металлизированные наноструктурированные никелевые поверхности с полимерными пленками
Fig. 3. Combined AFM images at $k = 0.7$ (top row), $k = 0.5$ (middle), $k = 0.3$ (bottom): a – metallized nanostructured nickel surface; $b-d$ – metallized nanostructured nickel surfaces with polymer films

Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента глобальной корреляции

Комбинированное АСМ-изображение формируется для обеспечения возможности наблюдения значимых деталей компонентных АСМ-изображений, формируемых в синхронных каналах атомного силового микроскопа одновременно в одном пространстве пикселей. Поэтому качество комбинирования АСМ-изображения может быть оценено его корреляцией с компонентными АСМ-изображениями. Коэффициент $r(A, B)$ корреляции двух компонентных АСМ-изображений $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ и $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ вычисляется по формуле

$$r(A, B) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - \bar{a}| |b(y, x) - \bar{b}|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - \bar{a})^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - \bar{b})^2}}, \quad (2)$$

где \bar{a} , \bar{b} – среднее значение яркости пикселей изображений A и B .

Коэффициент корреляции, вычисляемый по (2), является глобальным. Для оценки вклада каждого компонентного АСМ-изображения в комбинированное АСМ-изображение использована схема, приведенная на рис. 4. С ее помощью оценивается глобальная корреляция между исходными компонентными АСМ-изображениями M_1 и M_2 , комбинированным АСМ-изображением M_C и компонентным M_1 , комбинированным АСМ-изображением M_C и компонентным M_2 .

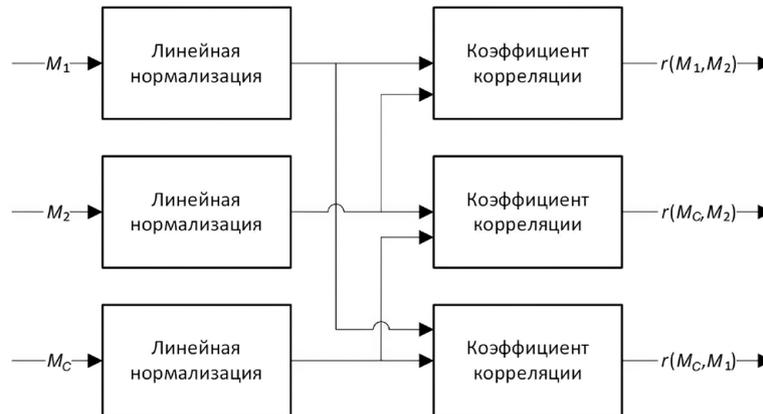


Рис. 4. Схема оценки корреляции комбинированного и компонентных АСМ-изображений
Fig. 4. Scheme for assessing the correlation of combined and component AFM images

В табл. 1 приведены значения коэффициентов глобальной корреляции, вычисленные с помощью схемы рис. 4 для АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, 3, и нескольких других АСМ-изображений поверхностей различных материалов.

Таблица 1. Значения коэффициентов глобальной корреляции
Table 1. Values of global correlation coefficients

Показатель / Index	k	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r(M_1, M_2)$	0,5	0,5650	0,425	0,3291	0,6020	0,2360	0,5379	0,5010	0,6555	0,6005	0,4500
$r(M_C, M_1)$	0,7	0,9932	0,993	1,0000	0,9992	0,9748	0,9868	0,9843	0,9872	0,9955	0,9998
	0,5	0,9678	0,970	0,9999	0,9956	0,8868	0,9289	0,9273	0,9403	0,9775	0,9990
	0,3	0,8775	0,870	0,9990	0,9785	0,6590	0,7791	0,7645	0,8217	0,9035	0,9944
$r(M_C, M_2)$	0,7	0,6075	0,446	0,3232	0,6131	0,4251	0,5554	0,6050	0,6756	0,6158	0,4583
	0,5	0,6696	0,525	0,3317	0,6297	0,6215	0,6173	0,7117	0,7218	0,6434	0,4728
	0,3	0,7875	0,703	0,3514	0,6706	0,8446	0,7903	0,8443	0,8156	0,7184	0,5064
$D(k)$	0,7	7,35	6,19	5,94	6,94	10,79	6,65	8,36	8,14	7,07	5,98
	0,5	9,72	7,90	6,06	7,38	24,09	9,23	15,17	11,60	8,08	6,22
	0,3	32,74	22,16	6,34	8,90	34,33	260,50	40,24	409,47	14,59	6,83
$\Delta r(k_L, k_H)$		-0,0643	-0,134	-0,0272	-0,0368	-0,1037	-0,0272	-0,0195	0,0255	-0,0106	-0,0427

Из табл. 1 следует, что компонентные АСМ-изображения M_1 и M_2 слабо коррелированы. Причем вклад компонентного АСМ-изображения M_1 в комбинированное изображение M_C всегда более значителен, чем компонентного M_2 . При этом значения коэффициентов глобальной корреляции $r(M_C, M_1)$ и $r(M_C, M_2)$ находятся в некотором противоречии: при коэффициенте глобальной корреляции $r(M_C, M_1)$, равном или очень близком к единице (что говорит о практически полном соответствии между компонентным АСМ-изображением M_1 и комбинированным M_C , т. е. фактически $M_1 = M_C$), разница в значениях коэффициентов глобальной корреляции $r(M_C, M_2)$ и $r(M_1, M_2)$ является более существенной для всех видов изображений. В табл. 1 приведены значения разностей $\Delta r(k_L, k_H)$ динамических диапазонов коэффициентов $r(M_C, M_1, k)$ и $r(M_C, M_2, k)$, вычисленных по формуле:

$$\Delta r(k_L, k_H) = |r(M_C, M_1, k_H) - r(M_C, M_1, k_L)| - |r(M_C, M_2, k_H) - r(M_C, M_2, k_L)| \text{ для } k_L = 0,3, k_H = 0,7. \quad (3)$$

Приведенные в табл. 1 значения $\Delta r(k_L, k_H)$ свидетельствуют о несогласованности изменений коэффициентов глобальной корреляции $r(M_C, M_1, k)$ и $r(M_C, M_2, k)$ при изменении k , определяющего вклад компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение: динамический диапазон коэффициента $r(M_C, M_1, k)$ меньше, чем $r(M_C, M_2, k)$. В этой связи актуальной является задача повышения точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений.

Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Повышение точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений возможно за счет учета локальных особенностей распределений значений пикселей в компонентных и комбинированном АСМ-изображениях. Для этого может использоваться коэффициент $r_L(A, B)$ локальной корреляции двух АСМ-изображений $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ и $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$, вычисляемый с помощью выражения:

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (4)$$

где $a_L(y, x, p), b_L(y, x, p)$ – среднее значение яркости пикселей изображений A и B в окрестности пикселя с координатами (y, x) размером $p \times p$ пикселей, $a_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p a(y+j, x+i)$, $b_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p b(y+j, x+i)$.

В табл. 2, 3 для нескольких значений размера p окрестности приведены значения коэффициентов локальной корреляции, вычисленные с помощью схемы рис. 4 для АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, 3, и нескольких других АСМ-изображений поверхностей различных материалов. Также в табл. 2, 3 представлены значения разностей $\Delta r_L(k_L, k_H)$ динамических диапазонов коэффициентов локальной корреляции $r_L(M_C, M_1, p, k)$ и $r_L(M_C, M_2, p, k)$, вычисляемых с помощью (4) для $k_L = 0,3, k_H = 0,7$, и значения отношений $|\Delta r(k_L, k_H) / \Delta r_L(k_L, k_H)|$.

Таблица 2. Значения коэффициентов локальной корреляции при $p = 3$
Table 2. Values of local correlation coefficients at $p = 3$

Показатель / Index	k	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r_L(M_1, M_2, p)$	0,5	0,5906	0,598	0,2743	0,4935	0,5971	0,6254	0,6294	0,6318	0,5496	0,3217
$r_L(M_C, M_1, p)$	0,7	0,7341	0,861	0,9426	0,9374	0,8012	0,6290	0,6406	0,6426	0,7371	0,9611
	0,5	0,6030	0,736	0,7847	0,8114	0,6716	0,6257	0,6328	0,6352	0,6108	0,8375
	0,3	0,5855	0,651	0,5339	0,6590	0,6152	0,6253	0,6306	0,6330	0,5649	0,6024
$r_L(M_C, M_2, p)$	0,7	0,8240	0,866	0,5379	0,7021	0,7942	0,9931	0,9917	0,9935	0,8537	0,5392
	0,5	0,9483	0,955	0,7557	0,8484	0,9338	0,9987	0,9984	0,9987	0,9603	0,7413
	0,3	0,9893	0,989	0,9230	0,9519	0,9849	0,9998	0,9997	0,9998	0,9916	0,9111
$D_L(k)$	0,7	29,35	577,59	13,34	14,12	381,70	7,12	7,39	7,38	24,82	11,05
	0,5	7,61	12,91	193,65	90,90	10,25	6,96	7,09	7,11	8,18	51,02
	0,3	6,60	8,11	13,65	11,14	7,25	6,94	7,02	7,05	6,64	15,24
$\Delta r_L(k_L, k_H)$		-0,0167	0,087	0,0236	0,0286	-0,0047	-0,003	0,002	0,0033	0,0343	-0,0132
$ \Delta r(k_L, k_H) / \Delta r_L(k_L, k_H) $		3,85	1,54	1,15	1,29	22,06	9,07	9,75	7,73	0,31	3,23

Таблица 3. Значения коэффициентов локальной корреляции при $p = 9$
Table 3. Values of local correlation coefficients at $p = 9$

Показатель / Index	k	Коэффициент корреляции АСМ-изображений / Correlation coefficient of AFM images									
		АСМ1	АСМ2	АСМ3	АСМ4	АСМ5	АСМ6	АСМ7	АСМ8	АСМ9	АСМ10
$r_L(M_1, M_2, p)$	0,5	0,6080	0,532	0,2744	0,6208	0,6450	0,6556	0,6703	0,6487	0,5902	0,4635
$r_L(M_C, M_1, p)$	0,7	0,9056	0,872	0,9774	0,9605	0,7752	0,6509	0,6842	0,6491	0,9408	0,9973
	0,5	0,7340	0,715	0,8906	0,8862	0,6818	0,6528	0,6754	0,6479	0,8096	0,9848
	0,3	0,6192	0,603	0,6717	0,7824	0,6467	0,6542	0,6723	0,6482	0,6687	0,9300
$r_L(M_C, M_2, p)$	0,7	0,6500	0,764	0,4364	0,7902	0,6760	0,9932	0,9926	0,9930	0,6512	0,5100
	0,5	0,8123	0,908	0,6286	0,8933	0,9056	0,9987	0,9985	0,9987	0,7784	0,5844
	0,3	0,9456	0,977	0,8516	0,9647	0,9813	0,9998	0,9997	0,9998	0,9241	0,7162
$D_L(k)$	0,7	10,01	28,47	9,52	16,56	22,68	7,33	8,11	7,36	9,31	6,67
	0,5	32,48	15,81	21,13	403,73	11,00	7,28	7,73	7,24	86,24	8,46
	0,3	7,89	7,94	30,86	15,44	7,54	7,30	7,62	7,23	10,57	16,61
$\Delta r_L(k_L, k_H)$		-0,0092	0,056	-0,1095	0,0036	-0,1768	-0,0033	0,0048	-0,0059	-0,0008	-0,1389
$ \Delta r(k_L, k_H)/\Delta r_L(k_L, k_H) $		6,99	2,39	0,25	10,22	0,59	8,24	4,06	4,32	13,25	0,31

Из табл. 2, 3 следует, что разница $\Delta r_L(k_L, k_H)$ в динамических диапазонах коэффициентов локальной корреляции в 4–6 раз меньше по сравнению с разницей $\Delta r(k_L, k_H)$ в динамических диапазонах коэффициентов глобальной корреляции для $p = \{3, 5, 7, 9\}$ с усреднением по десяти АСМ-изображениям. Это говорит о существенно лучшей согласованности изменений коэффициентов $r_L(M_C, M_1, p, k)$ и $r_L(M_C, M_2, p, k)$ по сравнению с коэффициентами глобальной корреляции $r(M_C, M_1, k)$ и $r(M_C, M_2, k)$ при изменении k . Из сопоставления выражений (2) и (4) следует, что временная сложность вычислений коэффициента локальной корреляции $r_L(A, B, p)$ примерно в $2p^2$ раза больше по сравнению с временной сложностью вычислений коэффициента глобальной корреляции $r(A, B)$.

Для оценки качества комбинирования АСМ-изображений с учетом корреляции между комбинированным АСМ-изображением и каждым из двух компонентных АСМ-изображений, а также между компонентными АСМ-изображениями предлагается локальная корреляционная метрика $D_L(k)$, вычисляемая с помощью выражения (чем больше ее значение, тем лучше):

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_C, M_1, k) + r_L(M_C, M_2, k)}{|r_L(M_C, M_1, k) - r_L(M_C, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0,5)}. \quad (5)$$

Локальная корреляционная метрика $D_L(k)$ (табл. 2, 3) позволяет определить значение k , обеспечивающее лучшее соотношение вкладов компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение. Аналогичная метрика $D(k)$ на основе коэффициентов глобальной корреляции (табл. 1) не позволяет это сделать, что связано с ее низкой точностью. Данная метрика указывает на $k = 0,3$ для любых АСМ-изображений, хотя, как следует из рис. 1, это неверно. Из табл. 2, 3 также следует, что значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ для одних и тех же изображений не всегда совпадают при различных значениях размера p окна корреляционного анализа. Такая зависимость позволяет осуществлять оценку качества комбинирования АСМ-изображений с учетом размера значимых объектов. Это подтверждает сопоставление рис. 1 и табл. 2, из которого следует, что при $p = 3$ выбираются $k = 0,7$ и $k = 0,5$, соответствующие комбинированным АСМ-изображениям с хорошо различимыми мелкими деталями.

Выводы

1. Для оценки качества комбинирования АСМ-изображений предложена локальная корреляционная метрика. При ее вычислении используются коэффициенты локальной корреляции, определяемые в квадратной окрестности каждого пикселя сравниваемых АСМ-изображений. Метрика учитывает вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение, а также корреляцию между компонентными АСМ-изображениями.

2. Установлено, что для взвешенного сложения исходных АСМ-изображений при изменении вклада одного из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение от 0,7 до 0,3 разница в динамических диапазонах коэффициентов локальной корреляции компонентных АСМ-изображений в 4–6 раз меньше разницы в динамических диапазонах коэффициентов глобальной корреляции при размере окрестности локальной оценки от 3×3 до 9×9 пикселей. Это свидетельствует о существенно лучшей согласованности изменений коэффициентов локальной корреляции по сравнению с коэффициентами глобальной корреляции при изменении вкладов компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение и повышении точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений.

Список литературы / References

1. Sun Jifeng, Jiang Yuanjiao, Zeng Shaoyong (2005) A Study of PCA Image Fusion Techniques on Remote Sensing. *Proceedings of the SPIE International Conference on Space Information Technology*. 5985, 739–744.
2. Zhang A. K., Dare. Y. P. (2007) Wavelet Based Image Fusion Techniques-an Introduction, Review and Comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. 62 (4), 249–263.
3. Petrovic V., Xydeas C. (2005) Objective Image Fusion Performance Characterisation. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*. 2 (1), 1866–1871. DOI: 10.1109/ICCV.2005.175.
4. Piella G., Heijmans H. (2003) A New Quality Metric for Image Fusion. *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No 03CH37429)*. III–173. DOI: 10.1109/ICIP.2003.1247209.
5. Qu G., Zhang D., Yan P. (2001) Medical Image Fusion by Wavelet Transform Modulus Maxima. *Opt. Express*. 9, 184–190.
6. Aslantas V., Bendes E. (2015) A New Image Quality Metric for Image Fusion: the Sum of the Correlations of Differences. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 69. 1890–1896. DOI: 10.1016/j.aeue.2015.09.004.
7. Han Y., Cai Y., Cao Y., Xu X. (2013) A New Image Fusion Performance Metric Based on Visual Information Fidelity. *Inf. Fusion*. 14 (2), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2011.08.002>.

Вклад авторов

Ловецкий М. Ю. предложил показатель качества комбинирования АСМ-изображений, разработал алгоритмы и программные модели комбинирования и оценки качества АСМ-изображений, провел эксперименты.

Цветков В. Ю. осуществил постановку задачи исследования и научное редактирование статьи.

Борискевич А. А. определил направление и цель исследования, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Лапицкая В. А. получила изображения на АСМ.

Чижик С. А. выбрал АСМ-изображения для анализа и дальнейшей обработки.

Authors' contribution

Lovetski M. Yu. proposed a quality indicator for combining AFM images, developed algorithms and software models for combining and assessing the quality of AFM images, and conducted experiments.

Tsviatkou V. Yu. carried out the formulation of the research problem and scientific editing of the article.

Boriskevich A. A. determined the direction and purpose of the study, performed the interpretation of the results.

Lapitskaya V. A. received images on AFM.

Chizhik S. A. selected AFM images for analysis and further processing.

Сведения об авторах

Ловецкий М. Ю., аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, мл. н. с. лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Борискевич А. А., д. т. н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Лапицкая В. А., к. т. н., научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

Чижик С. А., академик, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Lavetski M. Yu., Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Boriskevich A. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Lapitskaya V. A., Cand. of Sci., Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Chizhik S. A., Academician, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at the Laboratory of Nanoprocesses and Technologies of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-87-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932

ФОРМИРОВАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕИДЕНТИФИКАЦИИ ЛЮДЕЙ ПО ВИДЕОДАНЫМ

С. А. ИГНАТЬЕВА, Р. П. БОГУШ

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (г. Полоцк, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15.12.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Для повышения точности работы системы реидентификации людей предлагается комплексный подход при формировании обучающей выборки для свёрточных нейронных сетей, предполагающий использование нового набора изображений, увеличение количества тренировочных примеров за счет существующих баз данных и применение ряда преобразований для повышения их разнообразия. Созданный набор данных PolReID1077 содержит изображения людей, которые были получены во все времена года, что позволит повысить корректность работы систем реидентификации при смене сезонов. Преимуществом PolReID1077 является также использование видеоданных, полученных при внешнем и внутреннем наблюдении в большом количестве различных мест съемки. Поэтому изображения людей в созданном наборе характеризуются вариабельностью фона, яркостных и цветовых характеристик. Объединение созданного набора с существующими CUHK02, CUHK03, Market-1501, DukeMTMC-ReID и MSMT17 позволило получить 109 772 изображения для обучения. Увеличение разнообразия сформированных примеров достигается за счет применения к ним циклического сдвига, исключения цветности и замещения фрагмента уменьшенной копией другого изображения. Представлены результаты исследований по оценке точности реидентификации для свёрточных нейронных сетей ResNet-50 и DenseNet-121 при их тренировке с использованием предложенного подхода для формирования обучающей выборки.

Ключевые слова: повторная идентификация людей, свёрточные нейронные сети, PolReID1077, машинное обучение, аугментация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Игнатъева, С. А. Формирование обучающей выборки для свёрточных нейронных сетей при реидентификации людей по видеоданным / С. А. Игнатъева, Р. П. Богуш // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 87–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-87-95>.

TRAINING SAMPLE FORMATION FOR CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS TO PERSON RE-IDENTIFICATION FROM VIDEO

SVIATLANA A. IHNATSYEVA, RYKHARD P. BOHUSH

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Polotsk, Belarus Republic of Belarus)

Submitted 15.12.2022

Abstract. To improve the person re-identification system accuracy, an integrated approach is proposed in the formation of a training sample for convolutional neural networks, which involves the use of a new image dataset, an increase in the training examples number using existing datasets, and the use of a number of transformations to increase their diversity. The created dataset PolReID1077 contains images of people that were obtained in all

seasons, which will improve the correct operation of re-identification systems when the seasons change. Another PolReID1077 advantage is the video data use obtained from external and internal surveillance in a large number of different filming locations. Therefore, the people images in the created set are characterized by the variability of the background, brightness and color characteristics. Joining the created dataset with the existing CUHK02, CUHK03, Market-1501, DukeMTMC-ReID and MSMT17 sets made it possible to obtain 109 772 images for training. An increase in the variety of generated examples is achieved by applying a cyclic shift to them, eliminating color and replacing a fragment with a reduced copy of another image. The research results on estimating the accuracy of re-identification for the ResNet-50 and DenseNet-121 convolutional neural networks during their training, using the proposed approach to form a training sample, are presented.

Keywords: person re-identification, convolutional neural networks, PolReID1077, machine learning, augmentation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ihnatsyeva S. A., Bohush R. P. (2023) Training Sample Formation for Convolution Neural Networks to Person Re-Identification from Video. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 87–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-87-95> (in Russian).

Введение

Широкое распространение систем видеонаблюдения во многих сферах жизнедеятельности людей требует автоматизации процесса анализа видеоданных, среди которых можно выделить актуальность определения присутствия заданного человека на видеоданных в разное время или в другом месте. Такая задача называется повторной идентификацией (реидентификацией) людей и заключается в том, что при поступлении запроса необходимо выделить характерные особенности искомого человека, сравнить их с признаками других людей и определить, когда и где искомый человек попадал в поле зрения множества камер. Наиболее эффективным для этого является применение свёрточных нейронных сетей (СНС), результативность работы которых во многом зависит от качества обучающих данных.

Наборы данных для тренировки нейронной сети должны соответствовать таким требованиям, как большой объем, разнообразие и отсутствие дисбаланса классов в них. Недостаточное количество изображений в выборке может привести к переобучению, т. е. к запоминанию СНС тренировочных примеров и неустойчивости модели к новым данным. Разнообразие набора данных для систем реидентификации определяется количеством видеокамер, различием их характеристик (разрешение, количество кадров в секунду) и вариантами их расположения (место, угол обзора), разными условиями видеонаблюдения (время суток, сезон, освещение). При этом люди на изображениях должны отличаться внешним видом (рост, телосложение, пол, одежда). Увеличение разнообразия повышает робастность извлекаемых признаков и устойчивость обученной СНС к новым изображениям. Дисбаланс классов, при котором одних примеров оказывается существенно больше, чем других, приводит к большему влиянию признаков доминирующего класса при обучении СНС и, соответственно, к потере точности при ее работе.

Для устранения дефицита данных иногда прибегают к объединению существующих наборов или расширению тренировочной выборки за счет имеющихся изображений путем применения к ним каких-либо преобразований [1, 2]. Равномерность распределения классов возможно обеспечить только в процессе формирования набора данных. Сбор, анализ и разметка людей (присвоение уникального номера – идентификатора) – трудоемкая задача, что объясняет ограниченное количество и размеры существующих наборов данных. Наиболее существенные и распространенные из них формировались на основе видео, полученного в течение небольшого временного интервала с 2–15 камер видеонаблюдения при разных условиях видеонаблюдения, и отличаются количеством изображений [3–7]. В связи с этим они обладают различной сложностью для реидентификации и не позволяют получить объективную оценку точности. Наборы данных, имеющиеся в свободном доступе, сформированы в условиях, не схожих с погодными явлениями в регионах, в которых ярко выражена смена сезонов. В случае применения системы реидентификации, для обучения которой использовались подобные изображения, точность работы будет невысокой. Поэтому актуальной задачей является разработка подхода для формирования обучающей выборки на основе комплекса решений, включая создание сбалансированного по временам года набора данных изображений людей, объединение созданного с существующими и расширение разнообразия изображений в общем наборе данных.

Анализ наборов данных для обучения свёрточных нейронных сетей при повторной идентификации человека

Для исследовательских систем повторной идентификации используют наборы данных, содержащие предварительно размеченные изображения людей. Наиболее распространенными являются SUNK02 [3], SUNK03 [4], Market-1501 [5], DukeMTMC-ReID [6], MSMT17 [7]. При формировании набора данных SUNK02 использовались пять сцен в кампусе университета Гонконга, видеофиксация которых осуществлялась с двух ракурсов. На каждой из пяти сцен получены изображения для 971, 306, 107, 193 и 239 чел., зафиксированных двумя камерами. В зависимости от места, в котором осуществлялось видеонаблюдение, все изображения распределены по каталогам P1, P2, P3, P4 и P5, в каждом из которых есть разделение на Cam1 и Cam2, указывающее на номер камеры. Всего имеется 7264 изображения, предварительно неразмеченных на тестовую и обучающую выборку. Тестирование предложено проводить для изображений 100 случайно выбранных людей, а остальные использовать для обучения.

В кампусе того же университета сформирован набор данных SUNK03. Для 1360 чел. имеется до пяти изображений с каждой из двух камер, которые устанавливались парами для видеонаблюдения в трех различных местах. Сбор данных осуществлялся в течение нескольких месяцев, что дало возможность получить более разнообразные примеры с различными погодными условиями и степенью освещенности. Деление на тестовую и тренировочную выборки осуществлялось по аналогии с SUNK02.

К недостаткам SUNK02 и SUNK03 следует отнести небольшое количество сцен видеонаблюдения и число изображений для каждого человека, случайный характер выбора тестовых изображений в каждом эксперименте. Показатели точности могут отличаться в зависимости от выбранных изображений. Эти недостатки частично были учтены при формировании набора Market-1501, для которого использовались кадры с шести камер видеонаблюдения, расположенных возле супермаркета в университете Циньхуа, включающих 32 668 изображений для 1501 чел. Обучающая выборка содержит 12 936 образцов и 751 идентификатор. Остальные изображения отнесены к тестовой выборке, в том числе 2793 дистрактора. К дистракторам в Market-1501 относятся примеры, на которых детектор ошибочно принял какие-либо объекты за правдоподобные изображения людей. Дополнительно, по запросу, можно получить 500 000 дистракторов, взятых при тех же условиях, что и размеченные изображения. Обнаружение людей на кадрах выполнялось с помощью детектора DPM [8], как и для SUNK03. Качество изображений оценивалось оператором путем сравнения ограничительного прямоугольника, предложенного детектором и отрицанного человеком по метрике IoU [5]. При $\text{IoU} > 50\%$ изображение считалось качественным и включалось в состав набора данных.

DukeMTMC-ReID является подмножеством набора данных Duke Multi-Target Multi-Camera (MTMC), сформированного на основе 85-минутных видео с частотой 60 кадров в секунду. Использовались восемь камер видеонаблюдения, расположенных на территории кампуса университета Дьюк. DukeMTMC разработан для мульти-трекинга и на его основе размечен для задач реидентификации. Для обучения алгоритма повторной идентификации используются 16 522 изображения 702 чел. и 17 661 для 702 других людей для тестирования.

Как Market-1501, так и DukeMTMC-ReID формировались на основе кадров, полученных с наружных камер видеонаблюдения, что ограничивает разнообразие вариантов освещения только естественным светом. Это было учтено при разработке набора данных MSMT17. Для разметки использовались кадры с двенадцати наружных камер видеонаблюдения и трех камер, установленных внутри помещений. Видеофиксация осуществлялась в утреннее, дневное и послеобеденное время в течение четырех дней с различными погодными условиями. В настоящее время набор данных предоставляется с размывом лиц и сопровождается текстовыми файлами, определяющими состав тестовой и обучающей выборок, запросов и валидационных данных, используемых для тестирования во время тренировки СНС. Количество идентифицированных человек составляет 4101, для которых имеется 126 441 изображение. К обучающей выборке относится 32 621 изображение для 1041 чел. При сравнении различных алгоритмов повторной идентификации на разных наборах данных MSMT17 имеет гораздо меньшие показатели точности [9, 10], что указывает на его сложность и низкую способность систем реидентификации повторно верифицировать человека в галерее изображений (тестовой выборке).

Таким образом, разнообразие изображений рассмотренных наборов данных лимитируется небольшим количеством сцен, условий освещения и камер видеонаблюдения. Поэтому СНС запоминает не только специфические особенности людей, но также возможные варианты фона и перекрытия людей элементами ландшафта или интерьера помещений. Предпочтительно, чтобы отличительные признаки, выделенные СНС, являлись характеристикой человека, а не условий видеонаблюдения. Поэтому актуально формирование набора данных для реидентификации с большим количеством различных сцен и вариантов расстановки камер с отличающимися характеристиками.

Методы создания дополнительных изображений на основе существующих

Повысить разнообразие тренировочного набора данных возможно за счет создания дополнительных изображений на основе имеющихся, т. е. путем аугментации. При этом обучающая выборка дополняется изображениями, к которым применялись различные искажения, например, такие, как геометрические или цветовые трансформации: вращение, отражение, размытие, изменение перспективы, цвета, яркости, контраста и др. [1]. Преобразования могут применяться ко всему изображению [11–13], фрагменту [9, 14], пакету изображений [13–16]. В [14] предлагается удалять прямоугольную область изображения путем заполнения его нулевыми или случайными значениями, а в [9] для участка изображения исключается информация о цвете. Некоторые методы аугментации подразумевают комбинирование преобразований по определенному алгоритму [11, 12]. В [11] рассматривается метод RandAugment, при котором одно из четырнадцати преобразований выбирается случайным образом. В [12] для аугментации также используется случайный выбор, но не для одного преобразования, а для цепочки из нескольких искажений, при этом их количество каждый раз может отличаться. Применение аугментации к пакету изображений позволяет смешивать идентификаторы разных людей с помощью линейной интерполяции [13], добавления фрагмента [15] или уменьшенной копии [16] на другое изображение из пакета.

Несмотря на существование большого количества различных методов аугментации, отсутствует достоверный способ определения наиболее эффективного из них [1]. Выбор метода основывается на большом количестве экспериментов с применением различных архитектур нейронных сетей и наборов данных для конкретной задачи.

Формирование обучающей выборки

Формирование набора данных PolReID1077¹ осуществлялось в несколько этапов. На первом выполнялось накопление видео, общая продолжительность которых составляла 14 ч 50 с. Видеопоследовательности получали при содействии студентов и преподавателей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой с их согласия только для исследовательских целей. При формировании комплекта изображений для человека обрабатывалось до девяти видеопоследовательностей. Каждый из них был зафиксирован камерами с разных ракурсов в нескольких местах. Использовалось до 10 вариантов расстановки камер для получения изображений каждого человека. Всего для создания набора данных PolReID1077 применялся 1331 способ размещения камер с отличающимися характеристиками (разрешением, количеством кадров в секунду). Видеонаблюдение осуществлялось при разных погодных условиях в течение четырех сезонов (зима – для 30 % задействованных людей, лето – для 29 %, осень и весна – для 41 %). Камеры устанавливались в помещениях с естественным и искусственным освещением, вне помещений – в разное время суток. Наличие у различных людей разных атрибутов в виде сумок, пакетов, рюкзаков, портфелей, продуктовых корзин, шарфов, шапок, очков, папок для бумаг, тетрадей, телефонов, наушников, еды и напитков изменяется с течением времени, что дает возможность изучать и учитывать незначительные изменения внешности. Такой подход к сбору данных отличается от используемых для формирования других наборов и позволяет получить более разнообразные примеры благодаря большому количеству вариантов фоновых помех, уровней освещения, одежды по сезону и т. д. Статистическая информация о распределении данных PolReID1077 приведена в табл. 1.

¹ GitHub. PolReID1077 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/SvetlanaIgn/PolReID1077>. Дата доступа: 09.12.2022.

Таблица 1. Статистические данные о составе набора данных PolReID1077
Table 1. Statistic data about the PolReID1077 dataset composition

Характеристика / Characteristic		Количество человек / Persons number	
		Тестовая и обучающая выборки / Test and training samples	Дистрактор / Distractor
Пол	Мужской	705	39
	Женский	302	31
Возраст	18–30 лет	854	57
	Более 30 лет	153	13
Время года	Лето	283	24
	Осень, весна	417	25
	Зима	307	21
Видеосъемка	Внутри помещений	436	31
	Наружная	515	39
	Внутренняя, наружная	156	–
Наличие маски	Да	224	7
	Нет	783	63

На следующем этапе с помощью СНС YOLOv4 выполнялось детектирование людей на кадрах, полученных с интервалом 1–3 с. Каждое изображение маркировалось в формате cXXXXsYY_ZZZZZZ_WW, где XXXX – способ расположения камеры от 0000 до 1331; YY – номер видеопоследовательности, полученной при выбранном способе установки камеры в том же месте, но в другое время; ZZZZZZ – номер кадра с последовательности; WW – количество человек на текущем кадре.

Удаление некорректных обнаружений осуществлялось оператором для случаев: более 50 % фигуры человека было скрыто или находилось вне кадра; детектированы отдельные фрагменты тела; на изображении присутствовали одновременно два и более человек, и было невозможно принять решение, какой идентификатор присвоить; изображения объектов, схожих с силуэтом человека; присутствовали люди, не дававшие согласие на съемку. Формирование комплектов изображений для каждого человека и размещение их в отдельных каталогах также выполнялось оператором. Если изображения были получены на основе кадров с более чем одной камеры, то присваивался уникальный идентификационный номер NNNNN, который дополнял предварительное имя файла, полученное на этапе детектирования, до NNNNN_cXXXXsYY_ZZZZZZ_WW. Каталог с изображениями имеет имя соответствующего идентификатора. Если человек зафиксирован только одной камерой видеонаблюдения, его изображения относятся к дистракторам с меткой 00000.

Для увеличения объема обучающей выборки объединяется несколько наборов данных, схожих по структуре: CUHK02, CUHK03, Market-150, DukeMTMC-ReID, MSMT17 и PolReID1077. Разделение на тестовую и обучающую выборку для Market-1501, MSMT17, DukeMTMC-ReID и PolReID1077 осуществляется в соответствии с рекомендациями разработчиков. CUHK02 и CUHK03 полностью отнесены к обучающей выборке и не используются для тестирования. Суммарно для тренировки СНС использовалось 109 772 изображения для 6381 чел.

Для повышения разнообразия созданного набора данных предлагается метод аугментации, который включает циклический сдвиг пикселей по вертикали и горизонтали, исключение цветности и замещение фрагмента уменьшенным изображением из пакета. Первая группа преобразований, к которой относятся циклический сдвиг пикселей и исключение цветности, выполняется в процессе формирования пакета. Для изображения с помощью генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ) определяется необходимость применения каждого из преобразований. После формирования пакета перед его поступлением на вход нейронной сети аналогичным образом принимается решение о замещении фрагментов уменьшенными копиями изображений из пакета.

В результате применения аугментации обучающая выборка на каждой эпохе обучения формируется с различными преобразованиями. На рис. 1, а показан пример сформированного пакета с аугментацией, при которой для случайно выбранных изображений выполняются циклический сдвиг и исключение цветности. Рис. 1, б демонстрирует пример пакета, в котором в изображение включена уменьшенная копия другого.

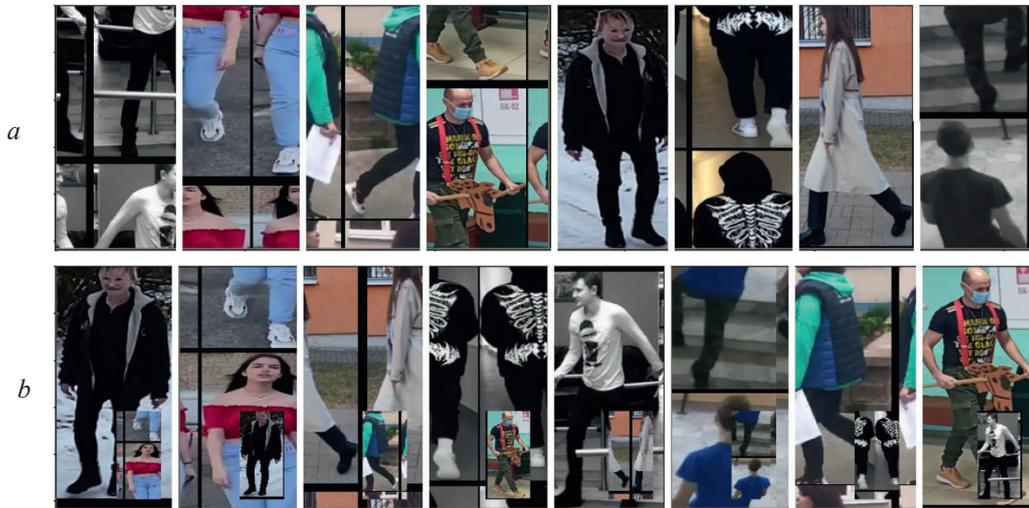


Рис. 1. Примеры изображений людей из набора данных PolReID1077: *a* – пакет изображений формируется с применением циклического сдвига и исключением цветности;

b – уменьшенная копия добавляется на другое изображение из пакета

Fig. 1. Sample of persons images from PolReID1077 dataset: *a* – images batch is formed using a cyclic shift and color exclusion; *b* – a reduced copy is added to another image from the batch

Такой метод аугментации исключает возможность запоминания тренировочных данных, повышает устойчивость СНС к окклюзиям, освещенности, разрешению изображения, зависимости от местоположения признаков.

Методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментов в качестве базового применялся алгоритм повторной идентификации², реализованный на фреймворке Pytorch. В качестве экстракторов признаков рассматривались СНС ResNet-50 и DenseNet-121. Точность реидентификации оценивалась по трем метрикам Rank1, mAP и mINP. Исследования проводились на персональном компьютере с характеристиками: Intel Core i5 3.11 GHz, 16 Gb RAM, Nvidia GeForce RTX-3060 6 Gb. С целью повышения точности реидентификации использовался подход двухэтапного обучения, основная идея которого заключалась в том, что на первом этапе для обучения применялись аугментированные данные, на втором выполнялась точная настройка весовых коэффициентов на исходных изображениях. Для предобучения формировались пакеты размером $B = 16$. Часть пакетов содержала изображения (\tilde{X}, \tilde{Y}) с замещенными фрагментами, остальные состояли из изображений (X_i, Y_j) , которые могут быть с циклическим сдвигом или полутоновыми. Изображения и пакеты, к которым применялось преобразование, определялись с помощью ГПСЧ, генерирующего псевдослучайное число $r \in 0 \dots 1$. Пороговое значение вычислялось по формуле

$$t = \frac{p}{100}, \quad (1)$$

где p – гиперпараметр, определяющий, к какой части изображений будет применяться преобразование; если $r < t$, то изображение (пакет) видоизменяется.

Значения функции потерь L_{batch} для обрабатываемых пакетов накапливаются в течение эпохи, после чего вычисляется средняя величина ошибки

$$L_{epoch} = \frac{\sum L_{batch} B}{size_{dataset}}, \quad (2)$$

где $size_{dataset}$ – размер обучающей выборки.

² Github. Pytorch ReID. Available: https://github.com/layumi/Person_reID_baseline_pytorch (Accessed 9 Desember 2022).

Если пакет содержит уменьшенные копии других изображений, то

$$L_{batch} = E(\tilde{X}^{out}, Y_i)\lambda + E(\tilde{X}^{out}, Y_j)(1 - \lambda), \quad (3)$$

где $\lambda = 1 - \frac{r_w r_h}{WH}$ – коэффициент, зависящий от соотношения размеров уменьшенной копии и исходного изображения; r_w, r_h – ширина и высота уменьшенной копии; W, H – ширина и высота изображения; $E()$ – кросс-энтропийная функция потерь.

Если при формировании пакета добавление уменьшенных копий не применялось, то

$$L_{batch} = E(X_i^{out}, y_i). \quad (4)$$

Весовые коэффициенты w корректируются со скоростью обучения $lr = 0,07$

$$w = w - lr \frac{\partial L_{epoch}}{\partial w}. \quad (5)$$

После 40-й эпохи происходит уменьшение скорости обучения в 0,1 раза, а предварительный этап длится 45 эпох. На втором этапе выполняется точная настройка в течение 35 эпох, для которой формирование пакетов B изображений (X_i, Y_j) реализуется без аугментации. Накопление L_{batch} и вычисление значения функции потерь для всей эпохи L_{epoch} выполняются аналогично первому этапу, как и корректировка весовых коэффициентов. Такой подход позволяет уменьшить значение функции потерь и повысить точность повторной идентификации.

Каждой из двух СНС соответствуют три эксперимента.

1. Данные для обучения и тестирования принадлежат одному домену (набору данных).
2. Для обучения использовался объединенный набор данных, для тестирования – соответствующие выборки Market-1501, DukeMTMC-ReID, MSMT17 и PolReID1077.
3. Обучение осуществлялось на объединенном наборе данных с применением аугментации. Точность оценивалась на тестовых выборках наборов данных Market-1501, DukeMTMC-ReID, MSMT17 и PolReID1077.

Результаты экспериментов

В табл. 2 представлены результаты тестирования СНС на наборах данных Market-1501, DukeMTMC-ReID, MSMT17 и PolReID1077 с применением различных подходов к обучению. В качестве эталонных значений принимали показатели Rank1, mAP и mINP, полученные для СНС, обучение и тестирование которых выполняли на данных, принадлежащих одному домену. Увеличение количества изображений позволяет повысить точность повторной идентификации по трем метрикам оценки точности для каждого из исследуемых наборов данных.

Таблица 2. Сравнение точности работы алгоритма повторной идентификации людей при использовании для тренировки свёрточной нейронной сети различных способов формирования обучающей выборки
Table 2. Comparison of persons re-identification accuracy when using different methods of forming a sample to train the convolutional neural network

СНС / CNN	Обучающая выборка / Train sample	Подход к обучению / Training approach	Метрика / Metric	Тестовая выборка / Test sample			
				Market-1501	DukeMTMC-ReID	MSMT17	PolReID1077
ResNet-50	Оригинальная*	Базовый алгоритм	Rank1	83,19	72,85	49,54	88,94
			mAP	61,08	52,53	24,83	65,58
			mINP	23,95	14,53	2,51	20,86
	Объединенная	Базовый алгоритм	Rank1	91,75	82,72	69,49	95,56
			mAP	77,64	69,03	42,57	81,27
			mINP	46,32	31,24	07,05	40,29
Объединенная	С применением аугментации	Rank1	92,28	85,05	73,24	96,25	
		mAP	81,34	72,21	47,79	84,00	
		mINP	52,78	35,38	9,67	45,55	

Окончание табл. 2
Ending of Tab. 2

СНС / CNN	Обучающая выборка / Train sample	Подход к обучению / Training approach	Метрика / Metric	Тестовая выборка / Test sample			
				Market-1501	DukeMTMC-ReID	MSMT17	PolReID1077
DenseNet-121	Оригинальная*	Базовый алгоритм	Rank1	83,76	72,80	54,98	90,33
			mAP	62,48	53,16	26,67	68,39
			mINP	26,83	15,88	2,61	23,43
	Объединенная	Базовый алгоритм	Rank1	92,13	83,84	73,51	96,25
			mAP	79,48	70,30	46,76	82,90
			mINP	48,92	31,66	8,18	43,14
	С применением аугментации	Rank1	92,75	85,50	75,10	96,94	
		mAP	82,03	72,75	50,13	85,25	
		mINP	53,40	35,26	10,24	47,53	

* Под оригинальной обучающей выборкой предполагается использование для обучения того же набора данных, что и для тестирования.

Применение для тренировки СНС обучающей выборки, расширенной за счет объединения нескольких наборов данных и аугментации, позволило значительно повысить точность повторной идентификации для СНС ResNet-50 в метрике Rank1 на 8–48 %, в метрике mAP – на 27–91 %, в mINP – на 118–285 %. Для DenseNet-121 достигнуто увеличение точности на 7–37 % в метрике Rank1, на 25–88 % – в mAP, на 99–290 % – в mINP при тестировании на разных наборах данных.

Выводы

1. Предложен комплексный подход формирования обучающей выборки для увеличения точности повторной идентификации людей в распределенных системах видеонаблюдения. Для этого создан новый набор данных PolReID1077, который отличается от существующих тем, что содержит изображения людей, полученные в различные времена года и во множестве мест съемки. Объединение с созданной выборкой наиболее известных наборов данных, применяемых для обучения сверточной нейронной сети при реидентификации, позволило увеличить количество изображений на 236,5 % относительно наибольшего из применяемых MSMT17. Использование предложенного алгоритма аугментации данных повышает устойчивость сверточной нейронной сети к перекрытиям, степени освещенности, разрешению изображений и вариациям поз людей.

2. Комплексный подход к формированию обучающей выборки для обучения сверточной нейронной сети позволил повысить точность реидентификации в метриках Rank1, mAP и mINP для разных архитектур сверточной нейронной сети и наборов данных.

References

- Shorten C., Taghi M. K. (2019) A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*. (6), 1–48. DOI: 10.1186/s40537-019-0197-0.
- Chen H., Ihnatsyeva S., Bohush R., Ablameyko S. (2022) Choice of Activation Function in Convolution Neural Network in Video Surveillance Systems. *Programming and Computer Software*. (5), 312–321. DOI: 10.1134/S0361768822050036.
- Wei L., Wang X. (2013) Locally Aligned Feature Transforms Across Views. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 3594–3601. DOI: 10.1109/CVPR.2013.461.
- Li W., Zhao R., Xiao T., Wang X. (2014) DeepReID: Deep Filter Pairing Neural Network for Person Re-Identification. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 152–159. DOI: 10.1109/CVPR.2014.27.
- Zheng L., Shen L., Tian L., Wang S., Wang J., Tian Q. (2015) Scalable Person Re-Identification: a Benchmark. *2015 IEEE International Conference on Computer Vision*. 1116–1124. DOI: 10.1109/ICCV.2015.133.
- Ristani E., Solera F., Zou R. S., Cucchiara R., Tomasi C. (2016) Performance Measures and a Data Set for Multi-Target, Multi-Camera Tracking. *ECCV Workshops*. DOI: 10.1007/978-3-319-48881-3_2.
- Wei L., Zhang S., Gao W., Tian Q. (2017) Person Transfer GAN to Bridge Domain Gap for Person Re-Identification. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 79–88. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00016.

8. Felzenszwalb P., Girshick R., McAllester D., Ramanan D. (2010) Object Detection with Discriminatively Trained Part-Based Models. *PAMI*. DOI: 10.1109/TPAMI.2009.167.
9. Gong Y., Zeng Z. (2021) An Effective Data Augmentation for Person Re-Identification. *ArXiv, abs/2101.08533*. DOI: 10.48550/arXiv.2101.08533.
10. Fu D., Chen D., Bao J., Yang H., Yuan L., Zhang L., Li H., Chen D. (2021) Unsupervised Pre-Training for Person Re-Identification. *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 14745–14754. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01451.
11. Cubuk E. D., Zoph B., Shlens J., Le Q. V. (2020) Randaugment: Practical Automated Data Augmentation with a Reduced Search Space. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 3008–3017. DOI: 10.1109/CVPRW50498.2020.00359.
12. Hendrycks D., Mu N., Cubuk E. D., Zoph B., Gilmer J., Lakshminarayanan B. (2019) AugMix: a Simple Data Processing Method to Improve Robustness and Uncertainty. *ArXiv, abs/1912.02781*. DOI: 10.48550/arXiv.1912.02781.
13. Zhang H., Cissé M., Dauphin Y., Lopez-Paz D. (2017) Mixup: Beyond Empirical Risk Minimization. *ArXiv, abs/1710.09412*. DOI: 10.48550/arXiv.1710.09412.
14. Zhong Z., Zheng L., Kang G., Li S., Yang Y. (2017) Random Erasing Data Augmentation. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. DOI: 10.1609/AAAI.V34I07.7000.
15. Yun S., Han D., Oh S., Chun S., Choe J., Yoo Y. J. (2019) CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 6022–6031. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00612.
16. Xie T., Cheng X., Wang X., Liu M., Deng J., Zhou T., Liu M. (2021) Cut-Thumbnail: a Novel Data Augmentation for Convolutional Neural Network. *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia*. DOI: 10.1145/3474085.3475302.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Игнатьева С. А., аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

Богуш Р. П., д. т. н., доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
Тел.: +375 214 42-30-31
E-mail: s.ignatieva@pdu.by
Игнатьева Светлана Александровна

Information about the authors

Ihnatsyeva S. A., Postgraduate at the Department of Computing Systems and Networks of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Bohush R. P., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Computing Systems and Networks of the Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Novopolotsk, Blokhina St., 29
Euphrosyne Polotskaya
State University of Polotsk
Tel.: +375 214 42-30-31
E-mail: s.ignatieva@pdu.by
Ihnatsyeva Sviatlana Aleksandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-96-101>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.056

АРХИТЕКТУРА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

Ю. И. ВОРОТНИЦКИЙ, Р. А. РУМАС

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Представлены результаты разработки архитектуры аппаратно-программного средства однонаправленной передачи данных в компьютерных сетях. Основными структурными элементами архитектуры являются оптическая гальваническая развязка, медиаконвертеры и прокси-серверы, исключая на аппаратном уровне двунаправленную передачу данных. Работа по однонаправленной передаче данных осуществляется на базе транспортного протокола UDP, обеспечивающего ее без установления двунаправленного взаимодействия. Однонаправленная передача данных производится с прокси-сервера, на котором работает специальное программное обеспечение отправителя, осуществляющее однонаправленную передачу файлов данных, преобразуя их в однонаправленный поток UDP дейтаграмм. Для приема однонаправленного потока UDP дейтаграмм используется прокси-сервер, осуществляющий прием, обработку и формирование исходного файла данных. Достоверность однонаправленной передачи файлов данных обеспечивается путем избыточности (многократной передачи) и проверки контрольной суммы.

Ключевые слова: однонаправленная передача данных, UDP, дейтаграмма, оптическая гальваническая развязка, прокси-сервер, медиаконвертер, архитектура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Воротницкий, Ю. И. Архитектура аппаратно-программного средства однонаправленной передачи данных в компьютерных сетях / Ю. И. Воротницкий, Р. А. Румас // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 96–101. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-96-101>.

ARCHITECTURE OF HARDWARE AND SOFTWARE FOR UNIDIRECTIONAL DATA TRANSMISSION IN COMPUTER NETWORKS

YURY I. VARATNITSKI, RAMAN A. RUMAS

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.02.2023

Abstract. The results of a study of the architecture of hardware and software for unidirectional data transmission in computer networks are presented. The architecture is presented in the form of optical galvanic isolation, media converters and proxy servers, excluding bidirectional data transmission at the hardware level. Work on unidirectional data transmission is carried out on the basis of the UDP transport protocol, which provides operation without establishing bidirectional interaction. Unidirectional data transfer is carried out by a proxy server running a special sender's software that performs unidirectional data file transfer. This software converts the source data file into a unidirectional stream of UDP datagrams. To receive a unidirectional stream of UDP datagrams, a proxy server is used, on which the recipient's special software is running. The receiving proxy server receives, processes and generates the source data file. The reliability of the unidirectional transmission of data files is ensured by redundancy (multiple transmission) and checksum verification.

Keywords: unidirectional data transmission, UDP, datagram, optical galvanic isolation, proxy server, media converter, architecture.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Varatnitski Y. I., Rumas R. A. (2023) Architecture of Hardware and Software for Unidirectional Data Transmission in Computer Networks. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 96–101. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-96-101> (in Russian).

Введение

В настоящее время существует большое число конфиденциальных сетей, в которых необходимо обеспечить защиту секретной или иной информации, представляющей особую ценность для ее владельца. Один из способов надежной защиты от внешних угроз – изолировать такие сети, сделав их недоступными из других внешних сетей. Тем не менее возникают случаи, когда требуется передавать информацию между такими сетями независимо от их конфиденциального характера, либо обеспечить безопасную передачу данных из недоверенных сетей в конфиденциальную сеть. По сути, речь идет о реализации модели контроля и управления доступом Белла – Лападулы, предполагающей однонаправленную передачу данных от субъекта с низким уровнем доступа к объекту с высоким уровнем конфиденциальности [1].

Однонаправленная передача данных предполагает, что устройство в компьютерных сетях может только передавать данные или только получать их. При этом устройство – источник данных – может осуществлять их передачу одному или нескольким устройствам – приемникам, но последние не могут передавать данные источнику. Однонаправленная передача данных применяется для безопасной передачи информации, например, файлов, журналов событий, почтовых сообщений, промышленных протоколов, обновлений программного обеспечения. При этом гарантия однонаправленного потока информации означает, что конфиденциальная информация может быть передана без ущерба для целостности или конфиденциальности информации в сети.

Известны различные средства однонаправленной передачи данных на основании программного решения, такие как межсетевые экраны [2, 3] и специализированные аппаратные решения (диоды данных). Первые имеют избыточный функционал, эффективно снижают уровень угроз, но не обязательно предотвращают их. Во многих случаях они достаточны, чтобы остановить незначительные угрозы информационной безопасности. Однако современные киберугрозы являются сложными и отличаются скоординированными атаками сразу с нескольких векторов. В этом случае внешние угрозы могут быть предотвращены путем их физического отделения от защищаемых сетей, например, с помощью оптической гальванической развязки между ними. Однако отсутствие маршрутизируемого и управляемого подключения в некоторой степени снижает их гибкость и не позволяет адаптироваться к требованиям конкретных информационных систем. Сложные угрозы могут использовать скоординированную и настойчивую тактику для преодоления эшелонированной защиты, паролей, многофакторной аутентификации и даже биометрии, но преодолеть физический разрыв (оптическую гальваническую развязку) в диоде данных с помощью существующих инструментов по-прежнему невозможно.

В статье проведен анализ функциональности существующих специализированных аппаратно-программных средств однонаправленной передачи данных. Предлагается решение, устраняющее их основные недостатки.

Анализ существующих решений

На основании информации, предоставленной в открытом доступе, существующие программно-аппаратные решения, предположительно, работают на основе физической реализации однонаправленной передачи путем использования в одних случаях гальванической развязки, в других – с помощью программного обеспечения. Гальваническую развязку можно реализовать, применяя оптический канал, работающий на передачу по одному оптическому волокну. Основываясь на данном методе, передать данные можно по известному транспортному протоколу UDP. Кроме того, необходимо использовать прокси-серверы на передающей и принимающей сторонах для организации двунаправленного взаимодействия с конечными пользователями. Применение прокси-серверов позволит хранить данные как на передающей стороне, так и на принимающей.

Аппаратно-программный комплекс AMT InfoDiode (рис. 1) [4] обеспечивает изоляцию критичных информационных систем, сохраняя при этом нужный уровень их функциональности для взаимодействия со смежными информационными системами. Передача трафика возможна только в одном направлении: гальваническая развязка гарантирует отсутствие обратной связи. Прокси-серверы обеспечивают связь с внешними системами и организуют однонаправленный транспорт данных между собой. Для внешних систем прокси-сервер выступает в роли сервера данных (FTP\FTPS, SMTP\StartTLS, CIFS), на передающей системе – в роли клиента.

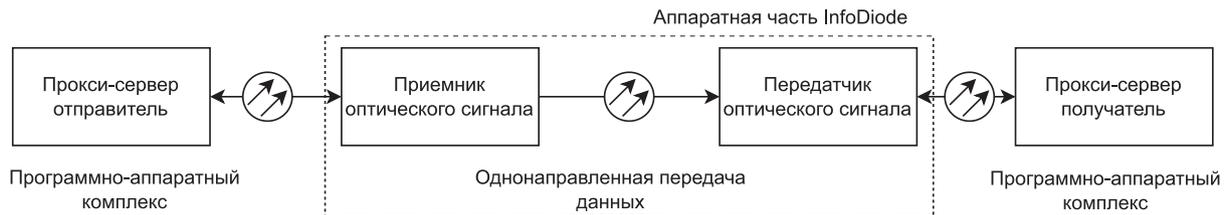


Рис. 1. Схема работы системы InfoDiode
Fig. 1. Scheme of the InfoDiode system operation

Техническое средство однонаправленной передачи данных «Диод-2С» (рис. 2) [5] предназначено для однонаправленной передачи данных из информационных систем с низкой степенью конфиденциальности (секретности), в том числе из интернета, в информационные системы с высокой степенью конфиденциальности (секретности).

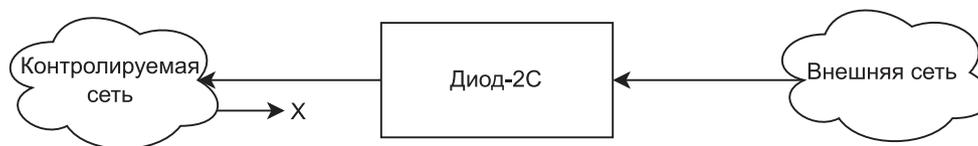


Рис. 2. Схема работы технического средства однонаправленной передачи данных «Диод-2С»
Fig. 2. Scheme of the technical means of unidirectional data transmission “Diode-2C” operation

В основе решения Fox DataDiode [6] лежит аппаратная часть, обеспечивающая одностороннее сетевое соединение. Блок Fox DataDiode уникален тем, что гарантирует односторонний трафик на физическом уровне: у него нет программного обеспечения или прошивки, следовательно, им нельзя манипулировать или произвести неправильную настройку. Однако полная установка Fox DataDiode (рис. 3) включает программное обеспечение прокси-серверов с обеих сторон Fox DataDiode, которые преобразуют двунаправленные протоколы в односторонние, и наоборот.



Рис. 3. Схема работы системы Fox DataDiode
Fig. 3. Scheme of Fox DataDiode system the operation

С учетом специфики области применения рассматриваемых средств можно выделить их следующие недостатки:

- невозможность однозначно определить, каким образом гарантируется однонаправленная передача данных, так как производители не предоставляют таких сведений и не раскрывают коммерческую тайну по производству этих средств;
- невозможность определить дополнительный скрытый функционал, который может присутствовать в данных средствах;
- зависимость от производителя в рамках сервисного и гарантийного обслуживания;
- невозможность замены составных частей альтернативными отечественными решениями;
- сложность внедрения в существующие информационные системы.

Разработка архитектуры аппаратно-программного средства

Архитектура аппаратно-программного средства однонаправленной передачи данных разрабатывалась на основании следующих требований:

- физическая изоляция информационных систем;

- однонаправленная передача файлов данных;
- однонаправленная передача потока данных (UDP);
- однонаправленная передача журналов событий (syslog).

Функциональность предлагаемого средства однонаправленной передачи данных обеспечивает архитектурное решение (рис. 4), включающее два медиаконвертера, два прокси-сервера, оптический разветвитель (сплиттер).

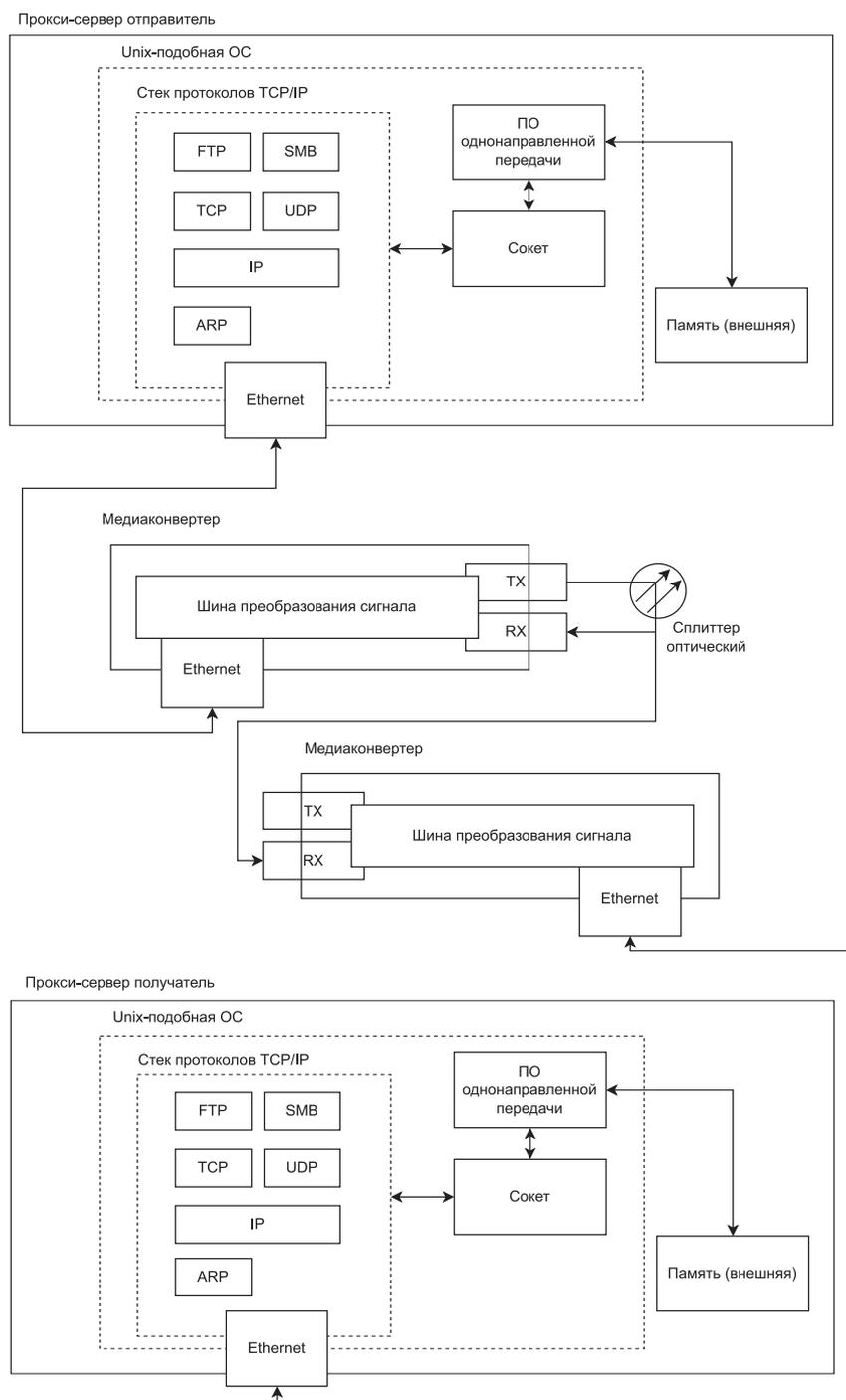


Рис. 4. Архитектура аппаратно-программного средства однонаправленной передачи в компьютерных сетях
Fig. 4. Architecture of hardware and software for unidirectional transmission in computer networks

Медиаконвертеры имеют один Ethernet-интерфейс и оптический интерфейс, представленный двумя оптическими модулями: TX – фотопередатчик, RX – фотоприемник. Разделение оптического интерфейса медиаконвертера на два модуля гарантирует физически однонаправленную передачу при использовании со стороны-отправителя TX-модуля, а на стороне-получателе – RX.

Наличие активной (по умолчанию) функции LLR (Link Loss Return) говорит о том, что передатчик оптического порта (TX) конвертера выключается, если приемник (RX) не получает сигнала. Особенностью предлагаемой архитектуры аппаратной части является наличие оптического разветвителя (сплиттера) для организации передачи сигналов на RX-модуль стороны-отправителя.

Для реализации однонаправленного шлюза на канальном уровне модели OSI источнику и приемнику информации необходимо адресовать пакеты согласно уникальным идентификаторам, называемым MAC-адресами (Media Access Control). Предварительно по протоколу ARP (Address Resolution Protocol) нужно обменяться информацией для установления соответствия MAC-адреса и IP-адреса компьютера, с которым необходимо взаимодействовать. Однако при однонаправленном канале передачи данных обмен информацией произведен не будет. Одним из способов решения данной проблемы является установление статического соответствия MAC-адреса и IP-адреса на устройстве-отправителе. Для работы на сетевом и транспортном уровнях модели взаимодействия OSI при однонаправленной передаче данных следует использовать протоколы без установления логической связи, которая подразумевает двунаправленное взаимодействие. Протокол IP на сетевом уровне является протоколом без установления логической связи.

Другой вариант реализации передачи данных на IP-адрес получателя – мультикастовая передача, которая не предполагает предварительно настроенную ARP-запись. Следовательно, устройство-отправитель данных при однонаправленной передаче будет отправлять информацию на мультикастовый адрес, например, 224.0.0.1, а устройство-получатель, в свою очередь, будет прослушивать и ожидать данные на указанный адрес. Мультикастовая передача данных имеет ряд преимуществ по сравнению с передачей на конкретный IP-адрес:

- прокси-сервер на стороне-отправителе не зависит от настроенного IP-адреса прокси-сервера на стороне-получателе;
- отсутствует необходимость настраивать статическую ARP-запись на прокси-сервере отправителя;
- нет необходимости изменять настройки прокси-сервера отправителя при изменении IP-адреса на прокси-сервере получателя;
- для повышения целостности при однонаправленной передаче данных может использоваться несколько прокси-серверов получателей, которые будут подключены через коммутатор и получать мультикастовые данные.

При использовании транспортных протоколов следует выбрать UDP, который является дейтаграммным протоколом, реализующим так называемый ненадежный сервис по возможности, не гарантирующий доставку сообщений адресату, но обеспечивающий работу без необходимости предварительного сообщения для установки специальных каналов передачи. Прокси-серверы отправителя и получателя обеспечивают однонаправленную передачу данных, например файлов, работая на транспортном уровне UDP модели OSI через медиаконвертеры следующим образом:

- прокси-сервер отправителя получает файлы данных из открытой сети посредством двунаправленного взаимодействия и протоколов SMB, FTP, SFTP и т. д.;
- ввиду отсутствия двунаправленного взаимодействия между прокси-сервером отправителя и прокси-сервером получателя, необходимо организовать статическую ARP-запись на стороне-отправителе;
- программное обеспечение (ПО) на стороне-получателе постоянно прослушивает порт на определенном IP-адресе и ожидает приема UDP-дейтаграмм, преобразуя их в исходное сообщение (файлы данных) и сохраняя их в памяти;
- ПО на стороне-отправителе постоянно проверяет наличие файлов данных в памяти и при их наличии начинает процесс однонаправленной передачи на заранее настроенный IP-адрес и порт получателя через Socket, который, в свою очередь, работает по транспортному протоколу UDP;
- после передачи на стороне-получателе проверяется контрольная сумма переданных файлов данных по предварительно переданной информации о контрольной сумме от отправителя.

Достоверность передачи обеспечивается путем избыточности (многократной передачи) и проверки контрольной суммы каждый раз. После передачи и успешной проверки контрольной суммы на стороне-получателе клиенты из закрытой сети (сети ограниченного взаимодействия) получают переданные файлы от прокси-сервера данных посредством двунаправленного взаимодействия и протоколов SMB, FTP, SFTP [7] и т. д.

Предложенное архитектурное решение было реализовано в виде макетного образца на основе медиаконвертеров DMC-F15SC [8] и сплиттера. Медиаконвертер имеет физически разделенные модули фотопередатчика и фотоприемника. Программное обеспечение прокси-серверов функционирует на аппаратной платформе в виде одноплатных компьютеров Raspberry PI 4 и написано на языке программирования Python.

Выводы

1. Предложенная архитектура аппаратной и программной частей позволила реализовать отечественное импортозамещающее средство однонаправленной передачи данных, обеспечивающее гарантированное одностороннее взаимодействие, реализуемое на физическом уровне. Особенности данной архитектуры – гарантированная однонаправленная передача данных, использование прокси-серверов для обеспечения двунаправленного взаимодействия устройства с конечными пользователями, работа на существующем стеке протоколов TCP/IP.

2. При атаке на критически важные производственные и транспортные системы средства однонаправленной передачи данных помогут сохранить элементы контроля и управления важной инфраструктурой в неприкосновенности, не нарушая при этом работу всей системы. Физическая изоляция, невозможность передачи данных в одном из направлений фактически лишают злоумышленников шансов на реализацию вредоносных замыслов.

References

1. Bell D. E., LaPadula L. J. (1976) *Secure Computer System: Unified Exposition and Multics Interpretation*. Bedford, The MITRE Corporation, Report ESD-TR-75-306.
2. *Top Firewall Vendors 2021: Reviews and Ratings*. Available: <https://techdayhq.com/community/articles/top-firewall-vendors-2021-reviews-and-ratings> (Accessed 20 January 2023).
3. *Network Firewalls Reviews and Ratings*. Available: <https://www.gartner.com/reviews/market/network-firewalls> (Accessed 20 January 2023).
4. *InfoDiode – Unidirectional Data Transmission System*. Available: <http://amt.ru/web/ru/infodiode> (Accessed 20 January 2023).
5. *Technical Means of Unidirectional Data Transmission “Diod-2C”*. Available: <http://www.cbi-info.ru/groups/page-1180.htm> (Accessed 20 January 2023).
6. *Fox DataDiode*. Available: <https://www.fox-it.com/en/technology/datadiode/> (Accessed 20 January 2023).
7. Olifer V. G., Olifer N. A. (2010) *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols*. St. Petersburg, 4th ed. 944.
8. *Media Converter D-Link DMC-F15SC*. Available: <https://www.dlink.ru/ru/products/4/1673.html> (Accessed 20 January 2023).

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / All authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Воротницкий Ю. И., к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой телекоммуникаций и информационных технологий Белорусского государственного университета

Румас Р. А., соискатель кафедры телекоммуникаций и информационных технологий Белорусского государственного университета

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 1
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 209-59-42
E-mail: rumas96_96@mail.ru
Румас Роман Андреевич

Information about the authors

Varatnitski Y. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Telecommunications and Information Technologies of the Belarusian State University

Rumas R. A., Applicant at the Department of Telecommunications and Information Technologies of the Belarusian State University

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 1
Belarusian State University
Tel.: +375 17 209-59-42
E-mail: rumas96_96@mail.ru
Rumas Raman Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110>

Original paper

UDC 615.47:616-072.7

IT DIAGNOSTICS OF PARKINSON'S DISEASE BASED ON THE ANALYSIS OF VOICE MARKERS AND MACHINE LEARNING

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, YIWEI XIA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26.01.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

Abstract. The results of studying the parameters of the spectra of speech signals by machine learning with the use of neural networks are presented. This study was carried out in order to confirm experimentally the possibility of performing an assessment of these parameters for the detection of Parkinson's disease in the early stages (IT diagnostics). During the study, the public database was used, which systematized the spectra of vowel sounds uttered by patients with Parkinson's disease. The applied method is binary data classification. In the course of the study, the speech data spectrum was first preprocessed, which consisted of filtering it in order to remove its noise components and eliminate bursts and gaps in it. Then the parameters of the processed spectrum of speech data were determined: average value, maximum and minimum, peak, wavelet coefficients, MFCC and TQWT. After that, the object was selected using the PCA algorithm. The model was trained using the Knn and Random Forest algorithms, as well as the Bayesian neural network. The Bayesian optimization algorithm and the GridSearch method were used to find the best model hyperparameters. It has been established that when using Knn, Random Forest and Bayesian neural network, it is possible to increase the accuracy of recognition of Parkinson's disease by 94.7; 88.16 and 74.74 %, respectively. A similar study by other scientists showed that the recognition accuracy of data sets was only 86 %.

Keywords: machine learning, neural networks, binary classification, hyperparameter optimization, decision tree, sensitivity, precision.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vishniakou U. A., YiWei Xia (2023) IT Diagnostics of Parkinson's Disease Based on the Analysis of Voice Markers and Machine Learning. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 102–110. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110>.

ИТ-ДИАГНОСТИКА БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГОЛОСОВЫХ МАРКЕРОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В. А. ВИШНЯКОВ, ИВЭЙ СЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 26.01.2023

Аннотация. Представлены результаты исследования параметров спектров речевых сигналов с помощью машинного обучения с применением нейронных сетей, проведенного в целях экспериментального подтверждения возможности выполнения оценки этих параметров для выявления болезни Паркинсона на ранних стадиях (ИТ-диагностика). В ходе исследования использовали общедоступную базу данных, в которой систематизированы спектры гласных звуков, произнесенных пациентами с болезнью Паркинсона. Примененный метод – бинарная классификация данных. Сначала выполняли предварительную обработку спектра речевых данных, состоявшую в его фильтрации, для удаления из него шумов и устранения

присутствующих в нем всплесков и пробелов. Затем определяли параметры обработанного спектра речевых данных: среднее значение, максимум, минимум, пик, вейвлет-коэффициенты, MFCC и TQWT. После этого выбирали объект с помощью алгоритма PCA. Для обучения модели использовали алгоритмы Knn и Random Forest и нейронной сети Байеса. Для нахождения наилучших гиперпараметров модели применяли алгоритм оптимизации Байеса и метод GridSearch. Установлено, что при использовании Knn, Random Forest и нейронной сети Байеса можно обеспечить увеличение точности распознавания болезни Паркинсона на 94,7; 88,16 и 74,74 % соответственно. Аналогичное исследование, проведенное другими учеными, показало, что точность распознавания наборов данных составила всего 86 %.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, бинарная классификация, гиперпараметрическая оптимизация, дерево решений, чувствительность, точность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков, В. А. IT-диагностика болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и машинного обучения / В. А. Вишняков, Ивэй Ся // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 102–110. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110>.

Introduction

Parkinson's disease (PD) is a common neurodegenerative disease of the elderly. Medical research [1] suggests that the pathology of Parkinson's disease has two main aspects: depigmentation of the substantia nigra due to degeneration of neurons containing melanin and dopamine; and the formation of Lewy bodies in the substantia nigra and other brain areas, such as the nucleus acumens and parts of the cortex.

Lewy bodies are considered as biological marker of Parkinson's disease and thought to be responsible for the loss of dopaminergic neurons. Studies have shown that Lewy bodies spread through nervous system in a specific pattern of dissemination, H. Braak et al. [2] divided this pattern into six stages, with olfactory and speech disturbances occurring in the first two stages. According to the study, 89 % of Parkinson's disease patients have varying degrees of speech impairment. Studying the symptoms of speech disorders in Parkinson's disease patients is an excellent direction to achieve IT diagnosis disease in its early stages.

Review

The investigation is done to classify Parkinson diseased and healthy people by extracting fourteen phonological features and twelve cepstral features of speech using Upadhyya methodology [3]. Fourteen phonological features including five jitter variants, six shimmer variants, two harmonic features and the mean autocorrelation of the fundamental frequency feature. The final classification can be based on machine learning technology using a neural network approach. Parkinson disease detection using pattern recognition method has been presented in literature by Putri [4]. It extracted 22 speech features and 12 EMG features and used artificial neural networks as a classification method.

In this article we used machine learning and neural network to identify Parkinson's disease with K-nearest neighbor (Knn), Random Forest and Bayesian algorithms. Based on machine learning, neural network algorithms can be divided into the following four categories: supervised, unsupervised, semi-supervised and reinforcement. The general process of machine learning algorithms can be divided into 5 steps, as shown in Fig. 1.

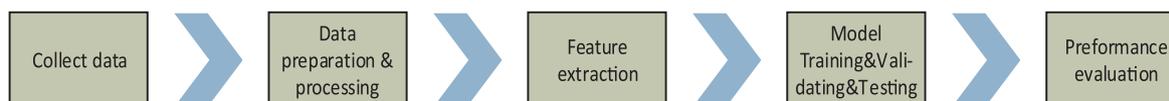


Fig. 1. The general process of neural networks and machine learning

K-nearest neighbor algorithm

The K-nearest neighbor [5] algorithm is a simple machine learning algorithm. It has two basic parameters:

- distance calculation methods. Common methods for calculation of distance between two points are Manhattan distance, Euclidean distance and Minkowski distance;
- the k value. Find the k nearest neighbors.

The implementation process of the Knn algorithm contains the following steps:

- 1) inputting training datasets and testing datasets;
- 2) determining the parameter of k ;
- 3) calculating the distance of the current point against the given training data (distance between all training data points and the current point, current point is from testing datasets). Euclidean distance can be used here;
- 4) ranking the calculated distances in ascending order;
- 5) selecting k points with the smallest distance from the current point (k points are from the training datasets);
- 6) The label with the highest frequency among the k points is returned as the predicted label for the current point.

The advantage of the Knn algorithm is that it is computationally simple, but the disadvantage is that it is computationally intensive and has a large memory overhead. A suitable value of k needs to be chosen.

Random Forest algorithm

Random Forest algorithm [6] is a decision tree model based on the bagging framework, it consists of following steps:

- 1) if N is the number of samples in the training datasets and a constant $n < N$ is specified, then n samples are randomly selected from the training set with a put-back, selected n samples are used as the training datasets, samples not selected are used as the testing sets to evaluate the error;
- 2) if the number of features in the training set is M , then m features ($m \ll M$) are randomly selected from the selected n samples to build the decision tree;
- 3) the above steps are repeated k times, resulting in k decision trees;
- 4) after generating k decision trees, for each testing data, the category with the highest number of classification results among the k decision trees is used as the classification result of the whole Random Forest.

Fig. 2 shows the flow of the Random Forest classification algorithm.

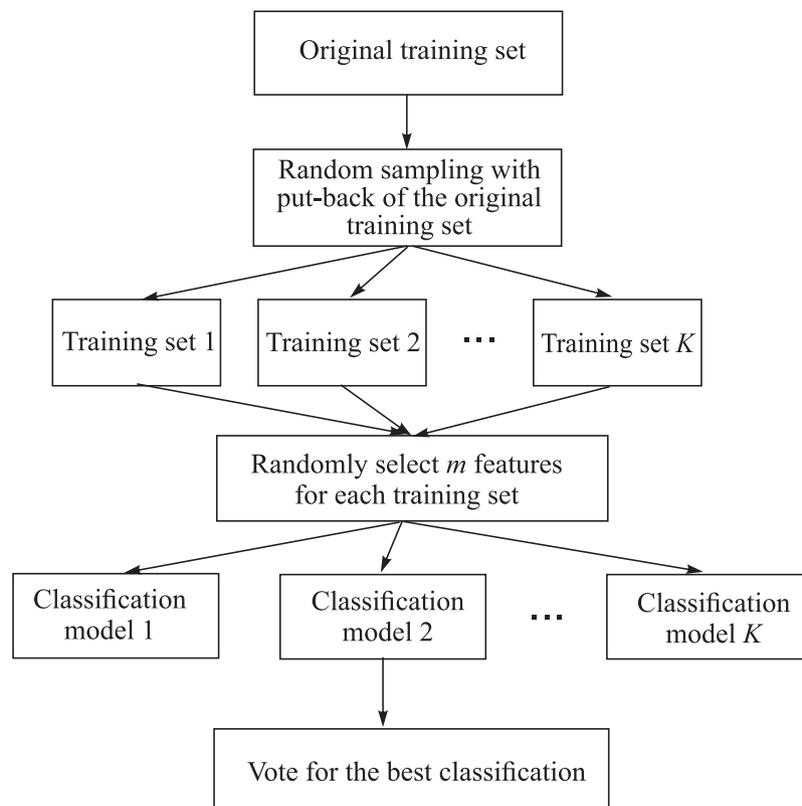


Fig. 2. The flow of the Random Forest classification algorithm

The hyperparameters of the Random Forest classification algorithm are as follows:

- the number of decision trees;
- the number of features in each decision tree;
- whether to adopt a random sampling with put-back;
- the maximum depth of the tree, beyond which branches will be pruned.

The advantage of Random Forest algorithm is that it can be trained in parallel and can handle high-dimensional data and unbalanced data very well, but the disadvantage is that it is not good at handling small data or low-dimensional data.

Bayesian neural network algorithm

Bayesian neural networks (BNN) [7] have the same network structure as fully connected neural networks. But BNN combined probabilistic modelling with neural networks. Bayesian neural networks differ from normal neural networks in that the weight parameters are random variables rather than definite values. The Fig. 3 shows the comparison of parameters between Deep neural networks (DNN) and BNN.

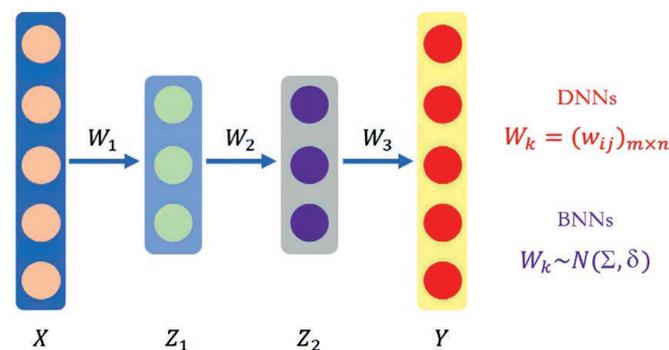


Fig. 3. The comparison of parameters between Deep neural networks and Bayesian neural networks

The hyperparameters of the BNN are as follows:

- the number of hidden layers;
- regularization parameters. Regularization coefficients affect the generalization ability of the model;
- the number of neurons per layer;
- the number of epoch. An epoch means that all the data is fed into the network, completing a forward computation plus backward propagation process;
- learning rate. Learning rate schedule for weight updates;
- the activation function of the hidden layer. Activation functions such as logistic regression function, tanh function, relu function, etc.

The steps of BNN algorithm are as follows:

- 1) initializing the training model parameters;
- 2) inputting training datasets into the model and perform a forward propagation to obtain the prediction results;
- 3) calculating the error between the prediction result and the real result;
- 4) the error is back-propagated once and the model parameters are optimised using an optimisation algorithm;
- 5) repeating the training for k epochs;
- 6) outputting the model parameters.

Methodology

The public datasets [8] used in this article were gathered from 188 patients with PD (107 men and 81 women) with ages ranging from 33 to 87 at the Department of Neurology in Cerrahpa Faculty of Medicine, Istanbul University. The control group consisted of 64 healthy individuals (23 males and 41 females), aged between 41 and 82 years old. During data collection, the microphone was set to 44.1 KHz and then repeated three times to collect sustained pronunciation of the vowel “a” from each participant.

After data cleaning and pretreatment of the datasets, for each speech record, we extracted 21 baseline features (5 jitter variants features [9], 6 shimmer variants features [9], 5 fundamental frequency

parameters features [10], 2 harmonic parameters [11], 1 recurrence period density entropy feature [11], 1 detrended fluctuation analysis feature [11] and 1 pitch period entropy feature [11]), 11 temporal frequency features (3 intensity parameters features, 4 formant frequencies features and 4 bandwidth features), 84 Mel frequency cepstral coefficients features, 182 Wavelet transform based features [12], 22 vocal fold features [13] (3 glottis quotient features, 6 glottal to noise excitation features, 7 vocal fold excitation ratio and 6 empirical mode decomposition features), 432 tunable Q-factor wavelet transform features [14]. The data features set was then normalized, divided into training datasets and testing datasets in the ratio of 9:1. The training datasets were trained and tested using 5-fold cross validation with 5 times' repetition. Testing datasets were used to test the final results. Since the data were labeled data, the problems were supervised learning of classification problems. In this article, we used the Knn algorithm, Random Forest and the Bayesian neural network algorithm. The Fig. 4 shows the flow chart of training datasets and testing datasets.

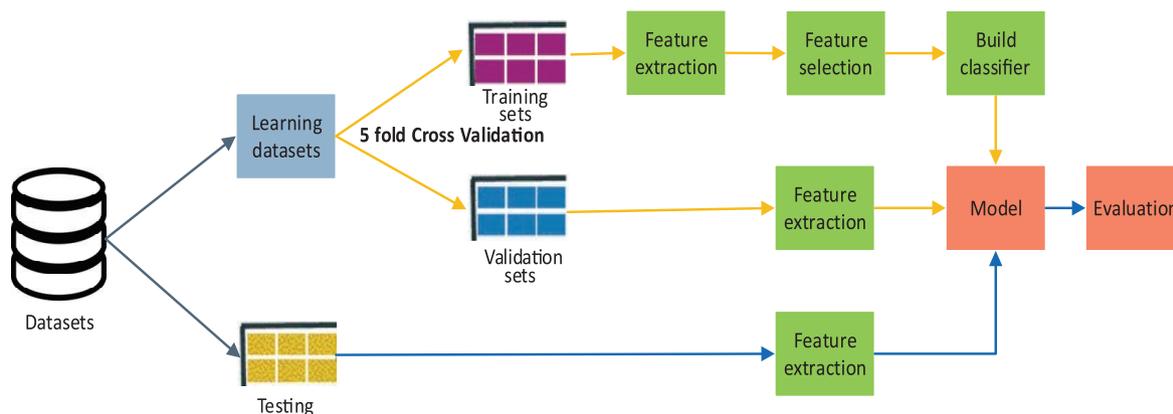


Fig. 4. The flow chart of training datasets and testing datasets

Experiments and results

Python is an interpreted, object-oriented, dynamically data-typed high-level programming language. Because it is simple and has a large number of useful libraries. So, we used Python to implement machine learning algorithms and neural network algorithms. Here were the Python libraries used in our experiments:

- Numpy library was used to load and store audio data;
- Matplotlib library was used to draw confusion matrices and ROC plots;
- Sklearn library was used to implement machine learning algorithms;
- Keras library was used to implement BNN models;
- Pandas library was used to read csv files.

In this experiment, we used the confusion matrix [15] to evaluate the model. Here were the experiments we conducted. First of all, we applied the Bayesian optimizer to optimize the hyperparameters of Knn. Its acquisition function was an expected improvement per second. Then the number of calculation iterations was 30 times. The minimal classification error plot on speech features using Knn algorithm was shown in the Fig. 5.

From Fig. 5, we can see that error reached a minimum value at the 29th iteration, so we took the KNN parameter value of the 29th iteration as the KNN parameter value for this experiment. We used the PCA (Principal components analysis) method to select 10 features [16]. The number of neighbours k was 2. The distance measurement was Cosine function, distance weighting was the inverse distance weighting.

The recognition results of the Parkinson's disease speech datasets based on the Knn algorithm were as follows. The confusion matrix and Receiver Operating Characteristic (ROC) [17] plots of the experimental results for the training datasets were shown in Fig. 6. The confusion matrix and ROC curve plots of the experiment results for the testing datasets were shown in Fig. 7. The experimental results of Parkinson's recognition based on Knn algorithm on the testing datasets were shown in Tab. 1.

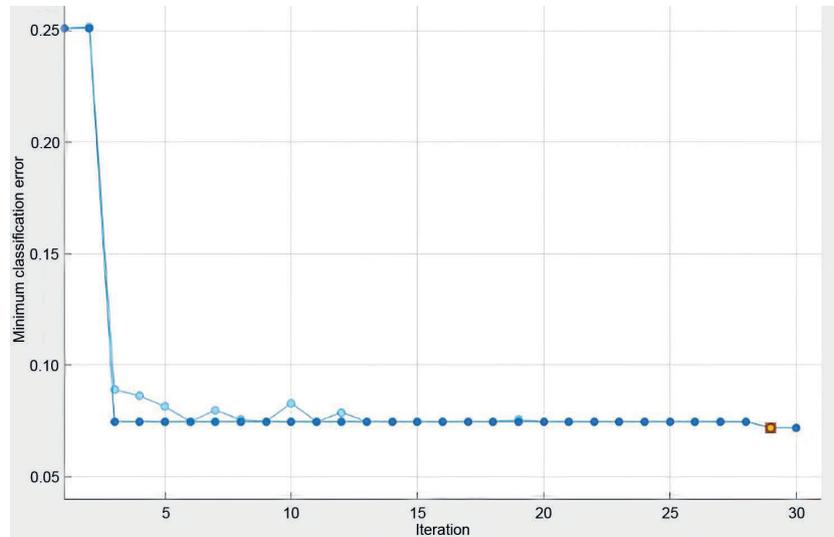


Fig. 5. The minimal classification error plot on speech features using Knn algorithm

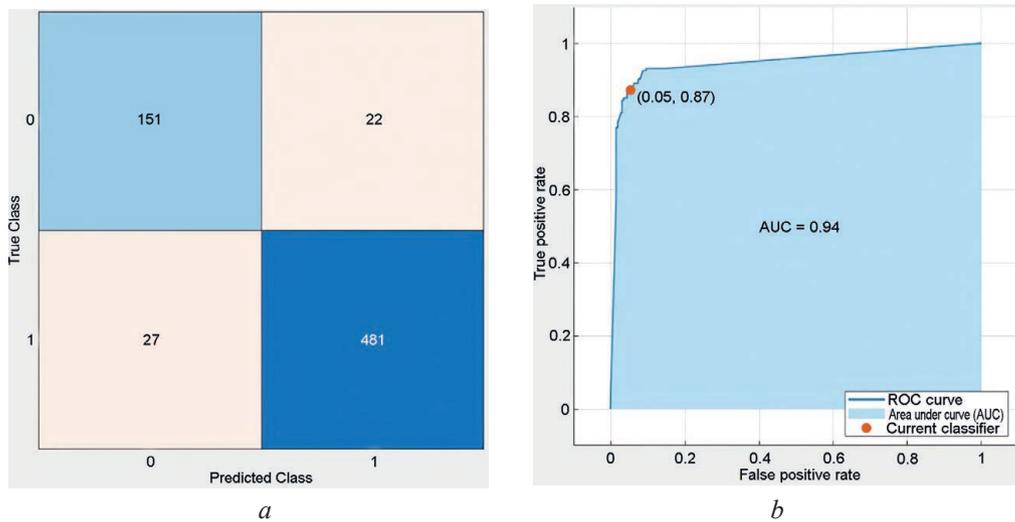


Fig. 6. Results of training datasets:

a – confusion matrix of training datasets; *b* – Receiver Operating Characteristic plots of training datasets

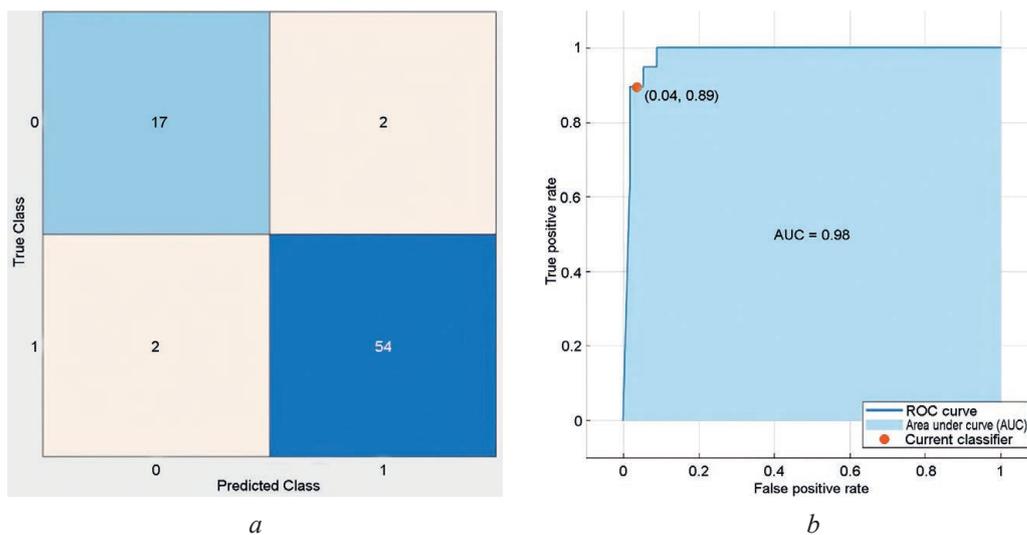


Fig. 7. Results of testing datasets:

a – confusion matrix of testing datasets; *b* – Receiver Operating Characteristic plots of testing datasets

Table 1. Experimental results of Parkinson’s recognition based on Knn algorithm

Dataset	Average value, %			Test accuracy, %
	Precision	Sensitivity	F1 score	
Pd_speech	92.95	92.95	92.95	94.7

In summary, the accuracy of the training datasets was 92.8 % and the accuracy of the testing datasets was 94.7 %. The accuracy of the testing sets was 1.9 % higher than that of the training sets. This means that the data sets were very small. When the datasets were divided into training and testing dataset, the data from different categories are unevenly distributed, resulting in the accuracy of the testing datasets being greater than the accuracy of the training dataset.

In the Random Forest algorithm, the GridSearchCV method was used to select the appropriate hyper-parameters. The number of decision trees in this experiment was searched between 1 and 100 and the best result was 81; the number of features on each decision tree was searched between 1 and 100 and the best result was 23. The Gini coefficient was chosen as a measure of impurity, the maximum depth of the tree was not restricted. Random sampling with put-back was used. The experimental results of Parkinson’s recognition based on Random Forest algorithm on the testing datasets were shown in Tab. 2.

Table 2. Experimental results of Parkinson’s recognition based on Random Forest algorithm

Dataset	Average value, %			Test accuracy, %
	Precision	Sensitivity	F1 score	
Pd_speech	76.91	89.31	82.65	88.16

From this experiment it could be seen that, the test accuracy of the recognition results of the speech datasets of Parkinson’s disease based on Random Forest algorithm was only 88.16 %. They were lower than the model based on the Knn algorithm. Although the Random Forest algorithm outperformed the Knn algorithm in most cases. However, when the amount of data was particularly small, the Knn algorithm still outperformed the Random Forest algorithm in classification. We used a BNN model, which utilized 2 hidden layers with first layer of size 10 and second layer of size 10, and a ReLU function as the activation function. The experimental results of Parkinson’s recognition based on BNN algorithm on the testing datasets were shown in Tab. 3.

Table 3. Experimental results of Parkinson’s recognition based on Bayesian neural network algorithm

Dataset	Average value, %			Test accuracy, %
	Precision	Sensitivity	F1 score	
Pd_speech	64.15	57.14	60.44	74.74

In summary, experiments indicated that the BNN reached 74.74 % recognition accuracy on the testing datasets. The other index parameters were very low and the recognition effect was not good, which means that the BNN algorithm was not suitable for the model of small data. The neural network algorithm required larger data for better recognition. We compared the results of IT diagnosis of Parkinson’s disease with the known results of other researchers. The Tab. 4 compares the test accuracy of this study and existing studies on the same dataset of Pd.

Table 4. Compare with others’ research

Dataset	Researcher	Research method	Test accuracy, %
Pd_speech	C. O. Sakar [8]	SVM (RBF)	86
		SVM (Linear)	83
		Multilayer perceptron	84
	Authors	Knn	94
		Random Forest	88
		Bayesian neural network	74

The Tab. 4 showed that the Knn algorithm has the highest test accuracy with 94 % on the same dataset. This indicates that Knn algorithm has better performance on small data sets.

Conclusion

1. The article presented speech recognition systems, which are most relevant in Parkinson's disease, discussed their results. Using public datasets, the authors extracted basic characteristics, time frequency characteristics, characteristics of low-frequency cepstral coefficients, characteristics based on the wavelet transform, vocal fold characteristics and configurable characteristics of the Q-factor wavelet transform. Datasets of patients were used in a machine learning model, the model was then trained using the Knn algorithm, Random Forest algorithm, Bayesian neural network algorithm.

2. Based on the speech data of patients, IT diagnostics of Parkinson's disease results were: the recognition accuracy for the Knn algorithm reached 94.7 %, the Random Forest algorithm – 88.16 %, the Bayesian neural network algorithm – 74.74 %. The authors results of IT diagnostics of Parkinson's disease were compared with the known results of other researchers, the best of which are 86 %.

3. The results of the experiment showed that the early detection of Parkinson's disease based on the speech data was effective. But it was also possible to see from the experiment that the data set had a very important impact on the results of the experiment. A more balanced dataset with more data could provide better recognition results. On small data sets, the Knn algorithm surpassed the Random Forest and the Bayesian neural network algorithm.

References

1. Davie C. A. (2008) A Review of Parkinson's Disease. *British Medical Bulletin*. 86 (1), 109–127.
2. Braak H., Ghebremedhin E., Rüb U., Bratzke H., Del Tredici K. (2004) Stages in the Development of Parkinson's Disease-Related Pathology. *Cell and Tissue Research*. 318 (1), 121–134.
3. Upadhy S. S., Cheeran A. N. (2018) Discriminating Parkinson and Healthy People Using Phonation and Cepstral Features of Speech. *Computer Science*. 143, 197–202.
4. Putri F., Caesarendra W., Pamanasari E. D., Ariyanto M., Setiawan J. D. (2018) Parkinson Disease Detection Based on Voice and EMG Pattern Classification Method for Indonesian Case Study. *Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*. 3 (2), 87–98.
5. Zhang M. L., Zhou Z. H. (2007) ML-KNN: a Lazy Learning Approach to Multi-Label Learning. *Pattern Recognition*. 40 (7), 2038–2048.
6. Palimkar P., Shaw R. N., Ghosh A. (2022) Machine Learning Technique to Prognosis Diabetes Disease: Random Forest Classifier Approach. *Advanced Computing and Intelligent Technologies*. Springer, Singapore. 219–244.
7. Kareem S. W, Alyousuf F. Q., Ahmad K., Hawezi R., Awla H. (2022) Structure Learning of Bayesian Network: a Review. *Qalaai Zanist Journal*. 7 (1), 956–975.
8. Sakar C. O., Serbes G., Gunduz A., Tunc H. C., Nizam H. (2019) A Comparative Analysis of Speech Signal Processing Algorithms for Parkinson's Disease Classification and the Use of the Tunable Q-Factor Wavelet Transform. *Applied Soft Computing*. 74 (4), 255–263.
9. Upadhy S. S., Cheeran A. N., Nirmal J. H. (2017) Statistical Comparison of Jitter and Shimmer Voice Features for Healthy and Parkinson Affected Persons. *Electrical, Computer and Communication Technologies. IEEE*. 1–6.
10. Holmes J. R., Oates M. J., Phyland J. D., Hughes J. A. (2000) Voice Characteristics in the Progression of Parkinson's Disease. *International Journal of Language & Communication Disorders*. 35 (3), 407–418.
11. Abdurrahman G., Sintawati M. (2020) Implementation of Xgboost for Classification of Parkinson's Disease. *Journal of Physics*. 1538 (1), 1–12.
12. Tsanas A., Little M., McSharry P. E., Ramig L. O. (2010) New Nonlinear Markers and Insights into Speech Signal Degradation for Effective Tracking of Parkinson's Disease Symptom Severity. *NOLTA, Poland*. 457–460.
13. Erdogdu S. B., Serbes G., Sakar C. O. (2017) Analyzing the Effectiveness of Vocal Features in Early Telediagnosis of Parkinson's Disease. *PloS One*. 12 (8), 1–18.
14. Selesnick I. W. (2011) Wavelet Transform with Tunable Q-Factor. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 59 (8), 3560–3575.
15. Visa S., Ramsay B., Ralescu A. L., Esther van der Knaap (2011) Confusion Matrix-Based Feature Selection. *Artificial Intelligence and Cognitive Science*. 710 (1), 120–127.

16. Maćkiewicz A., Ratajczak W. (1993) Principal Components Analysis (PCA). *Computers & Geosciences*. 19 (3), 303–342.
17. Fawcett T. (2006) An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*. 27 (8), 861–874.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Вишняков В. А., д. т. н., профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Ивэй Ся, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Вишняков Владимир Анатольевич

Information about the authors

Vishniakou U. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

YiWei Xia, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Vishniakou Uladzimir Anatolievich



*Статья посвящается 105-летию со дня рождения
профессора-геометра Ивана Петровича Егорова*

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РИМАНОВЫ ПРОСТРАНСТВА ПЕРВЫХ ТРЕХ ЛАКУНАРНОСТЕЙ ПО ГРУППАМ ИЗОМЕТРИЧЕСКИХ И ГОМОТЕТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

З. Н. ЧЕТЫРКИНА

Поступила в редакцию 25.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. В статье рассматриваются римановы пространства, в касательных пространствах которых работают сразу четыре алгебраические структуры: вещественных чисел D_{m_1} , комплексных чисел C_{m_2} , кватернионов H_{m_3} и октионов O_{m_4} . Размерность пространства $n = m_1 + 2m_2 + 4m_3 + 8m_4$. Представлена картина лакунарных пространств V_n^{4a} , а также дана классификация метрик V_n^{4a} по группам изометрических G_r и гомотетических P_r движений (r – размерность группы). В порядках r этих групп встречаются пропуски – лакуны. Рассмотрены две лакуны и метрики пространств V_n^{4a} первых трех лакунарностей в смысле И. П. Егорова. Установлено, что среди порядков r -групп изометрий G_r и гомотетий P_r в специализированных римановых пространствах V_n^{4a} третьей лакунарности порядок $r_{3\max} - 1$ не осуществим, то есть обнаружена точечная лакунарность.

Ключевые слова: изометрия, гомотетия, группы изометрий и гомотетий, порядок групп, лакуны, пространства k -й лакунарности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Четыркина, З. Н. Специализированные римановы пространства первых трех лакунарностей по группам изометрических и гомотетических движений / З. Н. Четыркина // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 111–118.

SPECIALIZED RIEMANNIAN SPACES OF THE FIRST THREE LACUNARITIES BY GROUPS OF ISOMETRIC AND HOMOTHETIC MOTIONS

ZINAIDA N. CHETYRKINA

Submitted 25.01.2023

Abstract. The article gives a classification of metrics of specialized Riemannian spaces, which carry four algebras at once in metrics D_{m_1} – real numbers, C_{m_2} – complex numbers, H_{m_3} – quaternions, O_{m_4} – octonions. Dimension of spaces $n = m_1 + 2m_2 + 4m_3 + 8m_4$. The article presents a picture of lacunar spaces V_n^{4a} also a classification of metrics by groups of isometric G_r and homothetic P_r movements (r is the dimension of the group) is given. There are gaps in the orders r of these groups, which are called lacunae. Here are two lacunae and metrics of spaces V_n^{4a} of the first three lacunarities in the image of I. P. Egorov. It is established that among the orders of r -groups of isometries G_r and homoteties P_r in specialized Riemann spaces V_n^{4a} of the third lacunarity, there is one order $r_{3\max} - 1$, which is not feasible e. g. a punctate lacunarity was found.

Keywords: isometric, homotetic, groups of isometries and homoteties, order of groups, lacunae, spaces of k -th lacunarity.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Chetyrkina Z. N. (2023) Specialized Riemannian Spaces of the First Three Lacunaries by Groups of Isometric and Homothetic Motions. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 111–118.

Введение

Пензенская школа И. П. Егорова изучала движения в различных геометрических пространствах [1–3]. О движениях в метрических пространствах рассказывается в публикациях [4, 5], а в [6] определен порядок полных групп движений в псевдоевклидовых E_n^{4a} и некоторых римановых пространствах V_n^{4a} второй лакунарности в смысле И. П. Егорова. В статье рассмотрены римановы пространства, в касательных пространствах которых работают сразу четыре алгебраические структуры: вещественных чисел D_{m_1} , комплексных чисел C_{m_2} , кватернионов H_{m_3} и октионов O_{m_4} (m_i – размерность действия соответствующей алгебры). Представлена картина лакунарных пространств V_n^{4a} , дана классификация метрик V_n^{4a} по группам изометрических G_r и гомотетических P_r движений (r – размерность группы).

Методика исследований

В [6] подробно описано, как в метрику псевдоевклидова пространства E_n

$$ds^2 = e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_i(dx^i)^2 + \dots + e_n(dx^n)^2, \quad e_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

вводится действие сразу четырех алгебр: D_{m_1} – вещественной, C_{m_2} – комплексной, H_{m_3} – кватернионов, O_{m_4} – октионов [7]. Размерность пространства $n = m_1 + 2m_2 + 4m_3 + 8m_4$. Тогда метрика (1) принимает вид

$$ds^2 = e_{11}(dx^1)^2 + \dots + e_{1m_1}(dx^{m_1})^2 + e_{21}dz^1 dz^{1*} + \dots + e_{2m_2}dz^{m_2} dz^{m_2*} + e_{31}dk^1 dk^{1*} + \dots + e_{3m_3}dk^{m_3} dk^{m_3*} + e_{41}do^1 do^{1*} + \dots + e_{4m_4}do^{m_4} do^{m_4*}, \quad e_{ai} = \pm 1, \quad \alpha = \overline{1, 4}, \quad i = \overline{1, m_\alpha}, \quad (2)$$

где $*$ – операция сопряжения в соответствующей алгебре.

Для сокращения последующих записей формул и удобства выводов введем следующие обозначения:

$$ds_1^2 = e_{11}(dx^1)^2 + \dots + e_{1m_1}(dx^{m_1})^2; \quad (3)$$

$$ds_2^2 = e_{21}dz^1 dz^{1*} + \dots + e_{2m_2}dz^{m_2} dz^{m_2*}; \quad (4)$$

$$ds_3^2 = e_{31}dk^1 dk^{1*} + \dots + e_{3m_3}dk^{m_3} dk^{m_3*}; \quad (5)$$

$$ds_4^2 = e_{41}do^1 do^{1*} + \dots + e_{4m_4}do^{m_4} do^{m_4*}; \quad (6)$$

$$d\bar{s}^2 = ds_2^2 + ds_3^2 + ds_4^2. \quad (7)$$

Тогда метрика (2) может быть представлена в виде

$$ds^2 = ds_1^2 + d\bar{s}^2. \quad (8)$$

Примечательно, что метрическое пространство (2)–(8) в каждой точке x имеет образ цветка. В нем из точки x исходят:

$dx^1, dx^2, \dots, dx^{m_1}$ – m_1 одномерных тычинок;

$dz^1, dz^2, \dots, dz^{m_2}$ – m_2 двумерных лепестков;

$dk^1, dk^2, \dots, dk^{m_3}$ – m_3 четырехмерных лепестков;

$do^1, do^2, \dots, do^{m_4}$ – m_4 восьмимерных лепестков.

В [6] представлена полная группа изометрий G_r , сохраняющая метрику (2), а значит, и этот цветок в каждой точке x пространства (2). Размерность группы найдена

$$r_{\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 + 1) + m_2 (m_2 + 1) + \frac{7}{2} m_3 (m_3 + 1) + 11 m_4 (m_4 + 1). \quad (9)$$

Оператор гомотетии для (1) $Y = x^1 p_1 + \dots + x^n p_n$, $p_i = \partial / \partial x^i$, $i = \overline{1, n}$, работает и для метрики (2). Он этот цветок переводит в подобный ему цветок в любой точке x одинаково. Поэтому метрика (2) допускает группу гомотетий P_r порядка

$$r_{\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 + 1) + 1 + m_2 (m_2 + 1) + \frac{7}{2} m_3 (m_3 + 1) + 11 m_4 (m_4 + 1). \quad (10)$$

И. П. Егоров всегда интересовался лакунарностью (пропусками) в порядках полных групп движений в римановых пространствах V_n [1–3]. А задача автора данной статьи – в специализированных римановых пространствах V_n^{4a} найти первые две лакуны полных групп G_r и P_r и метрики V_n^{4a} первых трех лакунарностей в смысле И. П. Егорова. Так как в метрике V_n^{4a} вид $d\bar{s}^2$ (7) всегда неизменный, а с лакунарностью V_n^{4a} меняется вид метрики ds_1^2 , то воспользуемся результатами И. П. Егорова, опубликованными в [1–3]. Для сокращения дальнейших записей введем обозначение

$$N_* = m_2 (m_2 + 1) + \frac{7}{2} m_3 (m_3 + 1) + 11 m_4 (m_4 + 1). \quad (11)$$

Тогда формулы (9) и (10) запишутся в виде:

$$r_{\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 + 1) + N_*; \quad (9^*)$$

$$r_{1\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 + 1) + 1 + N_*. \quad (10^*)$$

Первая лакуна – первый интервал запрещенных порядков для полных групп G_r в V_n^{4a} [1] имеет вид

$$r_{2\max} < r < r_{1\max}, \quad (12)$$

где

$$r_{2\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 - 1) + 1 + N_*. \quad (13)$$

Первая лакуна содержит $m_1 - 2$ значения для больших значений m_1 . С учетом [2] вторая лакуна – второй интервал запрещенных порядков для полных групп G_r в V_n^{4a} запишется в виде

$$r_{3\max} < r < r_{2\max} - 1, \quad (14)$$

где

$$r_{3\max} = \frac{1}{2} (m_1 - 1)(m_1 - 2) + 5 + N_*. \quad (15)$$

Это третий максимально допустимый порядок для группы изометрий G_r в V_n^{4a} после второй лакуны. Заметим, что лакунарная картина для групп гомотетий P_r в V_n^{4a} легко восстанавливается по лакунарной картине для групп изометрий, поскольку, если риманово пространство допускает группу гомотетий порядка r , то оно обязательно допускает группу изометрий порядка $r - 1$.

По терминологии И. П. Егорова пространство V_n^{4a} с метрикой (2) будем называть специализированным римановым пространством первой лакунарности в изометрическом и гомотетическом смыслах, так как порядки групп G_r и P_r в (2) предшествуют первым лакунам. После первой лакуны получаем отрезок конденсации возможных значений для r , состоящий из двух значений:

$$r \in [r_{2\max} - 1, r_{2\max}]. \quad (16)$$

Все пространства с группами изометрий и гомотетий порядка (16) назовем, согласно терминологии И. П. Егорова, пространствами второй лакунарности. Вторая лакуна для групп G_r и P_r в V_n^{4a} содержит $m_1 - 7$ запрещенных значений для r . Отрезок конденсации после второй лакуны содержит шесть возможных значений для r

$$r \in [r_{3\max} - 5, r_{3\max}]. \quad (17)$$

Все пространства с группами изометрий и гомотетий порядка (17) будем называть пространствами третьей лакуарности. Задача проводимых исследований – найти метрики V_n^{4a} второй и третьей лакуарностей.

Специализированные римановы пространства V_n^{4a} второй лакуарности

Запишем метрики пространств V_n^{4a} с группой изометрий порядка $r_{2\max} - 1$:

$$ds^2 = b(x^1)[e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2, \forall b(x^1) \neq e^{\alpha x^1} \forall \alpha \neq 0; (x^1)^{-2}; \text{const-}e; \quad (18)$$

$$ds^2 = b(x^1)[e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], \forall b(x^1) \neq e^{\alpha x^1} \forall \alpha \neq 0; (x^1)^{-2}; \text{const-}e; \quad (19)$$

$$ds^2 = e^{2x^1}[e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2, Y = p_1 + x^{m_1+1}p_{m_1+1} + \dots + x^n p_n; \quad (20)$$

$$ds^2 = e^{2x^1}[e_1(dx^1)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], Y = p_1; \quad (21)$$

$$ds^2 = 2dx^1 dx^2 + a(x^1)[e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2; \quad (22)$$

$$ds^2 = 2dx^1 dx^2 + a(x^1)[e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2]. \quad (23)$$

В двух последних случаях $\forall a(x^1) \neq \text{const-}e$ и имеются особые операторы: $X_1 = p_2$, $X_\alpha = e_\alpha x^\alpha p_2 - \int \frac{dx^1}{a(x^1)} p_\alpha$, $\alpha = \overline{3, m_1}$, $Y = 2x^2 p_2 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n$.

Запишем метрику:

$$ds^2 = a(x^1)2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2; \quad (24)$$

$$\forall a(x^1) \neq e^{2x^1}; (x^1)^b; \frac{e^{-2\alpha \arctg x^1}}{1+(x^1)^2}; \frac{e^{\frac{\alpha}{x^1}}}{(x^1)^2}; \frac{(x^1-1)^{\alpha-1}}{(x^1+1)^{\alpha+1}}; \forall \alpha, b \in D, b \neq 0; \alpha(x^1) \neq \text{const-}e. \quad (25)$$

Для (24) при условии (25) особые операторы: $X_1 = p_2$, $X_\alpha = e_\alpha x^\alpha p_2 - \int a(x^1) dx^1 p_\alpha$, $\alpha = \overline{3, m_1}$. В следующих метриках особыми операторами являются $X_1 = p_2$, $X_\alpha = e_\alpha x^\alpha p_2 - x^1 p_\alpha$, $\alpha = \overline{3, m_1}$:

$$ds^2 = a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2; \quad (26)$$

$$ds^2 = a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], \quad (27)$$

где $a(x^1)$ – при условии (25).

При всех значениях функции $a(x^1)$ метрики (24), (26), (27) имеют оператор гомотетии $Y = 2x^2 p_2 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n$. В метриках (20)–(24), (26), (27) работает группа гомотетий порядка $r_{2\max} - 1$. В следующих метриках действуют только группы изометрий порядка $r_{2\max}$, а гомотетий в них нет:

$$ds^2 = e_1 \frac{(dx^1)^2}{(x^1)^2} + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_2}(dx^{m_2})^2 + d\tilde{s}^2, X = x^1 p_1; \quad (28)$$

$$ds^2 = \frac{1}{(x^1)^2}[e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2, X = x^1 p_1 + \dots + x^{m_1} p_{m_1}; \quad (29)$$

$$ds^2 = \frac{1}{(x^1)^2}[e_1(dx^1)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], X = x^1 p_1 + \dots + x^n p_n; \quad (30)$$

$$ds^2 = b(x^1)[e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], \forall b(x^1) \neq e^{\alpha x^1}, \alpha \neq 0; (x^1)^{-2}; \text{const-}e, \quad (31)$$

где $X = \left[b(x^1) \right]^{-\frac{1}{2}} p_1$; $b(x^1) \neq e^{\alpha x^1}$; $\text{const-}e$.

При $b(x^1) = e^{\alpha x^1}$, где a – любое число, отличное от нуля, метрика (31) допускает еще и оператор гомотетии $Y = p_1 + \frac{a}{2}(x^2 p_2 + \dots + x^n p_n)$. Римановы пространства V_n^{4a} с группами изометрий

и гомотетий максимального порядка $r_{2\max}$ имеют метрики (24), (26), (27), если выполняются условия:

$$a(x^1) = e^{2x^1}; (x^1)^b, b \neq 0; \frac{e^{-2\alpha \arctg x^1}}{1+(x^1)^2}; \frac{e^{\frac{\alpha}{x^1}}}{(x^1)^2}; \frac{(x^1-1)^{\alpha-1}}{(x^1+1)^{\alpha+1}}; \forall b, \alpha \in D. \quad (32)$$

Тогда дополнительно к случаю (25) появляется еще один оператор изометрии [5, 8]. В итоге имеется 13 классов пространств V_n^{4a} второй лакуарности.

Специализированные римановы пространства V_n^{4a} третьей лакуарности

Эти специализированные римановы пространства допускают группы изометрий и гомотетий порядка (17). Рассмотрим метрики V_n^{4a} с группами изометрий G_r порядка $r_{3\max} - 5$:

$$ds^2 = k(x^1, x^2) [e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2] + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2; \quad (33)$$

$$ds^2 = k(x^1, x^2) [e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2; \quad (34)$$

$$ds^2 = k(x^1, x^2) [e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], \quad (35)$$

где $\forall k(x^1, x^2) \neq k_1(x^1)k_2(x^2)$; const-e .

Следует отметить, что если $k(x^1, x^2) = e^{\alpha x^1 + \beta x^2}$, $(\alpha, \beta) \neq (0, 0)$, то метрики (33)–(35) допускают группы изометрий G_r и гомотетий P_r порядка $r_{3\max} - 4$. Сами метрики (33)–(35) имеют операторы гомотетии и изометрии соответственно вида:

$$Y_1 = p_1 + p_2 + \frac{\alpha + \beta}{2}(x^3 p_3 + \dots + x^n p^n), X = \beta p_1 - \alpha p_2;$$

$$Y_2 = p_1 + p_2 + \frac{\alpha + \beta}{2}(x^{m_1+1} p_{m_1+1} + \dots + x^n p^n), X = \beta p_1 - \alpha p_2;$$

$$Y_3 = p_1 + p_2, X = \beta p_1 - \alpha p_2.$$

Для дальнейшего упрощения изложения воспользуемся сначала метриками всех пространств V_n^{4a} второй лакуарности, записав их как $ds_{\parallel}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1})$. В данной статье рассмотрены два сорта метрик: $ds_{\parallel}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1}) = ds_{\parallel 1}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1}) + ds_{\parallel 2}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1})$. Метрика сорта 1 (формулы (18), (20), (22), (24), (26), (28), (29), (31)) имеет вид

$$ds_{\parallel 1}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1}) = ds_{V_{m_1}}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1}) + d\tilde{s}^2.$$

В метрике первого сорта $ds_{\parallel 1}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1})$ имеются два слагаемых: первое – метрика риманова пространства V_{m_1} второй лакуарности, второе – $d\tilde{s}^2$. В метрике второго сорта $ds_{\parallel 2}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1})$ слагаемое $d\tilde{s}^2$ не стоит самостоятельно (формулы (19), (21), (23), (27), (30)). Тогда 26 типов полученных пространств V_n^{4a} с группами изометрий и гомотетий порядков $r_{3\max} - 5$ и $r_{3\max} - 4$ имеют метрики:

$$ds^2 = c(x^{m_1}) [e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + ds_{V_{m_1-1}}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1-1})] + d\tilde{s}^2; \quad (36)$$

$$ds^2 = c(x^{m_1}) [e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + ds_{V_{m_1-1}}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1-1}) + d\tilde{s}^2]; \quad (37)$$

$$ds^2 = c(x^{m_1}) [e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + ds_{\parallel 2}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1-1})]; \quad \forall c(x^{m_1}) \neq \text{const}. \quad (38)$$

Если $c(x^1) = e^{\alpha x^{m_1}}$, $\alpha \neq 0$, то у выписанных метрик возникают соответственно следующие операторы гомотетии: $Y_4 = p_{m_1} + \frac{\alpha}{2}(x^{m_1+1} p_{m_1+1} + \dots + x^n p^n)$, $Y_5 = p_{m_1}$, $Y_6 = p_{m_1}$. А метрики вида

$$ds^2 = c(x^{m_1})e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + ds_{\parallel}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1-1}) \quad (39)$$

при $\forall c(x^{m_1}) \neq \text{const}-e$ имеют оператор изометрии $X = \frac{P_{m_1}}{\sqrt{c(x^{m_1})}}$, а при $c(x^{m_1}) = e^{\beta x^{m_1}}$, $\beta \neq 0$, и оператор гомотетии, но лишь иногда. Формула (39) дает метрики V_n^{4a} с группами G_r и P_r порядков $r_{3\max} - 4$, $r_{3\max} - 3$ в тех случаях, если $ds_{\parallel}^2(dx^1, \dots, dx^{m_1-1})$ видов (18)–(24), (26)–(31).

Следующие метрики допускают группы изометрий и гомотетий порядка $r_{3\max} - 4$:

$$ds^2 = e^{2x^1} [e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2] + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2, X = p_2, Y = p_1 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n; \quad (40)$$

$$ds^2 = e^{2x^1} [e_1(dx^1)^2 + c(x^2)(dx^2)^2] + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2, X = [c(x^2)]^{\frac{1}{2}} p_2, \quad (41)$$

$$Y = p_1 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n;$$

$$ds^2 = e^{x^1 + x^2} [e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2] + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2, X = p_1 - p_2, \quad (42)$$

$$Y = p_1 + p_2 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n.$$

Запишем метрику

$$ds^2 = b(x^1)e_1(dx^1)^2 + c(x^2)e_2(dx^2)^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2, \quad (43)$$

где $\forall b(x^1); c(x^2) \neq \text{const}-e$.

В метрике (43) дополнительными операторами являются $X_1 = \frac{P_1}{[b(x^1)]^{\frac{1}{2}}}$, $X_2 = \frac{P_2}{[c(x^2)]^{\frac{1}{2}}}$, кото-

рые допускают группы G_r и иногда P_r порядка $r_{3\max} - 3$ (P_r возникает, когда $b(x^1) = e^{\alpha x^1}$, $c(x^2) \neq e^{\beta x^2}$, $(\alpha, \beta) \neq (0, 0)$).

Согласно формулам (22), (23), можно записать такие метрики:

$$ds^2 = 2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + a(x^1)[e_4(dx^4)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2; \quad (44)$$

$$ds^2 = 2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + a(x^1)[e_4(dx^4)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2], \quad (45)$$

где $\forall a(x^1) \neq \text{const}-e$.

Дополнительные операторы для (44), (45) – $Y = 2x^2 p_2 + x^3 p_3 + \dots + x^n p_n$, $X_1 = p_2$, $X_2 = p_3$, $X_3 = e_3 x^3 p_2 - x^1 p_3$, $X_\alpha = e_\alpha x^\alpha p_2 - \int \frac{dx^1}{a(x^1)} p_\alpha$, $\alpha = \overline{4, m_1}$. Допускающие группы G_r и P_r здесь порядка $r_{3\max} - 3$.

У метрики

$$ds^2 = a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2] + e_4(dx^4)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2 \quad (46)$$

дополнительными особыми операторами будут $X_\alpha = e_\alpha x^\alpha p_2 - \int a(x^1) dx^1 p_\alpha$, $\alpha = \overline{4, m_1}$ и для случаев (25), (32) получим для (46) группы изометрий и гомотетий порядков $r_{3\max} - 3$, $r_{3\max} - 2$.

Формулы (26) и (27) дают такие метрики:

$$ds^2 = a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1-1}(dx^{m_1-1})^2] + d\tilde{s}^2 + e_{m_1}(dx^{m_1})^2; \quad (47)$$

$$ds^2 = a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_3(dx^3)^2 + \dots + e_{m_1-1}(dx^{m_1-1})^2 + d\tilde{s}^2] + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 \quad (48)$$

с дополнительными операторами $X_1 = p_{m_1}$, $X_2 = e_{m_1} x^{m_1} p_2 - \int a(x^1) dx^1 p_{m_1}$. И метрики (47), (48) для случаев (25) и (32) дают группы G_r и P_r порядков $r_{3\max} - 3$ и $r_{3\max} - 2$ соответственно.

Далее получим нужные метрики, комбинируя метрику $V_{n-4}^{4a} ds_v^2 = e_5(dx^5)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2$ с метрикой V_4 , когда в ней имеются два слагаемых видов $2dx^1dx^2$, $2dx^3dx^4$ или подобные им.

Для метрики

$$ds^2 = a(x^1)2dx^1dx^2 + b(x^3)2dx^3dx^4 + e_5(dx^5)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2 \quad (49)$$

дополнительные операторы $X_{\alpha 12} = e_\alpha x^\alpha p_2 - \int a(x^1)dx^1 p_\alpha$, $X_{\alpha 34} = e_\alpha x^\alpha p_4 - \int b(x^3)dx^3 p_\alpha$, $\alpha = \overline{5, m_1}$, $X_3 = \int b(x^3)dx^3 p_2 - \int a(x^1)dx^1 p_4$, функции $a(x^1)$, $b(x^3)$ видов (25), (32), а группы изометрий G_r и гомотетий P_r – порядков $r_{3\max} - 5$, $r_{3\max} - 4$, $r_{3\max} - 3$.

У метрики

$$ds^2 = 2dx^1dx^2 + 2dx^3dx^4 + e^{2x^4}(dx^2)^2 + e_5(dx^5)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2 \quad (50)$$

дополнительными операторами являются $X_1 = p_1$, $X_2 = p_2$, $X_3 = p_3$, $X_4 = p_4 - x^2 p_2 + x^1 p_1$, $X_5 = x^2 p_3 - x^4 p_1$, $X_{\alpha 12} = e_\alpha x^\alpha p_1 - x^2 p_\alpha$, $X_{\alpha 34} = e_\alpha x^\alpha p_3 - x^4 p_\alpha$, $\alpha = \overline{5, m_1}$, $Y = p_4 + 2x^1 p_1 + 2x^3 p_3 + x^5 p_5 + \dots + x^n p_n$, а группы изометрий и гомотетий – порядка $r_{3\max} - 3$.

Результаты исследований

По результатам исследований прослеживается следующая тенденция. Если взять метрику Егоровой [9]

$$ds^2 = 2dx^1dx^4 + 2dx^2dx^3 + (x^4)^2(dx^2)^2,$$

допускающую полные группы изометрий \widehat{G}_8 и гомотетий P_9 , то получим метрику

$$ds^2 = 2dx^1dx^4 + 2dx^2dx^3 + (x^4)^2(dx^2)^2 + e_5(dx^5)^2 + \dots + e_{m_1}(dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2, \quad (51)$$

которая допускает группы изометрий и гомотетий максимального порядка – $r_{3\max}$.

Дополнительные операторы для метрики (51):

– изометрии: $X_{\alpha 14} = e_\alpha x^\alpha p_1 - x^4 p_\alpha$, $X_{\alpha 23} = e_\alpha x^\alpha p_3 - x^3 p_\alpha$, $\alpha = \overline{5, m_1}$;

– гомотетии: $Y = 3x^1 p_1 + x^2 p_2 + 3x^3 p_3 + x^4 p_4 + 2(x^5 p_5 + \dots + x^n p_n)$.

Необходимо отметить, что порядок $r_{3\max} - 1$ для групп изометрий и гомотетий в специализированных римановых пространствах оказался не осуществим. Следовательно, существует точечная лагуна $r = r_{3\max} - 1$ в порядках полных групп изометрий G_r и гомотетий P_r в специализированных римановых пространствах V_{n-4}^{4a} третьей лагунарности.

Вывод

При рассмотрении картины метрик всех пространств первых трех лагунарностей по группам движений установлено, что в силу действия комплексной алгебры для метрики ds в них обнаружена точечная лагуна в порядках групп движений в пространствах третьей (и только) лагунарности.

Список литературы

1. Егоров, И. П. Римановы пространства второй лагунарности / И. П. Егоров // Доклады Академии наук СССР. 1956. Т. 111, № 2. С. 276–279.
2. Егоров, И. П. О пространствах первых трех лагунарностей в гомотетическом смысле / И. П. Егоров // Доклады Академии наук СССР. 1963. Т. 150, № 4. С. 730–732.
3. Егоров, И. П. Автоморфизмы в обобщенных пространствах / И. П. Егоров // Итоги науки и техники. Серия: Проблемы геометрии. 1978. № 10. С. 147–191.
4. Четыркина, З. Н. Гомотетии и движения в двумерных финслеровых пространствах / З. Н. Четыркина // Волжский математический сборник. 1966. № 5. С. 366–373.
5. Четыркина, З. Н. Пространства Рандерса первой лагунарности и максимально подвижные финслеровы пространства / З. Н. Четыркина // Известия высших учебных заведений. Математика. 1984. № 11. С. 53–56.

6. Четыркина, З. Н. О максимальных порядках групп изометрических и гомотетических движений в метрических пространствах, допускающих в своей метрике вещественную, комплексную и гиперкомплексные алгебраические структуры / З. Н. Четыркина // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. 2021. Т. 1, № 57. С. 27–34.
7. Розенфельд, Б. А. Геометрия групп Ли / Б. А. Розенфельд, М. П. Замаховский. М.: Изд-во МЦНМО, 2003.
8. Лаптев, Б. Л. Производная Ли для объектов, являющихся функциями точки и направления / Б. Л. Лаптев // Известия физико-математического общества. Казань. 1938. № 10. С. 3–38.
9. Егорова, Л. И. Об однородных гомотетических пространствах / Л. И. Егорова // Материалы 5-й науч.-техн. конф. Секция математики. ПВАИУ. 1970. С. 29–31.

References

1. Egorov I. P. (1956) Rimanov Spaces of the Second Lacunarity. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 111 (2), 276–279 (in Russian).
2. Egorov I. P. (1963) On the Spaces of the First Three Lacunaries in the Homothetic Sense. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 150 (4), 730–732 (in Russian).
3. Egorov I. P. (1978) Automorphisms in Generalized Spaces. *Results of Science and Technology. Series: Problems of Geometry*. (10), 147–191 (in Russian).
4. Chetyrkina Z. N. (1966) Homotheties and Motions in Two-Dimensional Finsler Spaces. *Volga Mathematical Collection*. (5), 366–373 (in Russian).
5. Chetyrkina Z. N. (1984) Randers Spaces of First Lacunarity and Maximally Mobile Finsler Spaces. *News of Higher Educational Institutions. Mathematics*. (11), 53–56 (in Russian).
6. Chetyrkina Z. N. (2021) On the Maximum Orders of Groups That are Isometric and Homothetic Moves in Metric Spaces That Admit Real, Complex, and Hypercomplex Algebraic Structures in their Metric. *Bulletin of Mogilev State University named after A. A. Kuleshov*. 1 (57), 27–34 (in Russian).
7. Rosenfeld B. A., Zamakhovsky M. P. (2003) *Geometry of Lie Groups*. Moscow, MTsNMO Publ. (in Russian).
8. Laptev B. L. (1938) Lie Derivative for Objects That Are Functions of a Point and a Direction. *Proceedings of the Physical and Mathematical Society. Kazan*. (10), 3–38 (in Russian).
9. Egorova L. I. (1970) On Homogeneous Homothetic Spaces. *Materials of the 5th Scientific and Technical Conference: Section of Mathematics. PVAIU*. 29–31 (in Russian).

Сведения об авторе

Четыркина З. Н., к. ф.-м. н., доцент

Адрес для корреспонденции

220036, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Кунцевщина, 36–580
Тел.: +375 29 275-24-64
E-mail: guseinaas@yandex.ru
Четыркина Зинаида Никандровна

Information about the author

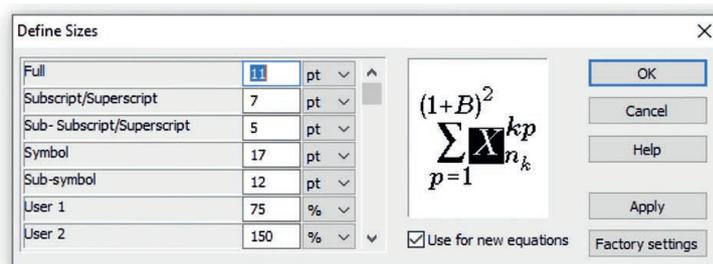
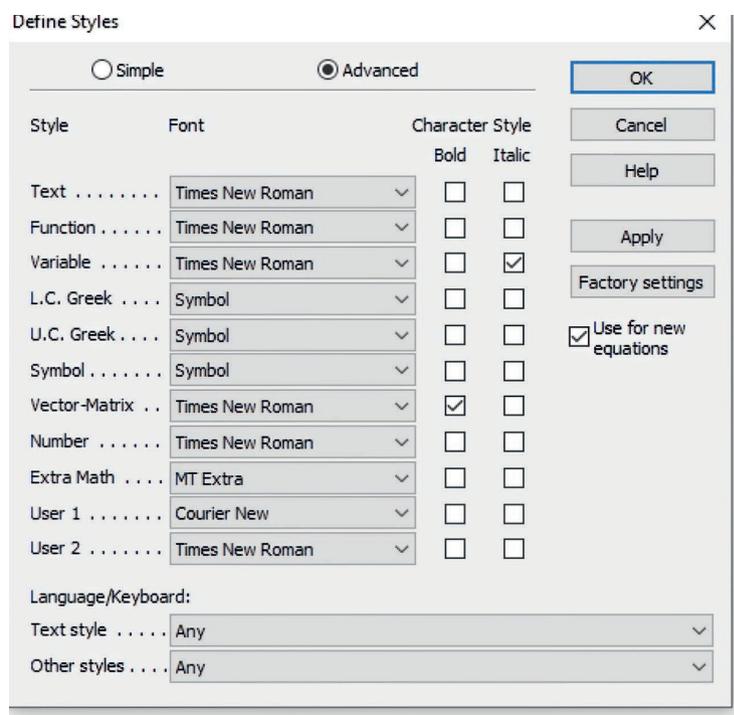
Chetyrkina Z. N., Cand. of Sci., Associate Professor

Address for correspondence

220036, Republic of Belarus,
Minsk, Kunsevchina St., 36–580
Tel.: +375 29 275-24-64
E-mail: guseinaas@yandex.ru
Chetyrkina Zinaida Nikandrovna

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ФОРМУЛ И СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Настройки для набора формул в редакторе MathType



Примеры оформления разделов «Список литературы» и References

1. Теория кодирования / Т. Касами [и др.], пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006. 571 с.
2. Лосев, В. В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / В. В. Лосев, Е. Б. Бродская, В. И. Коржик. М.: Радио и связь, 1988.
3. Скойбеда, А. Т. Ременные передачи / А. Т. Скойбеда, А. Н. Никончук. Минск: Наука і тэхніка, 1995.
4. Electromagnetic Radiation Shielding Composite Coatings Based on Powdered Alumina and Iron Oxides / D. I. Penialosa Ovalies [et al.] // Doklady BGUIR. 2021. Vol. 19, No 3. P. 104–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-104-109>.
5. Blackman, S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems / S. Blackman, R. Popoli // Artech House. Boston – London, 1999.
6. Водозаборная скважина: пат. Респ. Беларусь 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. Опубл. 30.12.2021.
7. Human Development Index [Electronic Resource] // United Nations Development Programme. Mode of access: <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>. Date of access: 25.12.2022.

При оформлении раздела **References** следует указывать ВСЕХ авторов в цитируемой публикации, например:

1. Kasami T., Tokura N., Iwadari E., Inagaki Ya. (2006) *Coding Theory. Transl. from Japan by A. V. Kuznetsov*. Moscow, Mir Publ. 571 (in Russian).
2. Losev V. V., Brodskaya E. B., Korzhik V. I. (1988) *Search and Decoding of Complex Discrete Signals*. Moscow, Radio and Communication Publ. (in Russian).