
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш,

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),

А.Н. Осипов (зам. главного редактора),

Т.В. Борботько (ответственный секретарь),

М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,

В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,

В.В. Муравьев, Ю.В. Писецкий, А.С. Сигов, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,

И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,

В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,

В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Курнев,

В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,

В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль

В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375 17 293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Квасов Н.Т., Ярмолик В.И., Павловская Е.Р. Континуальный подход в теории взаимодействия заряженных частиц с твердым телом.....	5
Лобанок М.В., Прокопьев С.Л., Завацкий С.А., Бондаренко В.П., Гайдук П.И. Формирование SiC методом вакуумной карбидизации на пористом кремнии.....	14
Архипенков Д.В. Алгоритм распознавания вида модуляции и измерения параметров сигналов радиолокационных станций с линейно-частотной модуляцией	22

Михнёнок Е.И., Хижняк А.В. Особенности применения алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, в сканирующей оптико-электронной системе наблюдения.....	30
Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового оптического волокна при помощи кремниевого фотоумножителя	37
Железняк В.К., Адамовский Е.Р., Филиппович А.Г. Имитационное моделирование метода оценки защищенности канала утечки информации по огибающей речевого сигнала	45
Ярмолик В.Н., Шевченко Н.А., Петровская В.В. Мера отличия для управляемых вероятностных тестов	52
Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Оценка эффективности алгоритмов сегментации АСМ-изображений	61
Чураков А.В., Камлач П.В., Шульгина И.В. Модель воздействия сфокусированного ультразвука на биологические ткани.....	70
Vishnyakou U.A., Chuyue Yu. Modeling IoT Smart Home Network	78
Лабоха А.К., Шамына А.Ю., Ардяко А.Д. Совершенствование методики классификации уровня пожарной опасности в лесах с использованием метеорологических и аэрокосмических данных	85
Саванович С.Э., Борботько Т.В. Широкодиапазонная конструкция экрана электромагнитного излучения на основе псевдоовальных рассеивающих элементов для защиты информации от утечки по электромагнитному каналу	94

Ответственный секретарь редакции Т.В. Мироненко
Корректурa и верстка Л.В. Кондакова

Подписано в печать 23.09.2022. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 100 экз. Заказ 167.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2022

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

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 included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Chief Editor

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Editor office address: P. Brovka St., 6, off. 326,
Minsk, 220013, Republic of Belarus

Editor office phone number: +375 17 293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Kvasov N.T., Yarmolik V.I., Pavlovskaya E.R. Continuous Approach in the Theory of Interaction of Charged Particles with Solids	5
Lobanok M.V., Prakopyeu S.L., Zavatski S.A., Bondarenko V.P., Gaiduk P.I. Formation of SiC by Vacuum Carbide on Porous Silicon.....	14
Arkhipenkov D.V. Algorithm for Recognizing the Type of Modulation and Measuring Parameters of Radar Signals with Chirp	22
Mikhniouk E.I., Khizniak A.V. Features of the Application of the Detection Algorithm Based on the Background Subtraction Method in the Scanning Optoelectronic Surveillance System.....	30
Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaia T.A. Detection of the Information Leakage Channel from Multimode Optical Fiber Using a Silicone Photomultiplier	37
Zheleznyak V.K., Adamovskiy Y.R., Filipovich A.G. Simulation of the Security Assessment Information Leakage Channel Method Based on the Speech Signal Envelope	45
Yarmolik V.N., Shauchenka M.A., Petrovskaya V.V. Distance Measure for Controlled Random Tests	52
Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. Efficiency Evaluation of Segmentation Algorithms for AFM Images.....	61

Churakov A.V., Kamlach P.V., Shulgina I.V. Model of the Impact of Focused Ultrasound on Biological Tissues.....	70
Vishnyakou U.A., Chuyue Yu. Modeling IoT Smart Home Network	78
Labokha A.K., Shamyna A.Yu., Ardyako A.D. Improvement of the Classification Method for the Fire Hazard Level in Forests Using Meteorological and Aerospace Data	85
Savanovich S.E., Borbotko T.V. Wide-Band Electromagnetic Radiation Shielding Construction Based on Pseudooval Scattering Elements for Information Protection Against Leakage Via Electromagnetic Channel.....	94



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-5-13>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 5.38.971:538.951

КОНТИНУАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

Н.Т. КВАСОВ, В.И. ЯРМОЛИК, Е.Р. ПАВЛОВСКАЯ

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

Поступила в редакцию 20 апреля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В настоящей работе основные радиационные процессы впервые рассмотрены в рамках континуальной физики, когда движение заряженных частиц происходит в сплошной среде с сопротивлением. При этом вводятся новые характеристики взаимодействия ионов с веществом. В предлагаемом формализме также используются некоторые результаты современной корпускулярной теории. Это позволило использовать физически ясное пространственно-временное описание рассматриваемых процессов и явлений. С высокой степенью точности произведены оценки пробегов ионов в различных материалах, построены профили потерь энергии, рассчитаны длины и времена свободного пробега заряженных частиц в веществе, предложен формализм анализа радиационного изменения физических свойств твердых тел. Впервые детально исследована физическая природа главной характеристики радиационной стойкости материалов – пороговой энергии смещения и получена формула для ее определения.

Ключевые слова: пробег ионов в веществе, радиационный дефект, радиационная модификация твердых тел, пороговая энергия смещения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Квасов Н.Т., Ярмолик В.И., Павловская Е.Р. Континуальный подход в теории взаимодействия заряженных частиц с твердым телом. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 5-13.

CONTINUOUS APPROACH IN THE THEORY OF INTERACTION OF CHARGED PARTICLES WITH SOLIDS

NIKOLAY T. KVASOV, VALERI I. YARMOLIK, EVGENIA R. PAVLOVSKAYA

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

Submitted 20 April 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. In this paper, the main radiative processes, for the first time, are considered within the framework of continuum physics, where the motion of charged particles occurs in a continuous resisting medium.

Within the analysis, new characteristics of the interaction of ions with matter are introduced. The proposed formalism also uses some results of modern corpuscular theory. It allows giving a physically clear space-time description of the processes and phenomena analyzed in this paper. Further in this paper, the authors have estimated, with a high degree of accuracy, the ranges of ions in various materials; constructed their energy loss profiles; determined the mean free path and mean free time of the charged particles in matter, and proposed the formalism for analyzing the radiative change in the physical properties of solids. For the first time, the physical nature of the main characteristic of the radiation resistance of materials, i.e., the threshold displacement energy, has been studied in detail, and the formula for its calculation has been derived by the authors.

Keywords: range of ions in matter, radiation defect, radiation modification of solids, threshold displacement energy.

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

For citation. Kvasov N.T., Yarmolik V.I., Pavlovskaya E.R. Continuous Approach in the Theory of Interaction of Charged Particles with Solids. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 5-13.

Введение

Физические процессы, сопровождающие внедрение заряженных частиц в материалы, являются предметом интенсивных исследований в научных центрах как Республики Беларусь, так и стран ближнего и дальнего зарубежья на протяжении более чем семидесяти лет (Г. Бете, Г.И. Блох, Ф.Ф. Комаров, О.Б. Фирсов, J. Lindhard, M. Scharff, H.E. Schiott и ряд других крупных ученых). Однако созданные к настоящему времени физико-математические конструкции, претендующие на статус теорий в радиационной физике, не обеспечивают глубокого понимания как самих процессов и явлений, так и не дают физически ясной интерпретации огромного объема экспериментальных данных. Нет соответствующего теоретического аппарата для разработки радиационных технологий в некоторых отраслях промышленности. Это касается также и широко применяемых сегодня методов компьютерного моделирования. Наиболее остро данные проблемы стали проявляться в настоящее время, когда стремительное развитие нанотехнологий настоятельно потребовало, в частности, детального рассмотрения поведения даже отдельных ионов, внедряемых в материалы, и их влияния на физические свойства наноразмерных областей.

С учетом результатов анализа причин такой ситуации в теоретической радиационной физике в настоящей работе предпринята попытка рассмотреть некоторые радиационные процессы с позиций континуальной физики [1] с привлечением базовых наработок существующей теории, основанной на корпускулярном подходе. При этом в основу формализма описания предлагается положить «принцип простоты», играющий, как известно, фундаментальную роль в научных исследованиях. «Критерий простоты в науке – это единственный способ выбрать правильный теоретический подход из множества различных, но вполне допустимых вариантов описания того или иного физического процесса или явления» [2].

О пространственном распределении энергии, теряемой ионом при движении

В рамках рассматриваемого подхода оказывается возможным простое решение задачи определения профиля потерь энергии иона в веществе, что позволяет оценить распределение дефектов вдоль траектории его движения и, как следствие, исследовать изменение физических свойств материала.

Элементарный импульс $d\vec{p}$, передаваемый решетке ионом массы m_1 на участке $d\vec{x}$, может быть определен как $m_1(\vec{\nabla}\vec{v})d\vec{x}$. При этом величина силы сопротивления движению иона со стороны среды $\vec{F}(t)$ будет равна $m_1\xi\vec{v}(t)$ (где $\xi = (\vec{\nabla}\vec{v})$). Параметр ξ отражает «расходимость» скорости \vec{v} иона на элементарном участке пути, характеризуя степень этого сопротивления. Прямое непосредственное вычисление ξ возможно в рамках известного формализма, позволяющего определить изменение импульса налетающего иона при его рассеянии

на силовом центре – атоме вещества. Однако в этом случае появляются значительные погрешности, вытекающие из самих принципов данного формализма. Общая и наиболее достоверная оценка ξ может быть получена из закона сохранения энергии для иона, движущегося в материале.

Потери энергии иона dW за время dt можно представить как

$$dW = F(t)v(t)dt, \quad (1)$$

а закон сохранения энергии запишется в следующем виде:

$$E_0 - \frac{m_1 v^2(t)}{2} = W(t), \quad (2)$$

где E_0 – энергия налетающего иона.

Тогда из (1) и (2) следуют формулы для энергии $W(t)$, теряемой ионом при движении, и закон самого движения $x(t)$:

$$W(t) = m_1 \xi \int_0^t v^2(t') dt', \quad (3)$$

$$x(t) = v_0 t - \mu_0 \frac{t^2}{2},$$

где $\xi = \frac{E_0}{m_1 \int_0^\tau v^2(t) dt}$; $\xi \sim \left(\frac{N(x) \cdot S_r(x)}{m_1 \cdot L_m} \right)^{1/2}$; $\mu_0(x) = \frac{N(x) \cdot S_r(x)}{m_1}$; $v_0 = \left(\frac{2E_0}{m_1} \right)$; $t = 0 \div \tau$, $\tau \sim \frac{v_0}{\mu_0}$;

$S_r(x)$ – сечение торможения, определяемое ядерной S_n и электронной S_e компонентами; τ – время движения иона в среде; $\mu_0(x)$ – ускорение движения; $N(x)$ – концентрация атомов матрицы; L_m – пробег иона в материале. Зависимость $N(x)$ и $S_r(x)$ от координаты x имеет место в случае неоднородности материала (различная плотность и (или) элементный состав). Точное значение времени движения иона в материале τ можно получить из уравнения

$$y(\tau) = \frac{v_0}{2} x(\tau), \text{ где } y(\tau) = \int_0^\tau v^2(t) dt.$$

Расчет пробегов ионов в материалах

Из закона движения ионов в твердом теле $x(t)$ непосредственно следует формула для величины пробега L_m :

$$L_m = v_0 \tau - \mu_0 \frac{\tau^2}{2}, \quad (4)$$

$$L_m \sim v_0^2 / 2\mu_0.$$

В данной работе аналитические выражения для S_n и S_e взяты из работ [3–5].

$$S_n = \frac{\pi e^2 a_1 z_1 z_2 m_1}{2,7(m_1 + m_2)(z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{1/2} 4\pi \epsilon_0}, \quad S_e = \frac{8\pi e^2 a_1 z_1 z_2 \eta v_0}{4\pi \epsilon_0 (z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{3/2} v_1},$$

где a_1, v_1 – радиус и скорость электрона на первой бордовской орбите; z_1, z_2 – порядковые номера налетающего иона и атома матрицы; m_2 – масса атома матрицы; ϵ_0 – электрическая постоянная; e – заряд электрона; $\eta = z_1^{1/6}$.

Эти формулы, полученные в середине прошлого столетия, позволяют тем не менее обеспечивать достаточно высокий уровень соответствующих теоретических исследований в определенном интервале скоростей v_0 ионов. Однако очевидно, что аналитические выражения для S_n и S_e ,

учитывающие различные законы их зависимости от скорости v_0 , а также отражающие зарядовые осцилляции, перезарядку иона при его движении в веществе, анизотропию материала, его возможный сложный состав и другие факторы, позволят существенно повысить точность выполняемых расчетов.

Для случая ионной имплантации можно ввести также величины L_p и ΔL_p как аналоги проективного пробега ионов R_p и страгглинга ΔR_p (страгглинг – среднеквадратичное отклонение пробегов ионов от среднего значения величины пробега (момент второго порядка в распределении Пирсона)), («У каждого иона своя судьба», Ф.Ф. Комаров).

$$L_p = L_m \left(1 + \frac{m_2}{3m_1} \right)^{-1} \quad [6], \quad \Delta L_p = L_m - L_p. \quad (5)$$

Согласно полученным формулам оценивались значения величин L_m , L_p и ΔL_p для ряда ионов (В, С, N, Р) в различных материалах (Si, Fe, W, Ni). Для расчетов использовали пять выборочных значений E_0 в интервале $10^3 \div 10^6$ эВ. Проведено сравнение полученных значений с результатами эксперимента, а также с данными таблиц параметров пространственного распределения ионноимплантированных примесей [7] и показано их удовлетворительное соответствие в пределах $\pm 7\%$.

Длину свободного пробега ℓ иона в материале можно определить, сравнивая величину $m_1 \xi v_0 \cdot \ell$ с выражением для энергии ε_1 , передаваемой решетке при единичном столкновении. В рамках конкретной модели процесса взаимодействия иона с атомами вещества (см., например, [5]) величина ε_1 равна $2(m_1 m_2 E_0 E_d)^{1/2} / (m_1 + m_2)$. Тогда минимальное значение ℓ можно рассчитать по следующей формуле:

$$\ell_{\min} = \frac{2(m_1 m_2 E_0 E_d)^{1/2}}{(m_1 + m_2) m_1 \xi v_0}, \quad (6)$$

где E_d – пороговая энергия смещения.

Очевидно, что время свободного пробега имеет порядок ℓ/v_0 . При этом число столкновений n на участке $0 \div L_m$ определяется как $E_0 / (m_1 \xi v_0 \ell)$, а $L_m \sim n \cdot \ell$.

Приведенные выше рассуждения не являются в строгом смысле теорией торможения заряженных частиц в твердом теле, однако они показывают, что достоверные результаты расчетов ряда важнейших радиационных процессов могут быть получены более простым и физически ясным способом, используя традиционный пространственно-временной формализм.

О пороговой энергии смещения в твердом теле

Пороговая энергия смещения E_d является основной характеристикой радиационной стойкости материалов. Аналитическое выражение для нее удалось получить в результате детального анализа динамики подпорогового движения междоузельного атома (i), когда он, не покидая зоны неустойчивости R_0 (зона неустойчивости – это область материала, в пределах которой выбитый из узла решетки атом, достигнув ее границы радиуса R_0 , еще может вернуться в свою вакансию. R_0 соответствует пороговой энергии смещения E_d), безактивационно аннигилирует с собственной вакансией (v). Этот новый тип радиационных дефектов (динамических) был открыт в исследованиях В. Л. Инденбома, В. М. Кошкина, Ю. П. Забродского и В. М. Эккермана (см., например, [8]).

Закон сохранения энергии для динамической пары ($i - v$) можно записать в следующем виде:

$$E_a - \frac{mv_i^2(t)}{2} = A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r}) + A_3 + u_{\text{св}}, \quad (7)$$

где E_a – энергия, полученная атомом решетки ($E_a \leq E_d$); $v_i(t)$ – скорость движения междоузельного атома; $A_1(\vec{r})$, $A_2(\vec{r})$ – работы сил электростатического и упругого взаимодействий (i) и (v) соответственно (здесь \vec{r} зависит от времени); A_3 – потери энергии на упругие столкновения в области зоны неустойчивости; $u_{св}$ – энергия связи атома в решетке. Используя явные выражения для всех слагаемых в правой части (7), получено аналитическое выражение для E_d :

$$E_d = \gamma(u_1 + u_2 + u_3), \quad (8)$$

где $\gamma = (1 - \sigma_d NR)^{-1}$; $u_1 = \frac{\mu e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{R}{R_0 \cdot \ell_0} \right)$; $u_2 = G\Delta V_i \Delta V_v \left(\frac{R_0^3 - \ell_0^3}{R_0^3 \cdot \ell_0^3} \right)$; $u_3 \equiv u_{св}$; $R = R_0 - \ell_0$;

$\sigma_d = 0,15\pi R_a^2$ [9]; R_a – радиус атома; $\mu = \frac{\nu}{\epsilon_s}$ – для металлов; $\mu = \frac{\nu^2}{\epsilon}$ – для полупроводников

и диэлектриков; $\ell_0 = 1,4a_0$; a_0 – постоянная решетки; $R_0 = \left[\frac{\beta_0}{2} + \left(\frac{\beta_0^2}{4} + \eta_0 \right)^{1/2} \right]^{1/2}$; $\beta_0 = \frac{\mu e^2 a_0}{8\pi\epsilon_0 u_m}$;

$\eta_0 = \frac{3G\Delta V_i \Delta V_v a_0}{2u_m}$; $\epsilon_s = 1 + \frac{3n_0 e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 E_F} \left(\frac{4\pi}{9N} \right)^{2/3}$; n_0 – концентрация электронов; E_F – энергия Ферми;

ϵ – диэлектрическая проницаемость материала; ΔV_i , ΔV_v – объемы дилатации междоузельного атома и вакансии (объем дилатации – разность объемов области деформированной дефектом и объема атома), соответственно; u_m – энергия миграции междоузельного атома; ν – валентность; G – модуль сдвига (коэффициент пропорциональности между сдвиговыми упругими напряжениями и относительной угловой деформацией). Как видно из вышеизложенного, формула для E_d «впитала» в себя практически всю физику твердого тела. В табл. 1 приведены расчетные данные по определению E_d для некоторых материалов.

Таблица 1. Расчетные значения E_d для некоторых поликристаллических материалов

Table 1. Reference numbers for E_d in relation to several polycrystalline materials

Материал Material	Al	Ti	α -Fe	Co	Ni	Cu	Mo	W	Au	Si
E_d , эВ										
Расчет по формуле (8) Formula calculation (8)	17,0	24,0	24,7	25,0	27,0	20,3	40,3	57,3	36,4	14,3
Эксперимент, [4], [10] Experiment, [4], [10]	16,0 32,0 15,0	19,2 29,0 21,8	17,0 24,0 22,2	22,0 25,4	23,0 24,0	19,0 22,0 18,9	34,0 37,0 45,4	50,5 40,0 55,1	40,0 33,9	13,0 21,6
Американский стандарт American standard	25,0	30,0	40,0	40,0	30,0	30,0	60,0	90,0	60,0	–

В стандарте (Standard Practice for Neutron Radiation Damage Simulation by Charged – Particle Irradiation. West Conchohocren: ASTM International. 1996. ASTM E 52196 DOI:10.1520/E0521–96RO9E01.) приведены максимально возможные значения E_d , но нет сведений о структуре материалов (моно-, поли-).

О радиационном изменении физических свойств материалов

Взяв за основу потенциальную энергию парного взаимодействия атомов в твердом теле $u(\vec{r})$, можно получить формулы для качественной оценки упругих и теплофизических характеристик материалов (модуль упругости Юнга E , коэффициент температурного расширения α_T , температура плавления T_m и др.).

Первую формулу для $u(\vec{r})$ в ионных кристаллах в 1907 году предложил Г. Ми. С тех пор для различных материалов различными авторами получен ряд соответствующих аналитических выражений для $u(\vec{r})$, носящих имена своих создателей. Это, в частности, потенциальные энергии Борна, Морса, Морзе, Борна – Майера – Бора, Борна – Майера – Хуччины, Терсофа, Стиллинджера – Вебера, Циглера, Киттинга, Кара – Паринелло, Бисваса – Хаммана, Хора – Дассарма, Пирсона – Такаи – Галазиогла – Тиллера, Хейне – Абаренкова – Анималу. Для алмазаподобных структур формулу для $u(\vec{r})$ предложил Б.В. Климович.

В настоящей работе использована хорошо зарекомендовавшая себя в физике металлов формула Леннард – Джонса $u(\vec{r}) = A(Be^{-12} - r^{-6})$.

В результате проведения соответствующих расчетов получены следующие выражения для E , α_T и T_m :

$$E \sim \frac{42u_{св}N^{2/3}}{a_0m_k}, \quad (9)$$

где m_k – координационное число;

$$\alpha_T \sim \frac{7,5 \cdot 10^{-2} k_B m_k}{u_{св}}, \quad (10)$$

где k_B – постоянная Больцмана;

$$T_m \sim \frac{u_{св} \cdot \overline{\Delta r_k}}{m_k k_B a_0}, \quad (11)$$

где $\overline{\Delta r_k}$ – критическое значение квазистатического отклонения атома от положения равновесия при нагреве. Величина $\overline{\Delta r_k}$ находится из соотношения $\frac{d^3 u(\vec{r})}{dr^3} = 0$ (для различных металлов $\overline{\Delta r_k} \sim (0,28 \div 0,38)a_0$). Для металлов между E и α_T имеется определенная взаимосвязь:

$$E \sim \frac{3,15 k_B N^{2/3}}{a_0 \alpha_T}. \quad (12)$$

Деформационные явления в материалах при радиационном воздействии, определяемые, в частности, концентрациями точечных дефектов C_i и C_v , полями упругих напряжений дислокаций, разностью ковалентных радиусов атомов примеси и матрицы, будут приводить к изменению величины постоянной решетки, энергии связи, и в конечном итоге будет иметь место изменение значений E , α_T и T_m . Для металлов аналитическое выражение, определяющее $u_{св}$, может быть получено на основании формулы для полной энергии кристалла в расчете на один атом [11]. Эта формула включает в себя энергию остовов, обменную энергию, энергию электростатического взаимодействия и кинетическую энергию электронов.

$$u_{св} = b_1 a^{-3} + b_2 a^{-2} - b_3 a^{-1} - b_4, \quad (13)$$

где $b_1 = \alpha_1 \beta^3$; $b_2 = \alpha_2 \beta^3$; $b_3 = \alpha_3 \beta$; $b_4 = \alpha_4$; $\beta = 2\pi \left(\frac{3\nu a_0^3}{8\pi V_0} \right)^{1/3}$; V_0 – объем элементарной ячейки;

$$\alpha_1 = \frac{2v\lambda_1}{3\pi} \frac{e^2 r_c^2}{4\pi\epsilon_0}; \quad \alpha_2 = \left(1 + \frac{5r_d^3}{\pi R_a^3}\right) \frac{2v\hbar^2 \lambda_2}{10m_e}; \quad \alpha_3 = \frac{ve^2 \lambda_3}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{3}{4\pi} + \frac{v\gamma_0}{(18\pi v)^{1/3}}\right); \quad \alpha_4 = \frac{\hbar^2 k_d^2 \lambda_4}{m_e} \left(1 + \frac{5r_d^3}{\pi R_a^3}\right);$$

r_c – ионный радиус; $\gamma_0 = 1,79$; r_d – радиус d -состояния; m_e – масса электрона; $\hbar = h/2\pi$; h – постоянная Планка; λ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) – параметры теории; k_d – величина волнового вектора d -состояния.

С учетом этого радиационные изменения значений E , α_T и T_m можно оценить из следующих выражений:

$$\Delta E \sim \frac{42N^{2/3}}{m_k} f_0(a_0) \cdot e_d, \quad (14)$$

где $f_0(a_0) = 4b_1 a_0^{-4} + 3b_2 a_0^{-3} - 2b_3 a_0^{-2} + b_4 a_0^{-1}$; $e_d = \Delta a/a_0$.

$$\Delta \alpha_T \sim \frac{7,5 \cdot 10^{-2} k_B m_k}{[u_{ce}(a_0)]^2} f_1(a_0) \cdot e_d, \quad (15)$$

где $f_1(a_0) = 3b_1 a_0^{-3} + 2b_2 a_0^{-2} - b_3 a_0^{-1}$.

$$\Delta T_m \sim -\frac{\overline{\Delta r_k}}{k_B m_k} f_0(a_0) \cdot e_d. \quad (16)$$

В простейшем случае деформацию e_d в облучаемом материале в рамках принципа суперпозиции можно представить следующим образом:

$$e_d \approx \frac{k_B T}{E(a_0) a_0^3} \left(\frac{C_v^r}{C_v} - \frac{C_i}{C_i^r}\right) + \frac{N_n}{3(1-\nu)N} \left[1 - \left(\frac{r_n}{r_M}\right)^3\right] + b_d N_s^{1/2}, \quad (17)$$

где C^r – равновесные концентрации (i) и (ν); N_n – концентрация атомов примеси; r_n, r_M – атомные радиусы атомов примеси и матрицы; b_d – величина вектора Бюргерса; N_s – плотность дислокаций.

Расчеты согласно формул (14) – (17) показывают, что при уровне деформации решетки порядка 10^{-3} изменения E , α_T и T_m составляют 10–15 %.

Заключение

Континуальный подход при построении модели процесса торможения заряженных частиц в веществе, не претендуя на статус новой теории, тем не менее позволил предельно упростить как сам формализм описания движения ионов, так и облегчить понимание сопутствующих ему радиационных явлений.

Основные результаты работы сводятся к следующим положениям:

– перемещение иона в твердом теле можно рассматривать как движение в среде с сопротивлением. Впервые вводится коэффициент ξ , отражающий степень этого сопротивления и характеризующий взаимодействие иона с атомами матрицы. Не представляет вычислительных сложностей определение длины свободного пробега, количества актов передачи энергии твердому телу и глубины проникновения заряженных частиц в материал;

– пространственно-временная картина торможения ускоренного иона в веществе дает возможность построить профили потерь энергии и, как следствие, определить распределение дефектов вдоль траектории движения. Это позволяет в конечном итоге оценить изменение физических свойств, связанное с деформацией материала радиационными дефектами;

– полученная формула для пороговой энергии смещения E_d , кроме установления физической сущности ее сложной природы, позволяет прогнозировать пути повышения радиационной стойкости материалов.

Список литературы

1. Суханов А.Д. *Фундаментальный курс физики*: в 4-х томах. Москва: Ангар; 1996.
2. Пуанкаре А. *О науке*. Пер. с фр. «Наука и метод». М.: Наука; 1990;3.
3. Ахизер А.И., Давыдов Л.Н. *Введение в теоретическую радиационную физику металлов и сплавов*. Киев: Наукова думка; 1985.
4. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф. *Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела*. Минск: Технопринт; 2001.
5. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. *Дефекты структуры в ионноимплантированном кремнии*. Минск: Издательство «Университетское»; 1990.
6. Вас Г. *Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы*. Москва: Техносфера; 2014.
7. Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М. *Таблицы параметров пространственного распределения ионноимплантированных примесей*. Минск: Издательство БГУ им. В.И. Ленина; 1980.
8. Кошкин В.М., Забродский Ю.П. Неустойчивые пары – новый тип точечных дефектов в твердых телах. *ДАН СССР*. 1979;227(5):1321-1326.
9. Ланина Н.А., Оксенгендлер Б.А., Тураева Н.Н., Юнусов М.С. Хаусдорфова размерность процесса радиационного дефектообразования в твердых телах. *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. 1992;10-11:39-49.
10. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. *Радиационные дефекты и набухание металлов*. Киев: Наукова думка; 1988.
11. Харрисон У. *Физика химической связи*. Т. 2: *Электронная структура и свойства твердых тел*. Москва: Мир; 1983.

References

1. Sukhanov A.D. [*Fundamental Course of Physics, in four volumes*]. Moscow: Angar; 1996. (In Russ.)
2. Poincaré A. *On Science*. Tr. from Fr. : [Science and Method]. Moscow: Nauka; 1990;3. (In Russ.)
3. Ahiezer A.I., Davydov L.N. [*Introduction into Theoretical Radiation Physics of Metals and Alloys*]. Kyiv: Naukova dumka; 1985. (In Russ.)
4. Komarov F.F., Komarov A.F. [*Physical Processes at Ion Implantation into Solids*]. Minsk: Technoprint; 2001. (In Russ.)
5. Komarov F.F., Novikov A.P., Soloviev V.S., Shiryaev S.U. [*Defects of Structure in Ion-implanted Silicon*]. Minsk: “Univesitetskoe”; 1990. (In Russ.)
6. Was G. [*Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and Alloys*]. Moscow: Technosfera; 2014. (In Russ.)
7. Burenkov A.F., Komarov F.F., Kumakhov M.A., Temkin M.M. [*Tables of Parameters of Spatial Distribution of Ion-implanted Impurities*]. Minsk: Publishing office of the BSU named after V.I. Lenin; 1980. (In Russ.)
8. Koshkin V.M., Zabrodskiy U.P. [Unstable pairs – New types of Point Defects in Solids]. *The Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1979;227(5):1321-1326. (In Russ.)
9. Lanina N.A., Oksengendler B.A., Turaeva N.N., Yunusov M.S. [Hausdorff Dimension of the Process of Radiation Defect Formation in Solids]. *The Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*. 1992;10-11:39-49. (In Russ.)
10. Zelensky V.F., Nekludov I.M., Chernyaeva T.P. [*Radiation Defects and Swelling of Metals*]. Kyiv: Naukova dumka; 1988. (In Russ.)
11. Harrison W. [*The Physics of the Chemical Bond*]. Т. 2: [*Electronic Structure and the Properties of Solids*]. Moscow: Mir; 1983. (In Russ.)

Вклад авторов

Квасов Н.Т. осуществил постановку задачи, предложил новый подход к ее решению и курировал ход исследований.

Ярмолик В.И. провел теоретические расчеты и оценил достоверность полученных результатов.

Павловская Е.Р. осуществила компьютерное моделирование рассматриваемых процессов, подготовила рукопись статьи.

Authors' contribution

Kvasov N.T. set the research task, suggested a new approach to solution of the research problem and supervised the research.

Yarmolik V.I. carried out theoretical calculations and assessment of the reliability of the results obtained.

Pavlovskaya E.R. carried out computer modeling of the analyzed processes, drafted the text of the article.

Сведения об авторах

Квасов Н.Т., д.ф.-м.н., профессор.

Ярмолик В.И., ассистент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Павловская Е.Р., заведующая лабораторией кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kvasov N.T., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor.

Yarmolik V.I., Assistant at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pavlovskaya E.R., Head of the Laboratory at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 29 770-06-09;
e-mail: v.jarmolik@bsuir.by
Ярмолик Валерий Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 29 770-06-09;
e-mail: v.jarmolik@bsuir.by
Yarmolik Valeri Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-14-22>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.23, 539.24

ФОРМИРОВАНИЕ SiC МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ КАРБИДИЗАЦИИ НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

М.В. ЛОБАНОК¹, С.Л. ПРОКОПЬЕВ¹, С.А. ЗАВАЦКИЙ², В.П. БОНДАРЕНКО²,
П.И. ГАЙДУК¹

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

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

Поступила в редакцию 17 июня 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что вакуумная карбидизация пористого кремния при 1100°C приводит к формированию слоев кубического карбида кремния. Обнаружено формирование слоев кубического SiC в виде двухфазной системы. При этом сформированные слои SiC на мезопористом буферном слое являются преимущественно поликристаллическими. Методом резерфордовского обратного рассеяния установлено, что использование буферных слоев пористого кремния позволяет получать слои SiC большей толщины, чем на чистой кремниевой подложке при аналогичных условиях вакуумной карбидизации. Показано, что увеличение размера пор в слоях пористого кремния приводит к увеличению толщины формируемых слоев SiC. С помощью метода растровой электронной микроскопии показано, что вакуумная карбидизация пористого кремния приводит к формированию зерен SiC в порах, частичному зарастанию и спеканию пор. Установлена зависимость размера зерен SiC от размера пор.

Ключевые слова: карбид кремния, пористый кремний, вакуумная карбидизация, тонкие пленки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках заданий 3.1.2 (№ ГР 20212702) и 3.1.4 (№ ГР 20212866) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность А.Л. Долгому за помощь в формировании слоев пористого кремния.

Для цитирования. Лобанок М.В., Прокопьев С.Л., Завацкий С.А., Бондаренко В.П., Гайдук П.И. Формирование SiC методом вакуумной карбидизации на пористом кремнии. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 14-22.

FORMATION OF SiC BY VACUUM CARBIDIZATION ON POROUS SILICON

MIKHAIL V. LOBANOK¹, STANISLAU L. PRAKOPYEU¹, SIARHEI A. ZAVATSKI²,
VITALY P. BONDARENKO², PETER I. GAIDUK¹

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

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

Submitted 17 June 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Planar-view TEM investigation revealed the formation of cubic silicon carbide layers on porous silicon by vacuum carbidization. The formation of cubic silicon layers in the form of a two-phase system was found. At the same time, the formed SiC layers on the mesoporous buffer layer are predominantly polycrystalline. Using the Rutherford backscattering method, it was found that the use of buffer layers of porous silicon makes it possible to obtain SiC layers of greater thickness than on a pure silicon substrate under similar conditions of vacuum carbidization. It is shown that an increase in the pore size in porous silicon layers leads to an increase in the thickness of the formed SiC layers. It has been shown by scanning electron microscopy that vacuum carbideization of porous silicon leads to formation of SiC grains in pores, partial overgrowth and sintering of pores. The dependence of the SiC grain size on the pore size was established.

Keywords: silicon carbide, porous silicon, vacuum carbidization, thin films.

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

Gratitude. Studies carried out within the framework of SARP project “Photonics and Electronics for Innovation” (Projects 3.1.2, № GR 20212702 and 3.1.4 № GR 20212866).

For citation. Lobanok M.V., Prakopyeu S.L., Zavatski S.A., Bondarenko V.P., Gaiduk P.I. Formation of SiC by Vacuum Carbideization on Porous Silicon. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 14-22.

Введение

Карбид кремния (SiC) обладает большим потенциалом для создания приборов и интегральных схем, предназначенных для работы в экстремальных условиях. Это связано с большой шириной запрещенной зоны SiC, хорошей теплопроводностью, высокими пробивными полями и скоростью насыщения электронов, а также значительной радиационной и термической устойчивостью. Альтернативным решением, замещающим дорогие в производстве монокристаллические пластины SiC, являются гетероэпитаксиальные слои SiC на кремнии (Si) [1, 2]. Кроме того, слои SiC можно использовать в качестве буферных промежуточных слоев между Si и GaN для уменьшения механических напряжений в гетероэпитаксиальных структурах и вероятности возникновения связанных с ними деформаций [1, 3].

Основными методами формирования SiC на Si являются молекулярно-лучевая эпитаксия [4] и химическое осаждение из газовой фазы [1, 2, 5]. Формирование SiC на Si является сложной задачей из-за большого различия коэффициентов термического расширения Si и SiC (8 %). Несмотря на то, что для Si и SiC существует несоответствие параметров кристаллической решетки (19,75 %), которое приводит к возникновению механических напряжений и протяженных дефектов [2], в ряде исследований было установлено, что для получения SiC эпитаксиального качества можно использовать буферный слой SiC, сформированный карбидизацией кремния [5–8].

Пористый кремний (por-Si), получаемый методом электрохимического анодирования, может применяться как буферный слой для наращивания на кремниевых подложках пленок других полупроводниковых материалов. Использование пористого кремния в качестве

буферного слоя позволит уменьшить возникающие в процессе карбидизации механические напряжения, уменьшить вероятность образования трещин и в целом избежать искривления пластин. Благоприятное влияние буферных слоев por-Si на качество кристаллов было продемонстрировано для гетероэпитаксиальных пленок PbS, PbSe, ZnSe, ZnO и GaAs [9]. Варьируя режимы анодирования, можно изменять толщину, пористость и структуру слоев por-Si. Процессы гомоэпитаксиального роста пленок кремния на por-Si применяются как часть технологии переноса слоев, используемой при промышленном производстве SOI-структур (ELTRAN) [9], тонкопленочных кремниевых солнечных элементов и сенсоров.

В настоящей работе исследованы особенности формирования слоев SiC в процессе вакуумной карбидизации кремниевых пластин с буферным слоем por-Si. Изучается влияние размера пор на структурные характеристики выращиваемых пленок SiC.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложек для формирования SiC использовали монокристаллические пластины кремния марки КЭС-0,01 и КДБ-12 с ориентациями (111) и (100). Буферные слои por-Si на пластинах формировали методом анодирования в водно-спиртовом растворе фтористоводородной кислоты (HF:H₂O:C₂H₅OH) в объемном соотношении 1:3:1). Анодирование проводили в гальваностатическом режиме и использовали фторопластовую ячейку с графитовым электродом для контакта к образцам. Плотность тока анодирования варьировали для получения пор диаметра 20–100 нм и 1,5 мкм. Для формирования слоев мезопористого (диаметр пор 50 и 100 нм) и нанопористого (20 нм) кремния использовали пластины марки КЭС-0,01. В свою очередь, пластины марки КДБ-12 использовали для формирования макропористого кремния с диаметром пор 1,5 мкм. Толщина всех сформированных слоев пористого кремния составляла примерно 1 мкм, а для макропористого слоя равнялась 10 мкм. В зависимости от ориентации подложки и условий анодирования были получены слои пористого кремния с древовидной или губчатой структурой [13].

Перед проведением процесса карбидизации все подложки разрезали на образцы прямоугольной формы со стороной не более 1 см, которые затем очищали в 5 % водном растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой в деионизированной воде. Затем образцы загружали в камеру ВУП-5 с последующей откачкой до рабочего давления. Выбор вакуумного поста обусловлен возможностью откачки рабочей камеры на высокий вакуум с использованием диффузионного паромасляного насоса и, как следствие, присутствием остаточных паров углеводородных соединений в камере. Карбидизация образцов производилась в нагревательной ячейке на основе вольфрамовой фольги. Типичное рабочее давление в камере при карбидизации кремния составляло $P \sim 1 \times 10^{-2}$ Па. Контроль температуры образцов осуществлялся термопарой платинородий-платина типа ПП-1. Процесс формирования слоев SiC методом вакуумной карбидизации заключался в нагреве до 1100 °С в течение нескольких минут и выдерживании образцов при данной температуре в течение 10 мин.

Химические профили атомов (состав) и толщину слоев в структурах SiC/Si и SiC/por-Si определяли из спектров резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов He⁺ с энергией 1,2 МэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. При преобразовании шкалы энергий в шкалу глубин, для полной обработки экспериментальных спектров РОР, а также для сравнения с теоретически моделированными спектрами использовали пакет расчетных программ HEAD6. Структурные свойства сформированных слоев SiC изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) с использованием микроскопа Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении 150 кэВ. Образцы для исследований утоняли в планарном виде химико-динамическим методом в смеси концентрированных кислот HF:HNO₃ = 1:5 со стороны кремниевой подложки. Исследования поверхностного микрорельефа образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Hitachi S-4800. Типичное значение ускоряющего напряжения составляло 10 кВ. Регистрация РЭМ изображений выполнялась в режиме отраженных электронов, а также в режиме вторичных электронов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры RBS образцов SiC, сформированных при карбидизации в течение 10 мин и температуре 1100 °С. Вид спектра SiC/Si является типичным для кремниевой подложки, содержащей на поверхности слой SiC. Наклон в диапазоне каналов 280 – 300 и увеличение интенсивности выхода обратно-рассеянных ионов в области каналов 120 – 140, связанных с наличием атомов углерода в структуре, свидетельствует о формировании слоев SiC. Небольшое увеличение пикового выхода в области каналов 100 – 150 связано, вероятно, с изменением концентрации углерода при увеличении размера пор в подложке. Изменения спектров в области каналов 220 – 300 свидетельствуют об увеличении толщины слоя SiC при использовании подложек с буферным пористым кремнием. При анализе спектров RBS образцов было установлено, что в зависимости от морфологии приповерхностных слоев Si подложки толщина пленки карбида кремния варьируется от 50 до 350 нм.

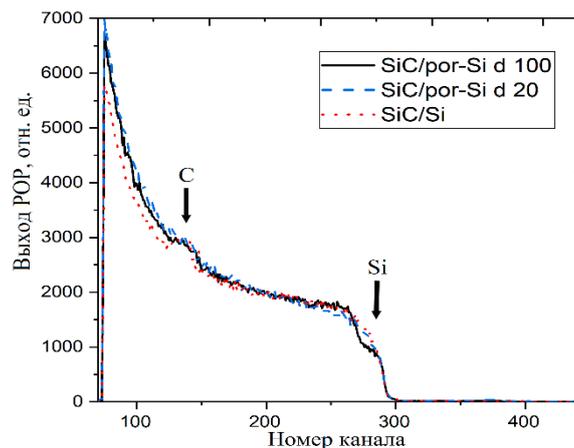


Рис. 1. Спектры RBS структур SiC/Si, сформированных вакуумной карбидизацией при температуре 1100 °С в течение 10 мин

Fig. 1. RBS spectra of SiC/Si structures, formed by vacuum carbidization at temperature 1100 °С for 10 min

Методами ПЭМ и ПЭД было установлено, что вакуумная карбидизация кремния с буферными слоями пористого кремния при 1100 °С в течение 10 мин приводит к формированию слоев SiC. Так, на ПЭД изображении, представленном на рис. 2, а, можно выделить рефлексы {111} и {220}, обусловленные дифракцией электронов на кубическом полиците (3С-SiC) карбида кремния ($a = 0,435$ нм). Однако присутствие концентрических колец (111), (220), (311) свидетельствует о наличии поликристаллической фазы SiC. Из анализа дифракционных картин структур SiC/por-Si можно сделать вывод о том, что сформированные слои SiC представляют собой смесь моно- и поликристаллических фаз 3С-SiC. На присутствие двумерных дефектов во всех возможных (111) плоскостях указывают экстрарефлексы, обозначенные как «двойники SiC» на рис. 2. Эти рефлексы являются результатом дифракции на вторичных двойниках и имеют индексы типа $1/3\{422\}$ и $1/3\{115\}$.

На рис. 2, б приведено ПЭМ изображение, полученное в светлом поле на структуре SiC/por-Si. На изображении можно выделить области с полосчатым контрастом (указаны стрелками). Согласно исследованиям дефектов в эпитаксиальных слоях кремния [10], подобные области с характерным контрастом, вероятно, являются микродвойниковыми ламелями SiC.

На рис. 3 представлены РЭМ изображения образцов SiC/por-Si в поперечном сечении. В некоторых порах произошло образование так называемого «бутылочного горла». Вблизи поверхности поры имеют меньший диаметр, чем в глубине подложки [9]. Данный эффект можно объяснить спеканием поры при термической обработке в вакууме. При этом в поре происходит образование зерен карбида кремния с последующим зарастанием поры, что согласуется с механизмом зародышеобразования карбида кремния в por-Si, предложенном в [11].

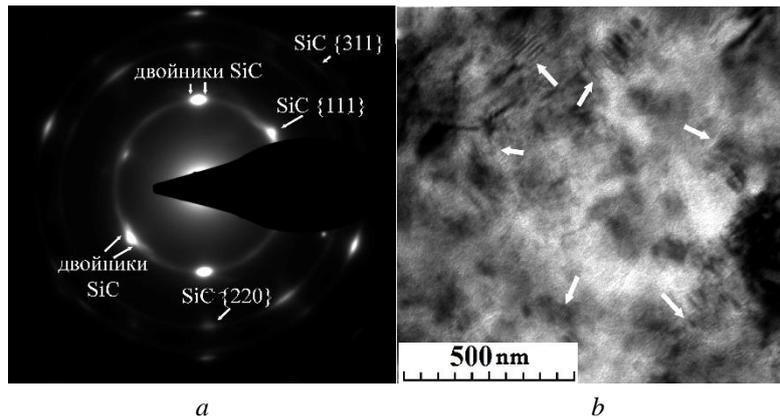


Рис. 2. Структура SiC/Si, сформированная вакуумной карбидизацией при температуре 1100 °С в течение 10 мин: *a* – дифракционная картина ПЭД; *b* – снимок ПЭМ в режиме светлого поля
Fig. 2. SiC / Si structure formed by vacuum carbidization at 1100 °C for 10 min: *a* – PED diffraction pattern; *b* – TEM image in bright field mode

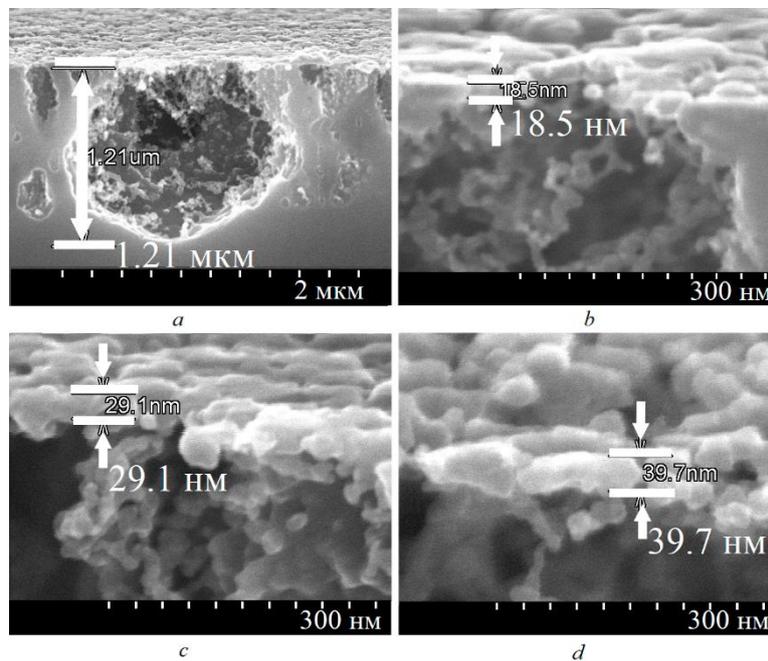


Рис. 3. Микрофотографии РЭМ структур SiC/por-Si: *a* – изображение поры после карбидизации; *b* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 20 нм; *c* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 50 нм; *d* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 100 нм

Fig. 3. SEM micrographs of SiC / por-Si structures: *a* – pore image after carbidization; *b* – image of SiC grains on por-Si buffer layer with a pore diameter of 20 nm; *c* – image of SiC grains on a por-Si buffer layer with a pore diameter of 50 nm; *d* – image of SiC grains on a por-Si buffer layer with a pore diameter of 100 nm

Слои SiC, сформированные на пористом кремнии, имеют выраженную зернистую структуру. Размер зерен SiC изменяется с увеличением диаметра пор буферного слоя. Вероятно, это связано с диффузионными процессами перестройки поверхности пористой структуры [11]. Толщина зерен для структур с семейством пор заданного размера варьируется от 18 до 40 нм. При этом размер зерен, при прочих одинаковых условиях, зависит и от ориентации подложки. Так, на кремниевой подложке с буферным слоем пористого кремния и с ориентацией (100) размер сформированных зерен SiC составляет 29,1 нм, а на подложке с ориентацией (111) размер зерен равен 54,2 нм.

На рис. 4 представлено РЭМ изображение образца, сформированного при вакуумной карбидизации макропористого кремния с диаметром пор 1,5 мкм. Глубина пористого слоя при карбидизации уменьшилась с 10 до 4,94 мкм. Вероятно, это связано с диффузией кремния из слоя por-Si при формировании SiC и зарастанием пор. При карбидизации в слое пористого

кремния произошло зарастание пор сверху. Согласно данным исследования термодинамического расчета роста SiC [12], в результате увеличения концентрации углерода в слое пористого кремния в порах происходит формирование зерен. Постепенно сформированные в порах зерна перерастают в сплошные слои SiC. Размер зерен SiC на поверхности сформированной структуры SiC/por-Si составляет 45,6 нм.

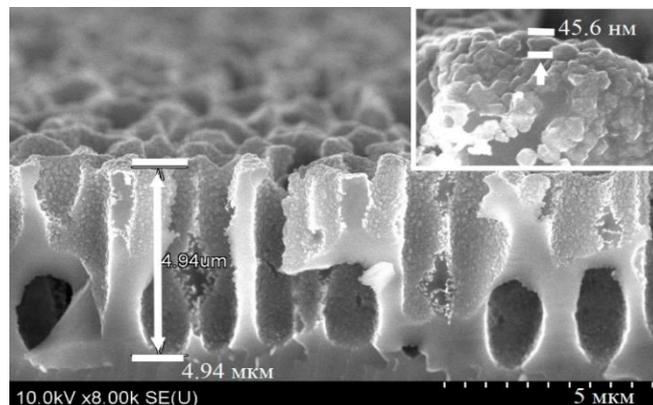


Рис. 4. Изображение РЭМ структуры SiC/por-Si с диаметром пор 1,5 мкм, сформированной вакуумной карбидизацией при 1100 °С в течение 10 мин

Fig. 4. SEM image of SiC/por-Si structure with a pore diameter of 1.5 μm formed by vacuum carbidization at 1100 °C for 10 min

Из анализа спектров POP (рис. 1) и оценки размеров зерен на РЭМ-изображениях (рис. 3, 4) следует, что при увеличении размера пор в буферном слое por-Si происходит увеличение толщины сформированного слоя SiC. При аналогичном режиме вакуумной карбидизации кремния без буферных слоев происходит формирование слоев SiC толщиной не более 70 нм. Вероятно, это связано с увеличением коэффициентов диффузии [12] и уменьшением энергии активации роста зерен SiC при увеличении размеров пор в буферном слое [11]. Согласно исследованию термодинамики зародышеобразования SiC [11], увеличение площади стенок пористого слоя влияет на скорость образования SiC. Согласно данным исследования [13], древовидная форма пор с большим количеством боковых ответвлений от центральных каналов пор является отличительной особенностью мезопористого слоя, сформированного на кремнии с ориентацией (111). В свою очередь, нанопористый кремний с диаметром пор 20 нм имеет губчатую структуру. Полученные данные позволяют предположить, что при карбидизации пористого кремния с древовидной формой пор, вероятно, на первых этапах происходит формирование зародышей SiC, в том числе и в боковых ответвлениях пор. С другой стороны, размер пор влияет на время, необходимое для полного зарастания пористого кремния слоями SiC. Так, образцы, сформированные на мезопористом кремнии (рис. 3), практически полностью покрыты слоем SiC. В свою очередь, на макропористом кремнии (рис. 4) за то же время карбидизации (10 мин) зарастание пор на поверхности сплошным слоем не происходит.

Толщина сформированных слоев SiC зависит и от ориентации подложки. Так, методом РЭМ установлено, что при вакуумной карбидизации на пористом буферном слое размер зерен SiC на подложке с ориентацией (111) равен 54,2 нм, в то время как для образца, сформированного на подложке с ориентацией (100), равен 18,5 нм. Разница в скорости роста SiC в зависимости от ориентации Si подложки с буферным слоем por-Si коррелирует с данными исследования [14]. Такую существенную разницу в размере сформированных зерен SiC можно объяснить разницей коэффициентов диффузии кремния.

Другой особенностью карбидизации por-Si является изменение размеров и коагуляция новых пор. Согласно исследованию карбидизации пористого кремния [11], поры подвержены зарастанию и коагуляции. При термической карбидизации происходит уменьшение размеров поры (рис. 3, а), что связано с формированием слоев SiC, спеканием кремния с образованием «бутылочного горла», а также с образованием в поре нанокристаллов SiC. Формирование в порах нанокристаллов SiC является интересной особенностью карбидизации пористого кремния, которая наблюдается только в образцах с буферным слоем por-Si, что согласуется с данными теоретических исследований зародышеобразования SiC [11].

Заключение

В работе исследованы особенности формирования слоев SiC на буферных слоях пористого кремния при вакуумной карбидизации в течение 10 мин при 1100 °С в остаточной атмосфере углеводородов. Результаты исследований показали, что использование буферных слоев пористого кремния позволяет получать слои SiC большей толщины, чем на чистом Si при аналогичных условиях вакуумной карбидизации. Методом РОР установлено, что при карбидизации кремния с буферным пористым слоем происходит формирование слоев SiC с толщиной от 50 до 350 нм. Методом ПЭД установлено формирование кубического кремния в виде двухфазной системы. Сформированная пленка SiC на мезопористом буферном слое является преимущественно поликристаллической. Методом РЭМ установлено, что в результате карбидизации в пористом слое образовались зерна карбида кремния и произошло частичное зарастание пор пленкой SiC. Размер пор в буферном слое влияет на размер образующихся кристаллических зерен карбида кремния и варьируется от 18 до 60 нм.

Список литературы

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40:56-76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Severino A., Locke C., Anzalone R. 3C-SiC Film Growth on Si Substrates. *ECS Transactions*. 2011;35(6):99. DOI: 10.1149/1.3570851.
3. Skibarko I.A., Milchanin O.V., Gaiduk P.I. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1999;166:465-469.
4. Chen J., Steckl A.J. Molecular beam epitaxy growth of SiC on Si (111) from silacyclobutane. *J. of Vacuum Science & Technology. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1998;16:1305. DOI:10.1116/1.590006.
5. Zimbone M., Mauceri M., Litrico G., Barbagioanni E.G., Bongiorno C., La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *J. of Crystal Growth*. 2018;498:248-257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
6. Bosi M., Ferrari C., Nilsson D., Ward P.J. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *Cryst. Eng. Comm.* 2016;18:7478-7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
7. Anzalone R., Piluso N., Reitano R., Alberti A., Fiorenza P., Salanitri M., Severino A., Lorenti S., Arena G., Coffa S., La Via F. Voids-free 3C-SiC/Si interface for high quality epitaxial layer. *Materials Science Forum*. 2016.
8. Shimizu H., Hisada K. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates. *Materials Science Forum*. 2003;433-436:229-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.433-436.229.
9. Chubenko E., Redko S., Dolgiy A., Bandarenka H., Bondarenko V. Porous silicon as substrate for epitaxial films growth. Porous Silicon: From Formation to Applications. *Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2016;3:141-162.
10. Booker G.R Crystallographic imperfections in silicon. *Disc. Farad. Soc.* 1964;38:298-304.
11. Нагорнов Ю.С. Термодинамика зародышеобразования карбида кремния в процессе карбонизации нанопористого кремния. *Журнал технической физики*. 2015;85:5.
12. Чан Х.К., Поветкин А.Д., Кольцова Э.М., Петухов Д.И., Елисеев А.А. Математическая модель массопереноса в поре на основе молекулярной динамики с применением алгоритма параллельных вычислений. *Technical Sciences. Fundamental research*. 2012;3:432-436.
13. Долгий А.Л., Клышко А.А., Бондаренко В.П. Электрохимическое осаждение никеля на макро- и мезопористый кремний. *Доклады БГУИР*. 2009;1(39):65-70.
14. Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V., Grashchenko A.S., Soshnikov I.P., Boiko M.E., Sharkov M.D., Dyadenchuk A.F. Growth of SiC films by the method of substitution of atoms on porous Si (100) and (111) substrates. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;36:39-52.

References

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40:56-76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Severino A., Locke C., Anzalone R. 3C-SiC Film Growth on Si Substrates. *ECS Transactions*. 2011;35(6):99. DOI: 10.1149/1.3570851.
3. Skibarko I.A., Milchanin O.V., Gaiduk P.I. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1999;166:465-469.

- Chen J., Steckl A.J. Molecular beam epitaxy growth of SiC on Si (111) from silacyclobutane. *J. of Vacuum Science & Technology. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1998;16:1305. DOI:10.1116/1.590006.
- Zimbone M., Mauceri M., Litrico G., Barbagioanni E.G., Bongiorno C., La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *J. of Crystal Growth*. 2018;498:248-257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
- Bosi M., Ferrari C., Nilsson D., Ward P.J. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *Cryst. Eng. Comm.* 2016;18:7478-7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
- Anzalone R., Piluso N., Reitano R., Alberti A., Fiorenza P., Salanitri M., Severino A., Lorenti S., Arena G., Coffa S., La Via F. Voids-free 3C-SiC/Si interface for high quality epitaxial layer. *Materials Science Forum*. 2016.
- Shimizu H., Hisada K. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates. *Materials Science Forum*. 2003;433-436:229-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.433-436.229.
- Chubenko E., Redko S., Dolgiy A., Bandarenka H., Bondarenko V. Porous silicon as substrate for epitaxial films growth. Porous Silicon: From Formation to Applications. *Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2016;3:141-162.
- Booker G.R. Crystallographic imperfections in silicon. *Disc. Farad. Soc.* 1964;38:298-304.
- Nagornov Yu.S. [Thermodynamics of silicon carbide nucleation during the carbonization of nanoporous silicon]. *Technical Physics*. 2015;85:5.
- Tran H.Q., Povetkin A.D., Koltsova E.M., Petukhov D.I., Eliseev A.A. [Mathematical model of mass transfer in the pore based on molecular dynamics using the algorithm of parallel computing]. *Technical Sciences. Fundamental research*. 2012;3:432-436.
- Douhi A.L., Klyshko A.A., Bondarenko V.P. [Electrochemical deposition of nickel on macro- and mesoporous silicon]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2009;1(39):65-70.
- Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V., Grashchenko A.S., Soshnikov I.P., Boiko M.E., Sharkov M.D., Dyadenchuk A.F. Growth of SiC films by the method of substitution of atoms on porous Si (100) and (111) substrates. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;36:39-52.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лобанок М.В., аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Прокопьев С.Л., старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Завацкий С.А., аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гайдук П.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Labanok M.V., Postgraduate at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Prakopyeu S.L., Senior Lecturer at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Zavatski S.A., Postgraduate at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of Laboratory 4.3 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gaiduk P.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 5,
Белорусский государственный университет;
тел. +375 29 654-09-53;
e-mail: mishalobanok@gmail.com
Лобанок Михаил Владимирович

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5,
Belarusian State University;
tel. +375 29 654-09-53;
e-mail: mishalobanok@gmail.com
Labanok Mikhail Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-22-29>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Д.В. АРХИПЕНКОВ

ОАО "КБ Радар" – управляющая компания холдинга "Системы радиолокации"
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 4 марта 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Одним из самых информативных параметров сигнала радиолокационных станций является его несущая частота. Измерение и запоминание несущей частоты разведываемого радиоэлектронного устройства является одной из наиболее важных функций станций радиоразведки, радиомониторинга. Используя понятие аналитического сигнала, периодический сигнал можно представить через огибающую и фазу либо квадратурные компоненты, что дает возможность расчета мгновенной частоты. Цель работы – определить эффективность метода расчета мгновенной частоты на основе прямого преобразования во временной области с использованием нескольких дифференциаторов для измерения временных и частотных параметров сигнала с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ). Разработанный алгоритм позволяет измерить такие параметры сигнала с ЛЧМ, как крутизна, длительность импульса, период повторения, центральная частота, ширина спектра. В настоящей работе представлена реализация алгоритма измерения мгновенной частоты дополненным двойным дифференцированием. Первое дифференцирование позволяет измерить крутизну сигнала как выборочное среднее, второе дифференцирование – временные точки (длительность импульса, период повторения). Представлены признаки сигнальных портретов для симметричного, несимметричного сигнала с ЛЧМ, а также при отсутствии внутриимпульсной модуляции. Результаты моделирования показали, что при соотношении частоты дискретизации к полосе сигнала, равном 2,3 раза, ошибка измерения крутизны сигнала составляет 25 %, а при 11 – 8,8 %; результаты моделирования проводились при соотношении сигнал/шум, равном 10 дБ.

Ключевые слова: ЛЧМ, крутизна, длительность импульса, мгновенная частота, ширина спектра.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенков Д.В. Алгоритм распознавания вида модуляции и измерения параметров сигналов радиолокационных станций с линейно-частотной модуляцией. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 22-29.

ALGORITHM FOR RECOGNIZING THE TYPE OF MODULATION AND MEASURING PARAMETERS OF RADAR SIGNALS WITH CHIRP

DMITRY V. ARKHIPENKOV

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

Submitted 4 March 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. One of the most informative parameters of the signal of radar signals is its carrier frequency. Measuring and memorizing the carrier frequency of a reconnaissance radio-electronic device is one of the most important functions of a radio intelligence station, radio monitoring. Using the concept of an analytical signal, any signal can be represented through an envelope and phase, or quadrature components, which makes it possible to calculate the instantaneous frequency. The purpose of the work is to determine the effectiveness of the instantaneous frequency calculation method based on direct conversion in the time domain using several differentiators for measuring the time and frequency parameters of a chirp signal. The developed algorithm makes it possible to measure such parameters of the signal with chirp as steepness, pulse duration, repetition period, central frequency, spectrum width. This paper presents the implementation of an algorithm for measuring the instantaneous frequency with augmented double differentiation. The first differentiation allows you to measure the steepness of the signal as a sample average, the second differentiation – time points (pulse duration, repetition period). The signs of signal portraits are presented for a symmetrical, asymmetric signal with chirp, as well as in the absence of intra-pulse modulation. The simulation results showed that with the ratio of the sampling frequency to the signal band equal to 2.3, the error in measuring the steepness of the signal is 25 %, and at 11 – 8.8 %; the simulation results were carried out with a signal-to-noise ratio of 10 dB.

Keywords: chirp, steepness, pulse duration, instantaneous frequency, spectrum width.

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

For citation. Arkhipenkov D.V. Algorithm for Recognizing the Type of Modulation and Measuring Parameters of Radar Signals with Chirp. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 22-29.

Введение

Функционирование систем распознавания радиолокационных сигналов необходимо рассматривать в условиях сложной помеховой обстановки: наличие активных, пассивных и имитирующих помех, преднамеренное использование ложных целей [1]. Следует отметить, что основной причиной низких темпов внедрения таких устройств является сравнительно малая достоверность решений, принимаемых в условиях существенной априорной неопределенности.

Один из главных, весьма информативных параметров сигнала радиолокационных станций (РЛС) – его несущая частота. Условно способы определения частоты можно разделить на фильтровые, дискриминационные, корреляционные (интерференционные) и цифровые [2]. Для современных устройств наиболее распространенными являются цифровые способы определения частоты, так как обеспечивают высокую точность и хорошо сопрягаются с вычислительными устройствами последующей обработки сигнала.

Для измерения частоты применяют схемы, реализующие модификации двух основных методов. Это методы цифрового частотомера и цифрового периодомера. Поэтому структуру обработки сигнала можно представить как во временной, так и в частотной области. При этом вторичные идентификационные признаки, выделенные в одном из каналов, могут быть использованы как первичные в другом канале обработки. Для частотной области основным инструментом решения данной задачи является дискретное преобразование Фурье (DFT) или быстрое преобразование Фурье (FFT). Цель настоящей работы – определить эффективность метода расчета мгновенной частоты на основе прямого преобразования во временной области с использованием нескольких дифференциаторов для измерения временных и частотных параметров импульсного сигнала с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ).

Методы исследования

В цифровом радиоприемном устройстве сигнал $s(t)$ (1), состоящий из компонент смеси сигналов различных радиоэлектронных средств $x(t)$ и шума $\eta(t)$, с усилителя промежуточной частоты приемного тракта преобразуется в цифровую форму для дальнейшей обработки:

$$s(t) = x(t) + \eta(t). \quad (1)$$

Используя понятие аналитического сигнала (АС) [3], $s(t)$ можно представить через огибающую и фазу:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t - \varphi(t)) = A(t) \cdot e^{j\varphi(t)} = U(t) \cdot \cos \omega_0 t + V(t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где $A(t) = \sqrt{U^2(t) + V^2(t)}$ – огибающая; $\varphi(t) = \arctg \frac{V(t)}{U(t)}$ – фаза.

Из (2) следует, что процесс на выходе линейной части приемника определяется параметрами процессов: огибающей и фазой $\{A(t) \text{ и } \varphi(t)\}$ или квадратурными компонентами $\{V(t) \text{ и } U(t)\}$. Поэтому преобразование процесса $s(t)$ в цифровую форму приведет к формированию цифровой выборки: либо огибающей и фазы, либо квадратурных компонент.

Вычисление фазы требует вычисления арктангенса, которое трудно выполнить точно без привлечения значительных вычислительных ресурсов [3]. Вычисление арктангенса может быть выполнено с помощью алгоритма *CORDIC* (*COordinate Rotation Digital Computer*) [3]. Данный метод позволяет избежать использование блока умножения, что может сократить ресурсы в реализациях *FPGA* (*Field-Programmable Gate Array*) или процессора, но из-за нелинейных вычислений данный алгоритм применим к измерению фазы для сигналов с высоким отношением сигнал/шум [4]. В [5] представлен алгоритм вычисления мгновенной частоты без промежуточного вычисления фазы $\varphi(n)$ (рис 1).

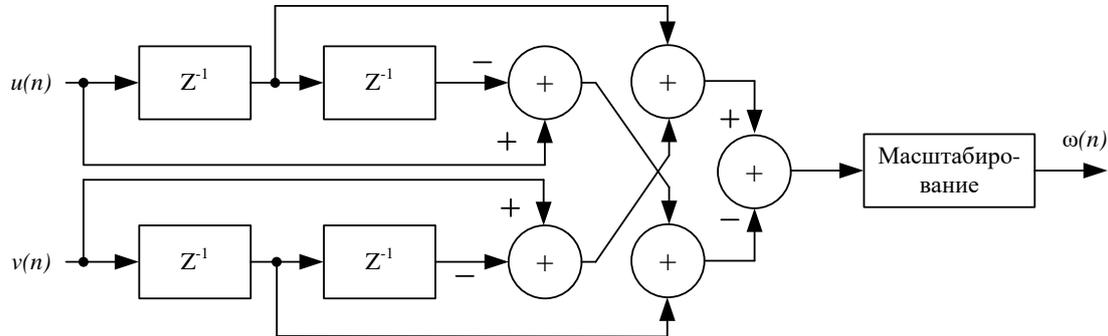


Рис. 1. Схема нахождения мгновенной частоты
Fig. 1. The scheme for finding the instantaneous frequency

Математически алгоритм, реализованный в структуре рис. 1, можно записать как

$$\omega(n) = \frac{u(n) \cdot d[v[n]] / dn - v(n) d[u(n)] / dn}{u^2(n) + v^2(n)}, \quad (3)$$

где $(u^2(n) + v^2(n))^{-1}$ – коэффициент масштабирования.

Для определения закона модулирующего сигнала предлагается рассчитать крутизну изменения частоты радиочастотного сигнала $G(n)$. Для этого на выход схемы, представленной на рис. 1, необходимо добавить дополнительный дифференциатор.

$$G(n) = \frac{d\omega(n)}{dn}. \quad (4)$$

Расчет значений крутизны $G(n)$ в течение длительности импульса позволяет определить знак изменения (или постоянства) крутизны за время $\tau_{\text{и}}$ (длительность импульса). Это может служить дополнительным характерным признаком сигнального портрета.

Наиболее часто используемые сигналы в радиолокации – ЛЧМ, КФМ и радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции. Рассмотрим возможность определения мгновенной частоты, крутизны и ее знака как параметров сигнального портрета распознаваемой РЛС для следующих вариантов:

- 1) отсутствие внутриимпульсной частотной модуляции (ЧМ);
- 2) внутриимпульсная модуляция по возрастающему/падающему линейному закону;
- 3) внутриимпульсная модуляция по « λ »-закону (внутриимпульсная модуляция по треугольному закону: за один период частота модуляции возрастает до половины полупериода) и « V »-закону (закон обратен « λ »-закону).

В первом случае на рис. 2 ($s(t)$ – сигнал; $\omega(n)$ – мгновенная частота; $G(n)$ – крутизна) показано отсутствие внутриимпульсной ЧМ с учетом воздействия случайной помехи и шума.

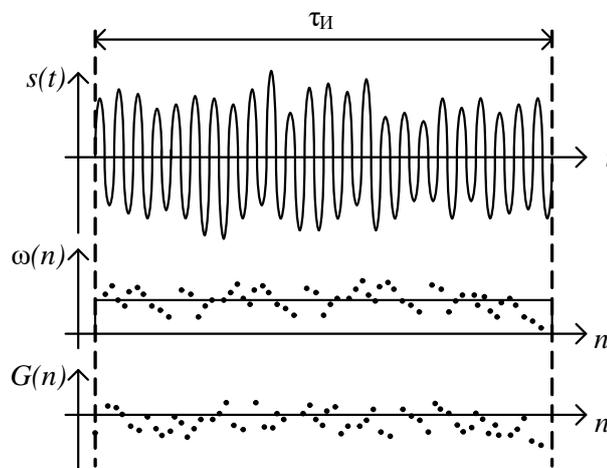


Рис. 2. Результат схемы нахождения мгновенной частоты с дифференциатором при отсутствии внутриимпульсной модуляции

Fig. 2. The result of the scheme for finding the instantaneous frequency with a differentiator in the absence of intra-pulse modulation

Наличие шума в квадратурных составляющих $U(t)$ и $V(t)$ приводит к флуктуации мгновенной частоты $\omega(n)$, закон распределения которой носит случайный характер. При увеличении количества точек выборки мгновенной частоты $\omega(n)$ ($n \rightarrow \infty$) распределение оценки максимального правдоподобия – асимптотически нормальное. Тогда расчет мгновенной частоты $\omega(n)$ может быть выполнен как выборочное среднее, а отклонение от среднего значения – выборочная дисперсия.

Таким образом, при отсутствии внутриимпульсной ЧМ имеем два характерных признака: мгновенная частота $\omega(n) = \text{const}$, крутизна $G(n) = 0$.

Второй случай – внутриимпульсная модуляция по возрастающему/падающий линейному закону (рис. 3, *a, b*).

При возрастающем и падающем линейным законам ЧМ можно рассчитать среднее значение частоты $\omega(n)$, а также среднее значение крутизны $G(n)$ (имеет не нулевое значение) ЛЧМ-сигнала в течение основного периода модуляции. Дополнительным характерным признаком идентификации является знак крутизны $G(n)$. Для возрастающего закона модуляции ЛЧМ-сигнала он положительный, для убывающего – отрицательный.

Таким образом, имеем три признака сигнального портрета: среднее значение мгновенной частоты $\omega_{\text{сред}}$, выборочное среднее значение крутизны $G(n)$, а также знак крутизны $G(n)$ («плюс» или «минус»).

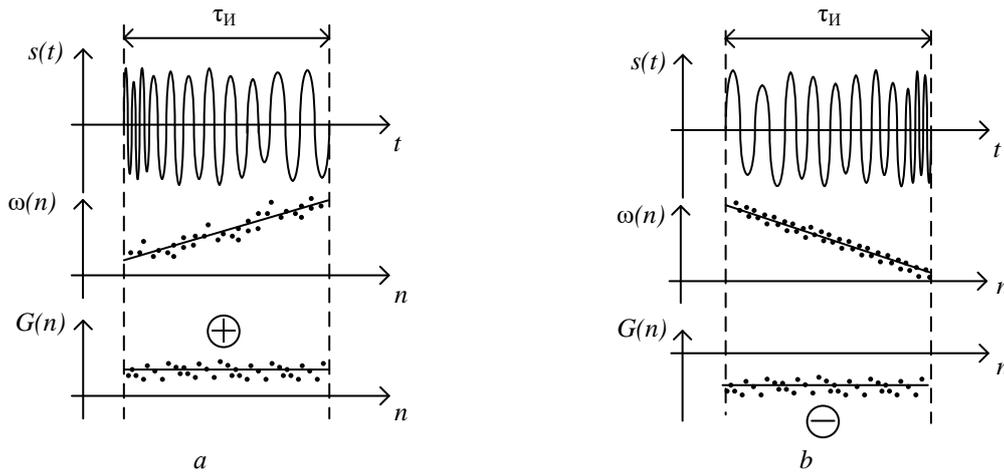


Рис. 3. Внутриимпульсная модуляция несимметричного ЛЧМ: *a* – возрастающий ЛЧМ; *b* – падающий ЛЧМ
Fig. 3. Intra-pulse modulation of an asymmetric chirp: *a* – increasing chirp; *b* – falling chirp

Третий случай – внутриимпульсная модуляция по «λ»-закону и «V»-закону (рис. 4 *a, b*).

Для этого случая имеем три признака сигнального портрета: среднее значение мгновенной частоты $\omega_{\text{сред}}$, выборочное среднее значение крутизны $G(n)$, число переходов крутизны через нуль.

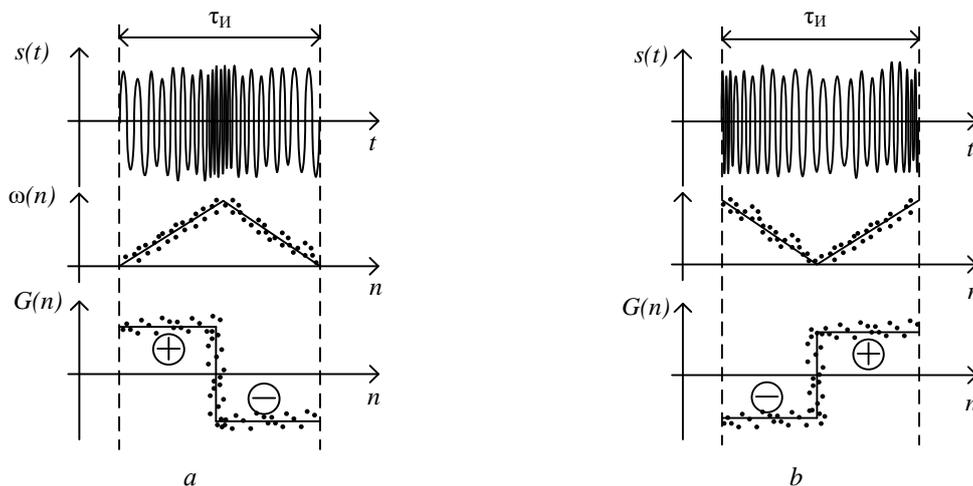


Рис. 4. Внутриимпульсная модуляция: *a* – по «λ»-закону модулирования ЛЧМ-сигнала; *b* – «V»-закону модулирования ЛЧМ-сигнала

Fig. 4. Intra-pulse modulation: *a* – по «λ»-the law of the modeling chirp signal; *b* – «V»-the law of the modeling chirp signal

На основе алгоритма, представленного на рис. 1, и сигнальных портретов рис. 2–4 можно построить алгоритм определения вида модуляции и идентификации параметров сигнальных портретов РЛС.

Результаты моделирования

Результаты моделирования при разных значениях SNR (отношение сигнал/шум) и $\mu = Fs/\Delta f$ частоты дискретизации (Fs) к полосе занимаемого сигнала (Δf) ($\mu = Fs/\Delta f$) приведены на рис. 5, 6.

Для проверки эффективности алгоритма был сформирован импульсный сигнал с ЛЧМ: симметричный с параметрами $\tau = 0,2$ мс, $f_1 = 10$ кГц, $f_2 = 300$ кГц с периодом повторения $T = 0,2$ мс и несимметричный с параметрами $\tau = 0,1$ мс, $f_1 = 10$ кГц, $f_2 = 300$ кГц, $T = 0,1$ мс.

На рис. 5 (5, *a* – $SNR = 100$ дБ; 5, *b* – $SNR = 10$ дБ; 5, *c* – $SNR = 2$ дБ) представлены осциллограммы в контрольных точках: 1 – входной сигнал (с параметрами сформированного сигнала и параметрами канала передачи); 2 – результат детектирования вида модуляции (с выходными значениями детектирования); 3 – результат измерения параметров сигнала (“S” – значения

крутизны полупериодов ЛЧМ-сигнала; “tau” – длительность полупериодов ЛЧМ-сигнала) и ошибки измерения (“mistake”) относительно исходных параметров. Исходными параметрами, по которым определяется заданный сигнал – обнаружен или нет – являются крутизна и длительность импульса (заданные оператором либо сверенные с таблицей значений с заданной точностью из памяти устройства).

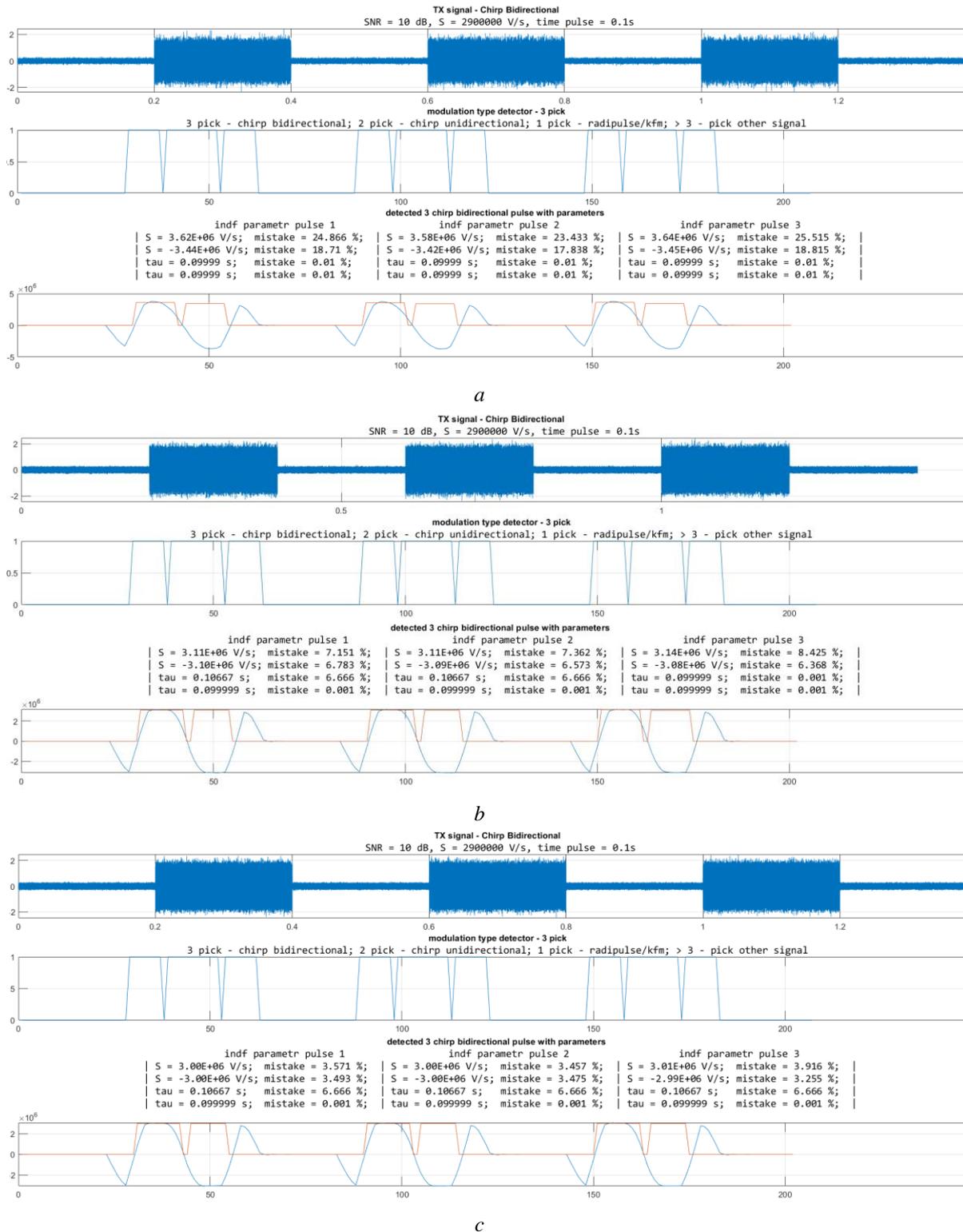
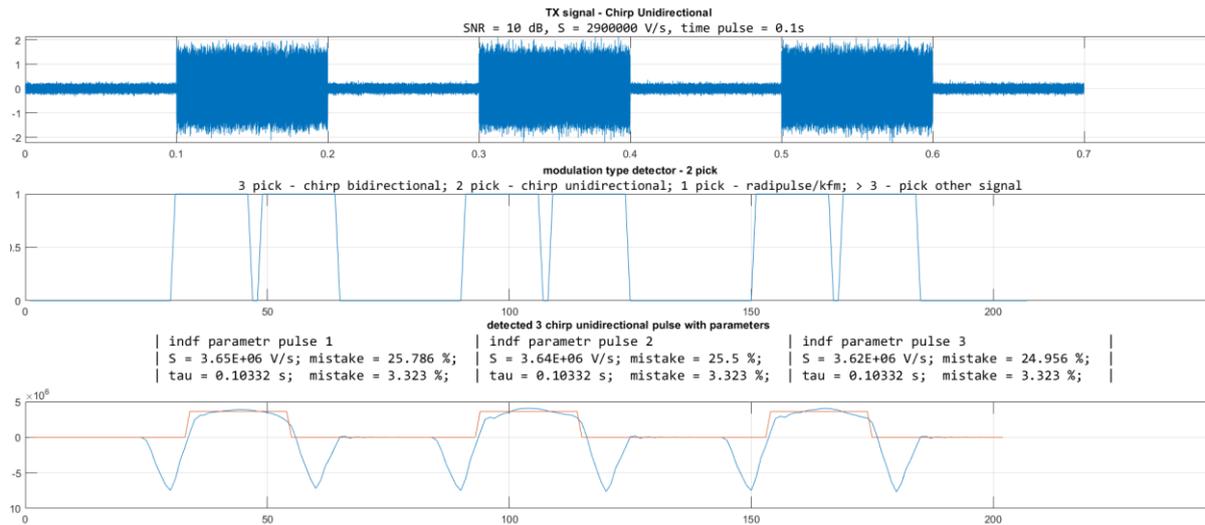
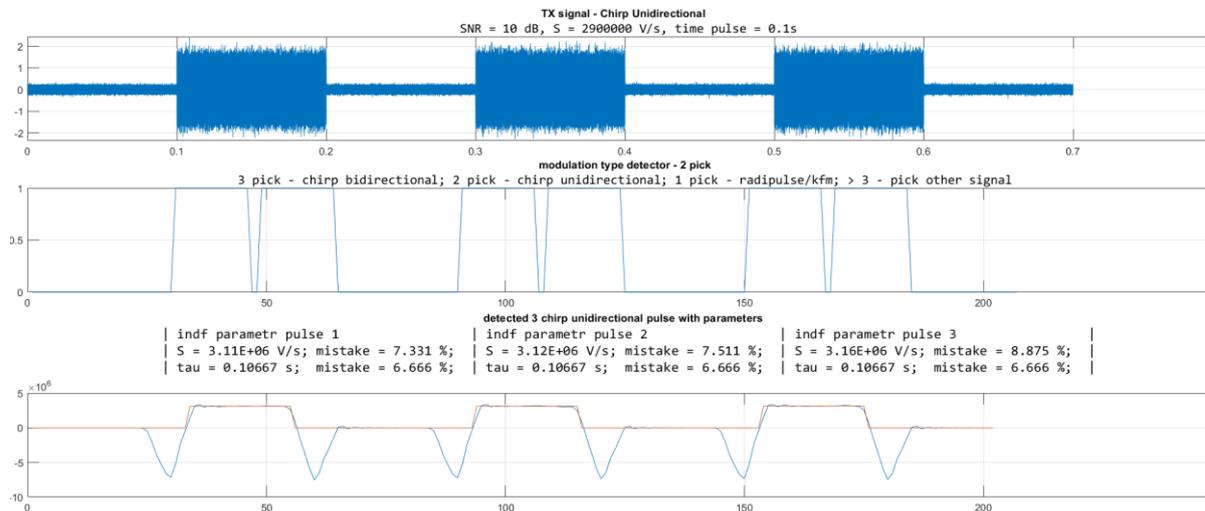


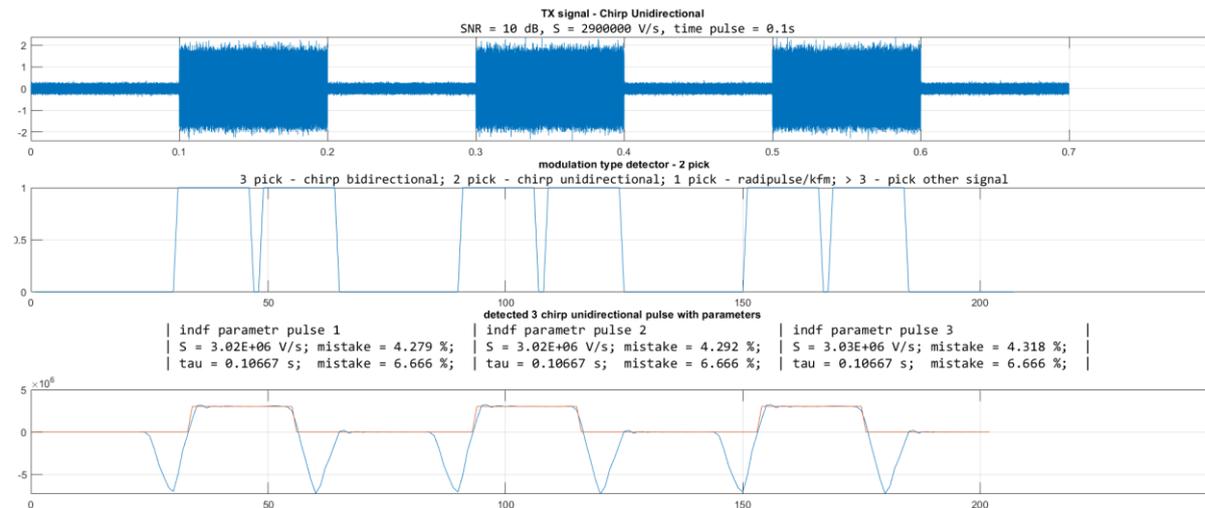
Рис. 5. Симметричный ЛЧМ-сигнал: *a* – $\mu = 2,3$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 25,5$ %; *b* – $\mu = 11,5$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 8,45$ %; *c* – $\mu = 23$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 3,9$ %
Fig. 5. Bidirectional chirp: *a* – $\mu = 2.3$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 25.5\%$; *b* – $\mu = 11.5$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 8.45$ %; *c* – $\mu = 23$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 3.9$ %



a



b



c

Рис. 6. Несимметричный ЛЧМ-сигнал: $a - \mu = 2,3$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 25,7\%$; $b - \mu = 11,5$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 8,8\%$; $c - \mu = 23$, SNR = 10 дБ, погрешность $\Delta = 4,3\%$

Fig. 6. Unidirectional chirp: $a - \mu = 2.3$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 25.7\%$; $b - \mu = 11.5$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 8.8\%$; $c - \mu = 23$, SNR = 10 dB, error $\Delta = 4.3\%$

Дифференцирование полученной выборки позволяет определить временные метки, которые соответствуют фронту/срезу импульса сигнала. Метки в обнаружителе вида модуляции позволяют определить количество пиков, а также измерить длительность импульса. При детектировании вида модуляции для симметричного ЛЧМ-сигнала характерно наличие трех пиков, для несимметричного – двух, для КФМ и радиоимпульса – одного, во всех других вариантах имеем другой тип модуляции.

Таким образом, алгоритм распознавания симметричного и несимметричного ЛЧМ-сигнала одинаков. Отличие заключается в том, что для несимметричного ЛЧМ-сигнала будет измерено только одно значение крутизны “S”, длительности импульса “tau” и соответствующее им отклонение от заданных параметров “mistake”.

Заключение

В статье предложен оригинальный способ распознавания параметров радиолокационных сигналов с ЛЧМ. Данный способ основан на использовании алгоритма вычисления мгновенной частоты с двойным дифференцированием, который позволяет измерить как временные, так и частотные параметры сигнала с ЛЧМ: период повторения (при пачке импульсов), длительность импульса, крутизну, центральную частоту, ширину спектра.

Результаты моделирования показали, что при приеме сигнала с симметричной и несимметричной ЛЧМ при SNR = 10 дБ и $\mu = Fs/\Delta f = 2,3$ максимальная ошибка измерения крутизны составляет 25,7 %, а при увеличении μ до 11 ошибка снижается до 8,8 %.

Список литературы

1. Куприянов А.И., Сахоров А.В. *Теоретические основы радиоэлектронной борьбы*. Москва: Радио и связь; 2007.
2. Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*. 1946;93(III):429-457.
3. Xue Chen Qin, Zhen Feng Pan, Jia Qi Zhang, A Digital Implementation of Delay Relevant Frequency Measurement Technology Based on CORDIC Algorithm. *Proceedings of the 2015 International Conference on Education, Management and Medicine*; 2015:1087-1091. DOI: 10.2991/emim-15.2015.207.
4. Лайонс Р. *Цифровая обработка сигналов*. Москва: Бинном; 2006.

References

1. Kupriyanov A.I., Shorov A.V. [*Theoretical foundations of electronic warfare*]. Moscow: Radio i svyz' Publ.; 2007. (In Russ.)
2. Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*. 1946;93(III):429-457.
3. Xue Chen Qin, Zhen Feng Pan, Jia Qi Zhang, A Digital Implementation of Delay Relevant Frequency Measurement Technology Based on CORDIC Algorithm. *Proceedings of the 2015 International Conference on Education, Management and Medicine*; 2015:1087-1091. DOI: 10.2991/emim-15.2015.207.
4. Lyons R. [*Understanding digital signal processing*]. Moscow: Binom Publ.; 2006. (In Russ.)

Сведения об авторах

Архипенков Д.В., инженер отдела обработки сигналов и информации ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Information about the authors

Arkhipenkov D.V., engineer of the signal and information processing department of JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Партизанский, 64а;
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»;
тел.: +375 29 260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,
Minsk, Partizanskij Ave., 64a;
JSC “KB Radar” – Managing Company
of “Radar Systems” Holding;
tel.: +375 29 260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-30-36>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 623.618

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ, ОСНОВАННОГО НА МЕТОДЕ ВЫЧИТАНИЯ ФОНА, В СКАНИРУЮЩЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Е.И. МИХНЁНОК, А.В. ХИЖНЯК

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

Поступила в редакцию 6 мая 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье рассмотрен разработанный авторами подход к адаптации алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, к работе в сканирующей оптико-электронной системе наблюдения. Данный алгоритм лежит в основе разработанного способа обработки изображений применительно к задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения тепловизионного типа. При этом данный способ обеспечивает решение задач по охране критически важного объекта оптико-электронной системой наблюдения, которая должна функционировать как в неподвижном, так и в сканирующем режиме. Использование для построения модели фона усовершенствованной смеси гауссовых распределений позволяет производить адаптацию к периодическим изменениям яркости пикселей от динамических элементов фона наблюдаемой сцены. Однако применение данного алгоритма обнаружения в сканирующей оптико-электронной системе требует решение следующих проблемных вопросов: исключение ложного выделения в передний план областей обрабатываемого изображения при переносе поля зрения датчика; устранение ошибки в начальных значениях параметров смеси гауссовых распределений. Применение предлагаемого авторами подхода к решению данных вопросов реализовано в специализированной оптико-электронной системе наблюдения и позволяет достичь такого же качества работы обнаружителя, основанного на методе вычитания фона, в сканирующем режиме, как и в неподвижном.

Ключевые слова: обнаружение движущихся объектов, оптико-электронная система наблюдения, сканирующий режим.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Михнёнок Е.И., Хижняк А.В. Особенности применения алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, в сканирующей оптико-электронной системе наблюдения. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 30-36.

FEATURES OF THE APPLICATION OF THE DETECTION ALGORITHM BASED ON THE BACKGROUND SUBTRACTION METHOD IN THE SCANNING OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM

EVGENY I. MIKHNIIONOK, ALEXANDER V. KHIZNIAK

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

Submitted 6 May 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article considers the approach developed by the authors to adapt the detection algorithm based on the background subtraction method to work in a scanning optoelectronic surveillance system. This algorithm is the basis of the developed image processing method applied to the problem of detecting moving objects by an optoelectronic thermal imaging surveillance system. At the same time, this method provides a solution to the tasks of protecting a critical object with an optoelectronic surveillance system, which must function both in stationary and scanning mode. The use of an improved mixture of Gaussian distributions to build a background model makes it possible to adapt to periodic changes in pixel brightness from dynamic background elements of the observed scene. However, the application of this detection algorithm in a scanning optoelectronic system requires the solution of the following problematic issues: the exclusion of false highlighting of the areas of the processed image in the foreground when transferring the sensor field of view; the elimination of errors in the initial values of the parameters of a mixture of Gaussian distributions. The application of the approach proposed by the authors to solving these issues is implemented in a specialized optoelectronic surveillance system and allows achieving the same quality of the detector based on the background subtraction method in scanning mode as in stationary mode.

Keywords: detection of moving objects, optical-electronic surveillance system, scanning mode.

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

For citation. Mikhniionok E.I., Khizniak A.V. Features of the Application of the Detection Algorithm Based on the Background Subtraction Method in the Scanning Optoelectronic Surveillance System. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 30-36.

Введение

В настоящее время для решения различных задач все более широкое применение получают оптико-электронные системы наблюдения. В отдельных случаях условия решения конкретных задач определяют необходимость применения специализированных алгоритмов обработки информации. Существующее в настоящее время многообразие разработанных алгоритмов говорит о том, что все они характеризуются своими достоинствами и недостатками в конкретных условиях применения. Поэтому определение подходов к применению алгоритмов обнаружения в несвойственных им ранее задачах с сохранением их достоинств является актуальной задачей. Целью данной статьи является описание примененного подхода к адаптации алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, к работе в сканирующей оптико-электронной системе наблюдения. Применение алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, реализованного в разработанной при участии авторов оптико-электронной системе наблюдения, предполагает дискретное перемещение поля зрения датчика в заданном секторе сканирования.

Специфика решаемой задачи

Проблеме обнаружения объектов оптико-электронными системами наблюдения уделено огромное внимание в научной литературе. Порядок решения задачи обнаружения, конкретные условия функционирования системы наблюдения, степень участия человека в процессе

принятия решения об обнаружении, характеристики датчиков лежат в основе выбора приемлемого подхода к обнаружению объектов интереса. При этом разработка конкретных систем автоматического обнаружения определяет учет ряда особенностей: в большинстве случаев необходимо решать задачу, которая сводится к обнаружению на изображении определенного перечня заранее известных объектов; алгоритмы обработки изображений должны удовлетворять требованиям, связанным с назначением и характеристиками разрабатываемой системы обнаружения; методы обнаружения должны быть устойчивы к различным дестабилизирующим факторам, характерным только для изображений (искажения оптических сенсоров, блики, затенения, загромождения, искажения формы и др.).

Однако несмотря на существующие достижения в отдельных областях применения принятие конечного решения об обнаружении остается за человеком. Данный принцип принятия решения во многом оправдан, так как цена ошибки может оказаться достаточно велика.

В данной работе авторами рассматривается задача автоматического обнаружения потенциального нарушителя критически важного объекта. Специфика решаемой задачи определяет, что интерес представляют движущиеся объекты типа «человек», «транспортное средство». При этом конечное решение об обнаружении принимается человеком, что позволяет смягчить требования к используемым алгоритмам обнаружения, а системе автоматического обнаружения необходимо только привлечь внимание оператора к определенному участку наблюдаемой сцены.

Учет данных особенностей определяет для оптико-электронной системы (ОЭС) возможность применения алгоритмов автоматического обнаружения без распознавания обнаруженного объекта, однако с высокими вероятностями обнаружения всех движущихся объектов на наблюдаемой сцене. Классификация алгоритмов обнаружения движущихся объектов на изображениях представлена на рис. 1.

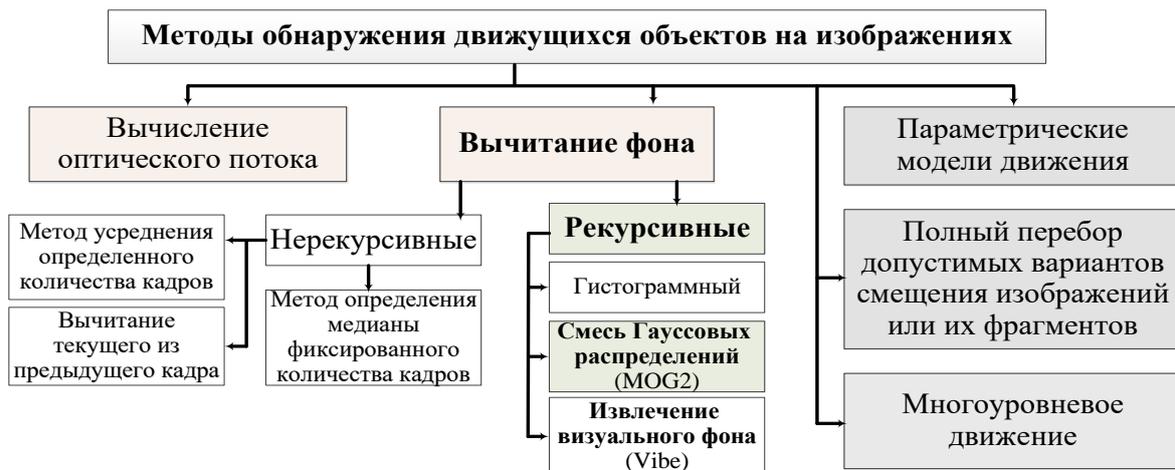


Рис. 1. Классификация алгоритмов обнаружения движущихся объектов на изображениях
Fig. 1. Classification of algorithms for detecting moving objects in images

Анализ данных алгоритмов показал, что решение вышеуказанной задачи в реальном масштабе времени реализуется алгоритмами, основанными на методе вычисления оптического потока или методе вычитания фона. Стоит отметить, что конечная реализация алгоритмов обнаружения, построенных на методе вычисления оптического потока, является достаточно ресурсозатратной. Поэтому рассмотрены алгоритмы обнаружения, основанные на методе вычитания фона. Эффективность работы данного метода зависит от правильности построения модели фона. Существует две группы методов построения модели фона: нерекурсивные и рекурсивные.

Особенность нерекурсивных методов заключается в том, что для построения модели фона используется информация об интенсивностях пикселей некоторого набора предшествующих кадров и текущего кадра. К данной группе относятся: метод вычитания текущего и предыдущего кадра; метод усреднения определенного количества предшествующих кадров; метод определения медианы фиксированного количества предшествующих кадров.

Преимуществом данной группы методов является простота реализации и скорость обновления модели фона. Однако эффективность их работы зависит от скорости движения объектов интереса (объекты с малой скоростью обнаруживаются плохо). Также они плохо адаптируются к изменениям освещения сцены и наличия динамических элементов фона (листва деревьев, ковыль и т. д.).

Рекурсивные методы для построения модели фона используют информацию об интенсивностях пикселей только текущего кадра. К методам данной группы относятся: гистограммный метод; метод представления модели фона смесью гауссовых распределений (Gaussian mixture model, GMM) и его модификации [1]; метод извлечения визуального фона (Visual Background Extractor, ViBe) [2].

Проведенные экспериментальные исследования данной группы методов показали:

1. Существует ряд проблемных вопросов, касающихся реализации гистограммного метода: определение порога обнаружения; использование дополнительной памяти; большое количество операций обращения к памяти.

2. Метод извлечения визуального фона показывает достаточно хорошие результаты обнаружения объектов интереса, однако характеризуется большим временем инициализации своей работы (порядка 20 кадров).

3. При переносе поля зрения датчика ОЭС наблюдения происходит ложное выделение в передний план пикселей наблюдаемой сцены, не относящихся к объектам интереса. Данный процесс характерен как для метода извлечения визуального фона, так и для метода представления модели фона смесью гауссовых распределений.

На рис. 2 представлен пример данного процесса. Из рисунка видно, что при переносе поля зрения датчика (211 – 295 кадр) происходит неправильная сегментация пикселей обрабатываемых изображений (рис. 2, *a, d*). При прекращении движения датчика (кадр № 296) производится обнаружение движущихся объектов на анализируемых изображениях (рис. 2, *b, e*).

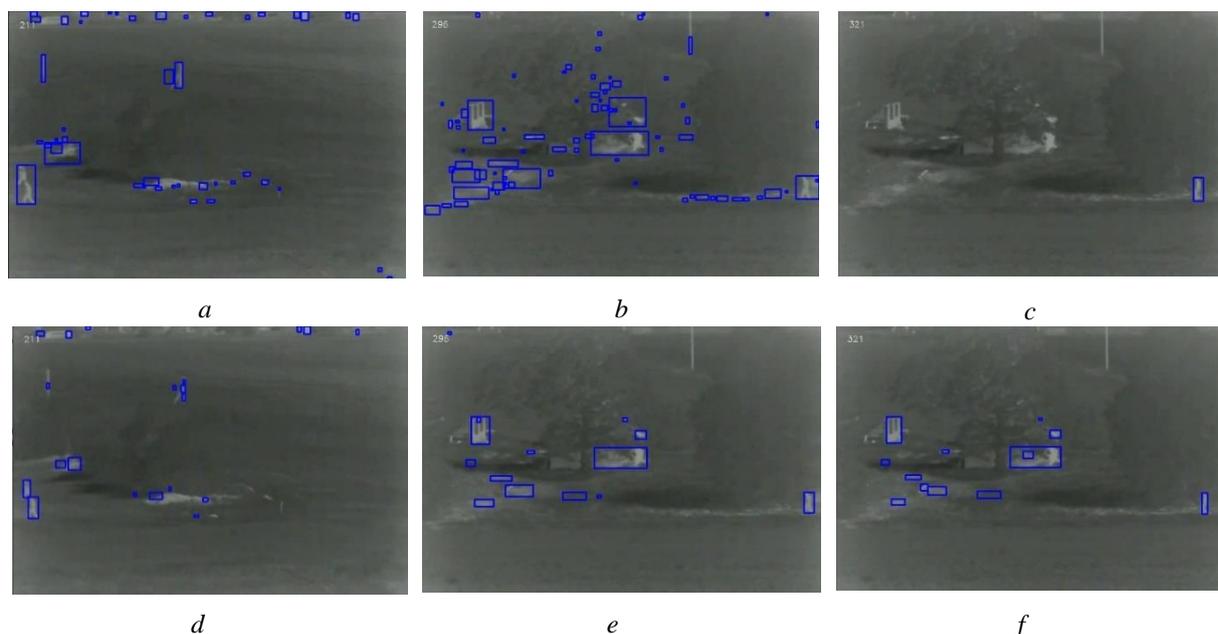


Рис. 2. Примеры работы исследуемых методов: 211 кадр (*a* – MOG2, *d* – Vibe); 296 кадр (*b* – MOG2, *e* – Vibe); 321 кадр (*c* – MOG2, *f* – Vibe)

Fig. 2. Examples of the methods under study: 211 frame (*a* – MOG2, *d* – Vibe); 296 frame (*b* – MOG2, *e* – Vibe); 321 frame (*c* – MOG2, *f* – Vibe)

Применение данных алгоритмов обнаружения в сканирующих ОЭС наблюдения существенно повышает значение вероятности ложной тревоги при переносе поля зрения датчика ввиду ложного выделения в передний план областей обрабатываемого изображения. Данный эффект уменьшается с течением времени по мере автоматической подстройки модели фона изображения. Для данного примера адаптация модели фона метода MOG2 составила 31 кадр (рис. 2, *c*), а метода Vibe – 490 кадров (рис. 2, *f*).

4. Алгоритмы обнаружения, основанные на методе вычитания фона, с высокой эффективностью обеспечивают обнаружение движущихся объектов на наблюдаемой статической сцене. Однако применение данных алгоритмов в сканирующих ОЭС наблюдения требует их доработки в целях уменьшения количества ложных срабатываний, вызванных переносом поля зрения датчика, а также обеспечения требуемого качества их работы.

Описание разработанного подхода

В рамках выполняемых исследований авторами разработан способ обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов в ОЭС наблюдения тепловизионного типа [3]. Данный способ обеспечивает решение задач ОЭС охраны критически важного объекта. Особенности применения данной ОЭС определяют необходимость анализа наблюдаемой фоноцелевой обстановки как в неподвижном режиме, так и в сканирующем. При этом преимущественно осуществляется наблюдение в определенном направлении, а сканирование – в секторе до 180° [4].

Обнаружение движущихся объектов обеспечивается использованием алгоритма, основанного на методе вычитания фона, в котором модель фона строится методом представления фонового изображения усовершенствованной смесью гауссовых распределений (Mixture of Gaussian 2, MOG2) [5]. Данный метод позволяет построить модель фона, которая адаптируется к периодическим изменениям яркости пикселей от динамических элементов фона наблюдаемой сцены. Для учета моделью нескольких составляющих фона используется смесь гауссовых распределений, которая представляет собой сумму взвешенных нормальных распределений (1).

$$B_{x,y} = \sum_{k=1}^K \omega_k \cdot N(I_{x,y}, \mu_k, \sigma_k^2), \quad (1)$$

где ω_k – вес k -го распределения; μ_k – математическое ожидание k -го распределения; σ_k – среднее квадратическое отклонение k -го распределения; $I_{x,y}$ – значение яркости пикселя с координатами x,y ; $N(I_{x,y}, \mu_k, \sigma_k^2)$ – функция плотности нормального распределения яркости пикселя; K – количество распределений в смеси.

Основными параметрами, характеризующими распределение (выражение (1)), являются: вес распределения, математическое ожидание значения яркости пикселя, среднее квадратическое отклонение значения яркости пикселя. Получение и уточнение значений данных параметров для неподвижного датчика осуществляется в процессе работы обнаружителя. Однако при работе в сканирующей системе движение датчика вносит значительные ошибки в начальные значения данных параметров, что повышает уровень ложных тревог.

Так как решение об обнаружении принимается для текущего кадра, то в целях адаптации алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, для работы в сканирующих ОЭС наблюдения предложено осуществлять отключение работы обнаружителя при переносе поля зрения датчика. Данная возможность реализована в разработанном способе обработки изображений [3].

В свою очередь, отключение работы обнаружителя требует каждый раз после переноса поля зрения накопления статистики значений параметров распределений для инициализации работы обнаружителя. При небольших временах анализа участка сектора сканирования получаемые значения параметров распределений имеют достаточно низкую достоверность.

В целях устранения данного недостатка в ОЭС реализована возможность предварительной подготовки системы к работе. Она заключается в следующем: сектор наблюдения, в котором будет осуществляться поиск объектов интереса, определен заранее решением на охрану объекта. Для каждого участка заданного сектора осуществляется анализ наблюдаемой фоноцелевой обстановки и определение значений параметров смеси Гауссовых распределений в течение 45 с. Данное время наблюдения позволяет получить значения параметров распределений с доверительным интервалом 5 % и доверительной вероятностью 0,9.

В данном случае при переносе поля зрения датчика время для инициализации работы обнаружителя не требуется, так как в качестве начальных параметров смеси распределений используются значения, полученные при предварительной подготовке к работе ОЭС. При этом данные значения уточняются с каждым последующим анализом наблюдаемого участка сектора, что позволяет достичь качества работы обнаружителя, как для неподвижного датчика (рис. 3).

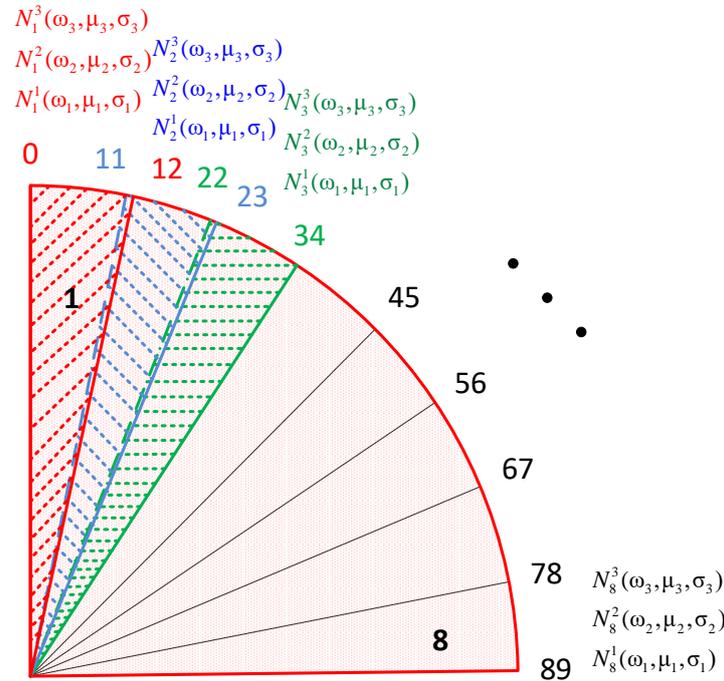


Рис. 3. Пример определения параметров распределений для сектора сканирования 89°
Fig. 3. Example of determining distribution parameters for the 89° scan sector

Заключение

Реализованное в разработанном способе обработки изображений применительно к задаче автоматического обнаружения движущихся объектов отключение работы обнаружителя при переносе поля зрения датчика оптико-электронной системы наблюдения позволяет исключить ложное выделение в передний план областей обрабатываемого изображения, а также минимизировать ошибки в начальных значениях параметров смеси гауссовых распределений.

Выполнение этапа предварительной подготовки системы наблюдения к работе позволяет добиться такого же качества работы обнаружителя, основанного на методе вычитания фона, в сканирующем режиме, как в неподвижном. Проведенные экспериментальные исследования работы обнаружителя в естественных условиях в рамках опытной эксплуатации разработанной оптико-электронной системы показали, что вероятность правильного обнаружения при работе в сканирующем режиме составляет не менее 0,98.

Список литературы

1. Zivkovic Z. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. *IEEE Proceedings of the 17th International Conference*. 2004;28-31.
2. Barnich O. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011;20(6):1709-1724.
3. Михнёнок Е.И. Способ обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах наблюдения тепловизионного типа. *Доклады БГУИР*. 2020;18(2):96-104.
4. Михнёнок Е.И., Хижняк А.В. Режимы функционирования поста технического наблюдения и оценка эффективности его применения в составе интегрированной системы охраны Государственной границы. *Сборник научных трудов НИИ Вооруженных Сил*. 2019;1(8):157-166.

5. Заливин А.Н., Балабанова Н.С. Обнаружение движущихся объектов методом вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений. *Автоматизированные технологии и производства*. 2016;3:45-48.

References

1. Zivkovic Z. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. *IEEE Proceedings of the 17th International Conference*. 2004;28-31.
2. Barnich O. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011;20(6):1709-1724.
3. Mikhniionok E.I. [Method of image processing in the problem of detecting moving objects in optical-electronic surveillance systems of thermal imaging type]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2020;18(2): 96-104. (In Russ.)
4. Mikhniionok E.I., Khizniak A.V. [The modes of operation of the technical surveillance post and the evaluation of the effectiveness of its use as part of the integrated system of State border protection]. *Sbornik nauchnyh trudov NII Vooruzhennyh Sil*. 2019;1(8):157-166. (In Russ.)
5. Zalivin A.N., Balabanova N.S. [Detecting moving objects by subtracting the background using a mixture of Gaussian distributions]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva = Automated Technologies and Production*. 2016;3:45-48. (In Russ.)

Вклад авторов

Хижняк А.В. осуществил постановку задачи для проведения исследования.

Михнёнок Е.И. реализовал адаптацию алгоритмов обнаружения, основанных на методе вычитания фона для работы в сканирующих оптико-электронных системах наблюдения.

Authors' contribution

Khizniak Alexander V. carried out the formulation of the task for the research.

Mikhniionok E.I. implemented the adaptation of detection algorithms based on background subtraction to work in scanning optoelectronic surveillance systems.

Сведения об авторах

Михнёнок Е.И., начальник 2 группы НИЛ факультета связи и автоматизированных систем управления учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Хижняк А.В., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник 2 группы НИЛ факультета связи и автоматизированных систем управления учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Information about the authors

Mikhniionok E.I., Head of the 2nd Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Khizniak A.V., Cand. Of Sci., Professor Assistant, Senior Researcher of the 2nd Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375 29 291-27-36;
e-mail: actosum@gmail.com
Михнёнок Евгений Игоревич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus;
tel. +375-29-291-27-36;
e-mail: actosum@gmail.com
Mikhniionok Evgeny Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

ОБНАРУЖЕНИЕ КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ ПОМОЩИ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, О.В. КОЧЕРГИНА, Т.А. МАТКОВСКАЯ

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

Поступила в редакцию 10 мая 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В настоящее время для передачи данных широко используют волоконно-оптические линии связи. Несмотря на то, что информационный сигнал распространяется внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой, существуют различные методы формирования каналов утечки информации из таких волокон. Одним из наиболее распространенных способов обнаружения канала утечки информации является контроль мощности информационных сигналов, транслируемых по оптическому волокну. В данной работе определены параметры волоконно-оптической линии связи на основе многомодовых оптических волокон, для которых можно использовать кремниевые фотоумножители для обнаружения каналов утечки информации. Представлены зависимости ответвляемой мощности от диаметра изгиба волокна. Получено, что увеличение диаметра изгиба приводит к уменьшению ответвляемой мощности и снижению способности обнаружения фотоприемником потери мощности на оптоволокне. Величина ответвляемой мощности оптического излучения с длиной волны 850 нм больше, чем для 650 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба. Установлено, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет обеспечить обнаружение потери мощности до $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм и $-0,142$ дБ для длины волны 650 нм. Результаты этой статьи могут найти применение в системах защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи.

Ключевые слова: информационная безопасность, канал утечки информации, многомодовое оптическое волокно, контроль мощности информационных сигналов, волоконно-оптические линии связи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового оптического волокна при помощи кремниевого фотоумножителя. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 37-44.

DETECTION OF THE INFORMATION LEAKAGE CHANNEL FROM MULTIMODE OPTICAL FIBER USING A SILICONE PHOTOMULTIPLIER

IVAN R. GULAKOV, ANDREY O. ZENEVICH, OLGA V. KOCHERGINA,
TATIANA A. MATKOVSKAIA

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

Submitted 10 May 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Currently, fiber-optic communication lines are widely used for data transmission. Despite the fact that the information signal propagates inside the optical fiber, covered with a protective shell, there are various ways to form information leakage channels from such fibers. The power control of the information signals transmitted over an optical fiber is one of the most common ways to detect an information leakage channel. This paper determines the parameters of a fiber-optic communication line based on multimode optical fibers for which silicon photomultipliers to detect information leakage channels can be used. The dependences of the branched power on the fiber bending diameter are presented. It has been found that the bending diameter increase leads to the branched power decrease and a decrease in the ability of the photodetector to detect power loss in the optical fiber. The value of the branched power of optical radiation with a wavelength of 850 nm is greater than for 650 nm for all studied bending diameters. It has been established that an increase in the optical radiation power introduced into the fiber to 10 mW makes it possible to detect power loss up to -0.005 dB for an optical radiation wavelength of 850 nm, and -0.142 dB for a wavelength of 650 nm. The results of this article can be used in systems for protecting information transmitted over fiber-optic communication lines.

Keywords: information security, information leakage channel, multimode optical fiber, information signal power control, fiber-optic communication lines.

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

For citation. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaia T.A. Detection of the Information Leakage Channel from Multimode Optical Fiber Using a Silicone Photomultiplier. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 37-44.

Введение

Для передачи данных в настоящее время находят широкое применение волоконно-оптические линии связи, в которых оптические информационные сигналы распространяются внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой [1–3]. Несмотря на защитную оболочку известны различные способы формирования каналов утечки информации [4]. Поэтому обеспечение информационной безопасности волоконно-оптических линий связи является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо разрабатывать способы, позволяющие обеспечивать защиту информации, транслируемой по таким линиям связи. Одним из наиболее распространенных способов обнаружения канала утечки информации является контроль мощности информационных сигналов, транслируемых по оптическому волокну [5, 6]. Следует отметить, что большинство известных методов используется для защиты одномодовых оптических волокон [7], однако для передачи данных используются и многомодовые оптические волокна. При передаче данных в многомодовых оптических волокнах применяется длина волны излучения 850 нм [8]. Поэтому для обнаружения каналов утечки информации в многомодовых оптических волокнах возможно использование кремниевых фотоприемников, которые по сравнению с другими фотоприемниками обладают высокой чувствительностью к излучению с такой длиной волны и низким темновым током. Наиболее перспективными среди кремниевых фотоприемников являются кремниевые многоэлементные лавинные фотоприемники, которые получили название кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ). Это обусловлено тем, что Si-ФЭУ обладают достаточно большими коэффициентами усиления ($\geq 10^5$) и имеют большие площади

фоточувствительной площадки (до $6 \times 6 \text{ мм}^2$) по сравнению с другими типами лавинных фотоприемников [9].

Таким образом, целью данной работы является определение возможности использования кремниевых фотоумножителей для обнаружения каналов утечки информации из многомодового оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые многомодовые оптические волокна G651. Данные оптические волокна были выбраны для исследований, поскольку они достаточно часто используются в оптических кабелях. Также в качестве объекта исследований использовались кремниевые фотоумножители производства ОАО «Интеграл» КОФ5-1035. Для проведения измерений из партии в 10 штук случайным образом были отобраны три Si-ФЭУ.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом (рис. 1): от источника излучения ИО в волокно ОВ вводится оптическое излучение с длиной волны 650 или 850 нм. Эти длины волн соответствуют области спектральной чувствительности Si-ФЭУ. Излучение с длиной волны 850 нм используется для передачи данных по многомодовому оптическому волокну, а с длиной волны 650 нм применяется для визуального поиска дефектов в оптическом волокне. Мощность вводимого в волокно оптического излучения могла изменяться в пределах от 0,5 до 10 мВт. К выходу волокна ОВ подключен измеритель ИМ для определения мощности излучения на выходе из волокна. Длина оптического волокна ОВ составляла 550 м, что соответствует максимальной длине оптического волокна, которая используется для реализации технологий Ethernet [10] для объектовых линий связи. Отметим, что эти технологии в настоящее время широко используются для передачи данных. Вблизи выхода волокна ОВ формируется изгиб, представляющий собой окружность. Диаметр этого изгиба можно изменять в пределах от 5 до 30 мм. Отметим, что при диаметре изгиба d меньшем 5 мм может произойти излом оптического волокна, а при $d > 30$ мм затухание мощности на изгибе оптического волокна мало и им можно пренебречь.

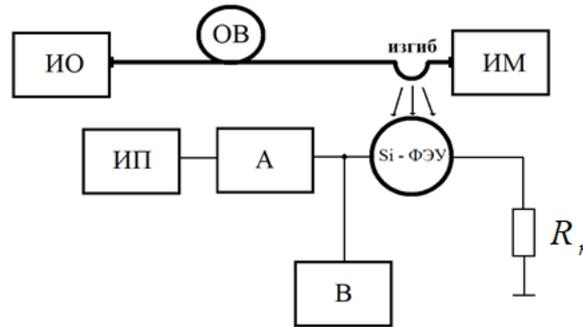
В области изгиба оптического волокна происходит выход транслируемого оптического излучения за пределы волокна ОВ. Это излучение регистрируется при помощи Si-ФЭУ.

На Si-ФЭУ подается напряжение обратного смещения U_n от источника постоянного напряжения ИП, общее для всех его элементов. Для работы кремниевого фотоумножителя используются напряжения питания, превышающие напряжения пробоя p - n -перехода [9, 11]. В этом случае происходит лавинное усиление первичных свободных носителей заряда (самогасящийся лавинный процесс), возникающих внутри области пространственного заряда отдельного элемента при поглощении оптического излучения или в результате тепловой генерации носителей, и появление электрического сигнала на выходе Si-ФЭУ. Протекание электрического тока через резистор R_n вызывает падение напряжения на сработавшем фоточувствительном элементе, что приводит к гашению лавинного процесса и локализации его в пределах засвеченных элементов, при этом остальная часть элементов остается в рабочем состоянии, готовом к регистрации излучения. Через время τ , зависящее от конструкции Si-ФЭУ, напряжение на сработавшем элементе восстанавливается до первоначального значения, и элемент снова становится чувствительным к оптическому излучению. Вклад в электрический сигнал на выходе Si-ФЭУ вносит каждый сработавший элемент.

Величина напряжения питания контролируется при помощи вольтметра В. Амперметр А используется для определения электрического тока I , протекающего через Si-ФЭУ.

Для ограничения величины тока I применяется резистор нагрузки R_n , который включен последовательно с Si-ФЭУ. Величина сопротивления резистора нагрузки $R_n = 1 \text{ кОм}$.

При проведении исследований определяется фототок I_ϕ . Для этого измеряются величины электрического тока I_m и I , протекающего через Si-ФЭУ в отсутствие оптического излучения в волокне и при его наличии соответственно. После чего фототок вычисляется по формуле $I_\phi = I - I_m$. По величине фототока определялась мощность оптического излучения, поступающего на Si-ФЭУ, $P_\phi = S \cdot I_\phi$, где S – чувствительность Si-ФЭУ.



ИО – источник оптического излучения; ИМ – измеритель мощности; ИП – источник постоянного напряжения; А – амперметр; В – вольтметр; R_n – резистор нагрузки; Si-ФЭУ – кремниевый фотоумножитель
ИО – optical power source; ИМ – power optical measurer; ИП – constant voltage source; А – ammeter; В – voltmeter; R_n – load resistor; Si-ФЭУ – silicon photomultiplier

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки
Fig. 1. Block diagram of the experimental setup

Чувствительность фотоприемника S определяется по методике, описанной в ГОСТ 17772, на линейном участке зависимости мощности оптического излучения P_ϕ от тока I_ϕ . Для получения этой зависимости на Si-ФЭУ подается оптическое излучение заданной мощности с выхода волокна ОВ. Оптическое излучение заданной мощности создавалось за счет изменения диаметра изгиба. Перед направлением оптического излучения с выхода волокна ОВ на Si-ФЭУ, мощность этого излучения определялась измерителем мощности ИМ.

Исследования были выполнены при комнатной температуре окружающей среды $T = 293$ К. При проведении экспериментальных исследований определялась потеря мощности излучения на изгибе оптического волокна D_n . Для этого использовалась следующая формула:

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

где P – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ без изгиба оптического волокна; P_ϵ – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ при наличии изгиба оптического волокна.

Также в процессе исследования определялась величина D_ϵ ответвления мощности оптического излучения с изгиба (см. рис. 1). Эта величина вычисляется на основании выражения

$$D_\epsilon = 10 \lg \left(\frac{SI_\phi}{P} \right). \quad (2)$$

При проведении исследований определялась способность обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне D_o . Под величиной D_o понимается минимальное значение дополнительных потерь мощности оптического излучения, вносимых подключением несанкционированного пользователя к волокну, которое возможно зарегистрировать. На основании работы [10] для определения D_o можно предложить следующую формулу:

$$D_o = 10 \lg \left(1 - \frac{P_n 10^{-0,1(D_n + \alpha L)}}{P_0} \right), \quad (3)$$

где P_n – пороговая мощность фотоприемного устройства; P_0 – мощность оптического излучения, поступающая на вход оптического волокна; α – коэффициент затухания оптического излучения в волокне; L – расстояние от входа оптического волокна до места формирования изгиба (изгиб формировался в конце ОВ).

Отметим, что для случая, когда $\frac{P_n 10^{-0,1(D_n + \alpha L)}}{P_0} \geq 1$, обнаружить дополнительные потери мощности оптического излучения, вносимые подключением несанкционированного пользователя к волокну, не представляется возможным.

Результаты измерений и их обсуждение

В процессе проведения исследований были определены напряжения питания Si-ФЭУ, при которых чувствительность максимальна, и характеристики фотоприемников при указанных напряжениях. Полученные характеристики Si-ФЭУ для данного напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики кремниевого фотоумножителя
Table 1. Characteristics of a silicon photomultiplier

Тип Si-ФЭУ Si-PMT type	Напряжение питания, В Supply voltage, V	Длина волны, нм Wavelength, nm	Чувствительность, А/Вт Sensitivity, A/W	Пороговая мощность, Вт Threshold power, W
КОФ5-1035	31,0	650	0,08	$5,1 \cdot 10^{-9}$
		850	0,01	$13,0 \cdot 10^{-9}$

Как следует из представленных зависимостей, уменьшение диаметра изгиба d приводило к уменьшению величины D_n . Отметим, что для длины волны оптического излучения 650 нм величина D_n была больше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба. Это подтверждается зависимостью коэффициента затухания от длины волны для оптических волокон, приведенной в работе [12]. Данные о коэффициентах затухания оптического излучения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры оптического волокна
Table 2. Optical fiber parameters

Оптическое волокно Optical fiber	Длина волны, нм Wavelength, nm	Коэффициент затухания, дБ/км Attenuation coefficient, dB/km
G651	650	-3,5
	850	-3,0

На рис. 2, *a* представлены зависимости потери мощности излучения на изгибе оптического волокна D_n от диаметра изгиба d . Как следует из представленных зависимостей, уменьшение диаметра изгиба d приводило к уменьшению величины D_n . Отметим, что для длины волны оптического излучения 650 нм величина D_n была больше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

На рис. 2, *b* показаны полученные зависимости величины D_b ответвления мощности оптического излучения с изгиба от диаметра изгиба d . Как следует из полученных результатов, увеличение диаметра изгиба приводит к уменьшению величины D_b . Для длины волны оптического излучения 650 нм значение D_b было меньше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

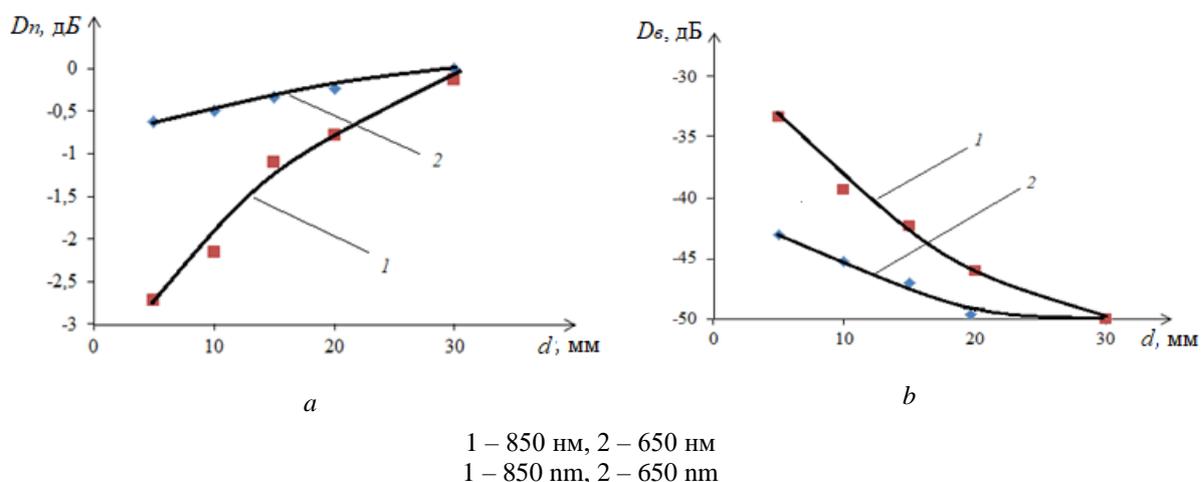


Рис. 2. Зависимость потери мощности на изгибе и величины ответвленной мощности от диаметра изгиба:
a – потери мощности на изгибе; *b* – величина ответвленной мощности
Fig. 2. Dependence of the bending power loss and the magnitude of the branch power on the bending diameter:
a – bending power loss; *b* – the amount of branched power

На рис. 3 представлена зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от мощности оптического излучения, поступающей на вход оптического волокна.

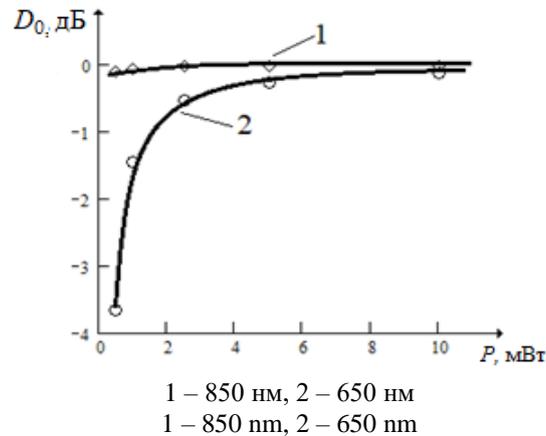


Рис. 3. Зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от мощности оптического излучения, вводимой в волокно

Fig. 3. Dependence of the ability to detect additional power losses in an optical fiber on the power of optical radiation injected into the fiber

Из полученных зависимостей следует, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет обеспечить способность обнаружения потери мощности на выходе до $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм. Для длины волны 650 нм было получено наименьшее значение величины $D_0 = -0,142$ дБ.

На рис. 4 представлена зависимость величины D_0 от диаметра изгиба оптического волокна. Данные зависимости были получены для вводимой в волокно мощности оптического излучения 1 мВт. Такая мощность для проведения исследования была выбрана, поскольку она соответствовала максимальной мощности, применяемой в технологиях Ethernet для многомодового оптического волокна [10]. Увеличение диаметра изгиба приводило к уменьшению величины D_0 как для длины волны 650 нм, так и для 850 нм. При длине волны 650 нм и диаметрах изгиба более 20 мм обнаружить какое-либо изменение мощности оптического излучения в волокне не представлялось возможным. Наибольшие величины D_0 во всем диапазоне исследуемых диаметров изгиба наблюдаются для длины волны 850 нм, чем для длины волны 650 нм. Максимальное значение D_0 получено при диаметре изгиба 5 мм для этих длин волн. Так, для длины волны 650 нм это значение составляло $-0,6$ дБ, а для 850 нм оно было равно $-0,04$ дБ.

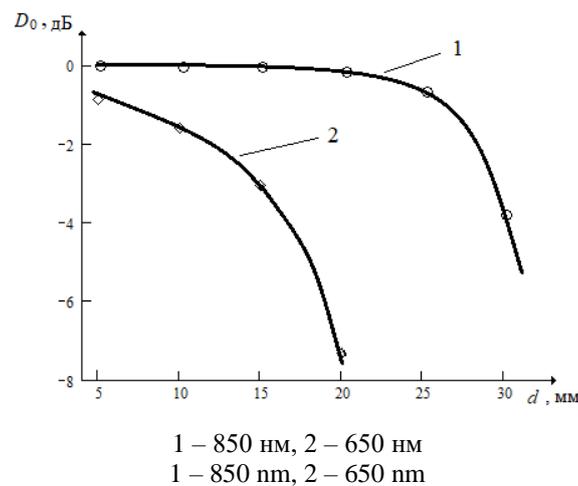


Рис. 4. Зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от диаметра изгиба оптического волокна

Fig. 4. Dependence of the ability to detect additional power losses in an optical fiber on the bending diameter of the optical fiber

Заключение

Получено, что уменьшение диаметра изгиба многомодового оптического волокна приводит к увеличению величины ответвляемой мощности оптического излучения. Для длины волны оптического излучения 650 нм величина ответвляемой мощности меньше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

Установлено, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет получить способность обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне, равную $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм. Для длины волны 650 нм наибольшее значение способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне составило $-0,142$ дБ.

Определено, что увеличение диаметра изгиба приводило к уменьшению способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне. Наибольшее значение этой величины во всем диапазоне исследуемых диаметров изгиба наблюдается для длины волны 850 нм.

Список литературы

1. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002.
2. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы*. Москва: Техносфера; 2010.
3. Убайдуллаев Р.Р. *Волоконно-оптические сети*. Москва: Эко-Трендз; 2001.
4. Зеневич А.О. *Обнаружители утечки информации из оптического волокна*. Минск: Белорусская государственная академия связи; 2017.
5. Манько А., Каток В., Задорожний М. Защита информации на волоконно-оптических линиях связи от несанкционированного доступа. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. 2001;2:249-255.
6. Грашачев В. Фотоника в системах безопасности и защиты информации *Фотоника*. 2011;6:58-63.
7. *Способ обнаружения несанкционированных отводов сигнала с одномодовых оптических волокон*: патент 2506701, Российская Федерация, МПК G01M11/00. Заявитель и патентообладатель ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. № 2012133005/28; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.02.2014. Официальный бюллетень. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2014;4:1-9.
8. Складов О.К. *Волоконно-оптические сети и системы связи*. С.-Петербург: Издательство «Лань»; 2021.
9. Stagliano M., Abegão L., Chierici A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH - International Journal of Science and Engineering*. 2018;10:10-29.
10. Шубин В. В. *Информационная безопасность волоконно-оптических систем*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2015.
11. Клемин С. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности. *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. 2007;8:80-86.
12. Листвин А.В. Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон*. Москва: ЛЕСАПарт; 2005.

References

1. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. [*Fiber-optic technology: current state and new prospects*]. Moscow: Technosphaera; 2010. (In Russ.)
3. Ubaidullaev R.R. [*Fiber-optic networks*]. Moscow: Eco-Trends; 2001. (In Russ.)
4. Zenevich A.O. [*Detectors of information leakage from optical fiber*]. Minsk: Belarusian State Academy of Communications; 2017. (In Russ.)
5. Manko A., Katok V., Zadorozhnyi M. [Protection of information on fiber-optic communication lines from unauthorized access]. *Legal, normative and metrological support of the information protection system in Ukraine*. 2001;2:249-255. (In Russ.)
6. Grashachev V. [Photonics in security and information protection systems]. *Photonics*. 2011;6:58-63. (In Russ.)
7. [*Method for detecting unauthorized signal taps from single-mode optical fibers*]: Pat. 2506701 Russian Federation, IPC G01M11/00. Applicant and patentee Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIIEF. No. 2012133005/28; dec. 08/01/2012; publ. 02/10/2014. Official Bull. Federal Service for Intellectual Property. 2014;4:1-9. (In Russ.)

8. Sklyarov O.K. [*Fiber-optic networks and communication systems*]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021. (In Russ.)
9. Stagliano M., Abegãob L., Chierici A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH - International Journal of Science and Engineering*. 2018;10:10-29.
10. Shubin V.V. [*Information security of fiber-optic systems*]. Sarov: RFNC-ARRIEP; 2015. (In Russ.)
11. Klemin S. [Silicon photomultiplier. New opportunities]. *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*. 2007;8:80-86. (In Russ.)
12. Listvin A.V. Listvin V.N. [*Reflectometry of optical fibers*]. Moscow: LESARart; 2005. (In Russ.)

Вклад авторов

Гулаков И.Р. разработал методику проведения исследования, принял участие в интерпретации его результатов, подготовил статью к опубликованию.

Зеневич А.О. осуществил научное руководство исследованием, сформулировал научные гипотезы, проверенные посредством эксперимента, принял участие в интерпретации результатов исследования.

Кочергина О.В. произвела настройку экспериментальной установки, провела измерения и обработку их результатов, подготовила статью к опубликованию.

Матковская Т.А. произвела настройку экспериментальной установки, провела измерения и обработку их результатов, подготовила статью к опубликованию.

Authors' contribution

Gulakov I.R. developed a research methodology, took part in the interpretation of research results, prepared an article for publication.

Zenevich A.O. carried out the scientific leadership of the research, formulated scientific hypotheses, verified through experiment, took part in the interpretation of the research results.

Kochergina O.V. set up the experimental setup, carried out measurements and processed their results, prepared an article for publication.

Matkovskaia T.A. set up the experimental setup, carried out measurements and processed their results, prepared an article for publication.

Сведения об авторах

Гулаков И.Р., д.ф.-м.н., профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи.

Зеневич А.О., д.т.н., профессор, ректор Белорусской государственной академии связи.

Кочергина О.В., аспирант Белорусской государственной академии связи.

Матковская Т.А., аспирант Белорусской государственной академии связи.

Information about the authors

Gulakov I.R., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Department of Physical and Mathematical Foundations of Informatics of the Belarusian State Academy of Communications.

Zenevich A.O., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Communications.

Kochergina O.V., Postgraduate at the Belarusian State Academy of Communications.

Matkovskaia T.A., Postgraduate at the Belarusian State Academy of Communications.

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2,
Белорусская государственная академия связи;
тел. +375 29 509-02-29;
e-mail: tandem7m@gmail.com
Матковская Татьяна Александровна

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skorina St., 8/2,
Belarusian State Academy of Communications;
tel. +375 29 509-02-29;
e-mail: tandem7m@gmail.com
Matkovskaia Tatiana Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-45-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.056.5, 534.41

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОГИБАЮЩЕЙ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

В.К. ЖЕЛЕЗНЯК¹, Е.Р. АДАМОВСКИЙ¹, А.Г. ФИЛИППОВИЧ²

¹Полоцкий государственный университет (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

²Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 апреля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Предложен метод оценки защищенности канала утечки информации на основе взаимно-корреляционного анализа огибающей измерительного сигнала в речевом диапазоне частот. Алгоритм включает генерацию измерительного сигнала и выделение его огибающей, излучение и измерение в канале утечки, выделение огибающей результирующего сигнала, вычисление коэффициента корреляции между исходной и полученной огибающими, сравнение с пороговым значением. Описан метод выделения низкочастотной огибающей сигнала с помощью преобразования Гильберта. Приведено описание взаимно-корреляционного анализа на основе коэффициента корреляции Пирсона. Выполнено имитационное моделирование канала утечки, формирования и измерения измерительных сигналов, а также их обработка в программной среде MatLab. Полученные результаты подтверждают большую эффективность использования огибающей по сравнению с исходным сигналом, а также демонстрируют преимущество речевых сигналов перед гармоническими сигналами в качестве измерительных для оценки защищенности канала утечки информации.

Ключевые слова: канал утечки информации, огибающая речевого сигнала, взаимная корреляция, техническая защита информации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Железняк В.К., Адамовский Е.Р., Филиппович А.Г. Имитационное моделирование метода оценки защищенности канала утечки информации по огибающей речевого сигнала. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 45-51.

SIMULATION OF THE SECURITY ASSESSMENT INFORMATION LEAKAGE CHANNEL METHOD BASED ON THE SPEECH SIGNAL ENVELOPE

VLADIMIR K. ZHELEZNYAK¹, YAHOR R. ADAMOVSKIY¹, ANDREI G. FILIPOVICH²

¹*Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)*

²*Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 15 April 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. A method of information leakage channel security estimating based on the test speech signal envelope cross-correlation analysis is proposed and its includes: test signal generating and extracting its envelope, emitting and measuring in a leakage channel, extracting the resulting signal envelope, calculating the correlation coefficient between the original and received envelopes, and comparing with a threshold value. A method for extracting a low-frequency signal envelope using the Hilbert transform is shown. A description of the cross-correlation analysis based on the Pearson correlation coefficient is given. The leakage channel simulation modeling, formation and measurement of the test signals was performed in the MatLab. The obtained results confirm the greater efficiency of using the envelope compared to the original signal, and demonstrate the speech signals advantage over harmonic signals as test signals for assessing the information leakage channel security.

Keywords: information leakage channel, speech signal envelope, cross-correlation, technical information security.

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

For citation. Zheleznyak V.K., Adamovskiy Y.R., Filipovich A.G. Simulation of the Security Assessment Information Leakage Channel Method Based on the Speech Signal Envelope. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 45-51.

Введение

Способы оценки каналов утечки информации (КУИ) речевых сигналов являются темой исследований в области технической защиты информации (ТЗИ). Актуальность направления заключается в том, что не выработано единой однозначной модели восприятия речи, а существующие методы оценки дают значительные погрешности [1, 2]. Следовательно, защищенность канала также не может быть однозначным образом оценена.

Питание усилителей осуществляется через сеть переменного тока. Изменение потребления тока нагрузки приводит к нестабильности по току на входе стабилизатора [3]. Таким способом речевой сигнал из питаемой микрофонной системы способен проникать в электромагнитный канал утечки в составе излучения усилителя.

Известно, что речевой сигнал в частотной области характеризуется набором областей (формант) кратных частот в диапазоне от 90 до 10–13 кГц [4]. Во временной области для речевого сигнала может быть вычислена огибающая в инфранизком и низком диапазонах частот (до 20–30 Гц), которая отражает медленные изменения его амплитуды.

Таким образом, для речевого сигнала возможности ограничения полосы в принципе ограничены, поскольку он сам является широкополосным, а его составляющие нестабильны по частоте и амплитуде. В то же время огибающая речевого сигнала преимущественно сосредоточена в известной и сравнительно узкой полосе частот, что открывает возможности для улучшения качества оценки.

В данной работе предлагается метод оценки защищенности КУИ на основе анализа огибающей измерительного речевого сигнала в точке наблюдения.

Методика проведения эксперимента

Рассмотрим аналитический сигнал $s(t)$, который является комплексной функцией, реальная $s_{re}(t)$ и мнимая $s_{im}(t)$ части которого связаны преобразованием Гильберта [5]. Практическая значимость соотношения (1) заключается в возможности выделения из его частей мгновенной амплитуды $u(t)$ (2), фазы $\varphi(t)$ (3) и частоты $\omega(t)$ (4) исходного сигнала, что применимо и к реальным сигналам, представленным на практике в виде компонента $s_{re}(t)$.

$$s_{im}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{re}(\tau) / \pi(t - \tau) d\tau. \quad (1)$$

$$u(t) = \sqrt{s_{re}^2(t) + s_{im}^2(t)}. \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \arctg(s_{im}(t) / s_{re}(t)). \quad (3)$$

$$\omega(t) = d\varphi / dt. \quad (4)$$

Набор значений мгновенной амплитуды $u(t)$ соответствует понятию огибающей сигнала, которой оперируют при обработке амплитудно-модулированных (АМ) сигналов. Рассмотрим АМ-сигнал $s(t)$ (5), который получен путем перемножения модулируемого $s_c(t)$ и модулирующего $s_e(t)$ сигналов единичной амплитуды с заданным коэффициентом корреляции m (6):

$$s(t) = (1 + m \times s_e(t)) \times s_c(t), \quad (5)$$

$$m = \frac{s(t)_{\max} - s(t)_{\min}}{s(t)_{\max} + s(t)_{\min}}. \quad (6)$$

В наиболее распространенном на практике случае, когда несущее колебание является гармоническим колебанием (рис. 1), то сигнал $s_e(t)$ соответствует $u(t)$ по частоте и отличается от него в m раз по амплитуде.

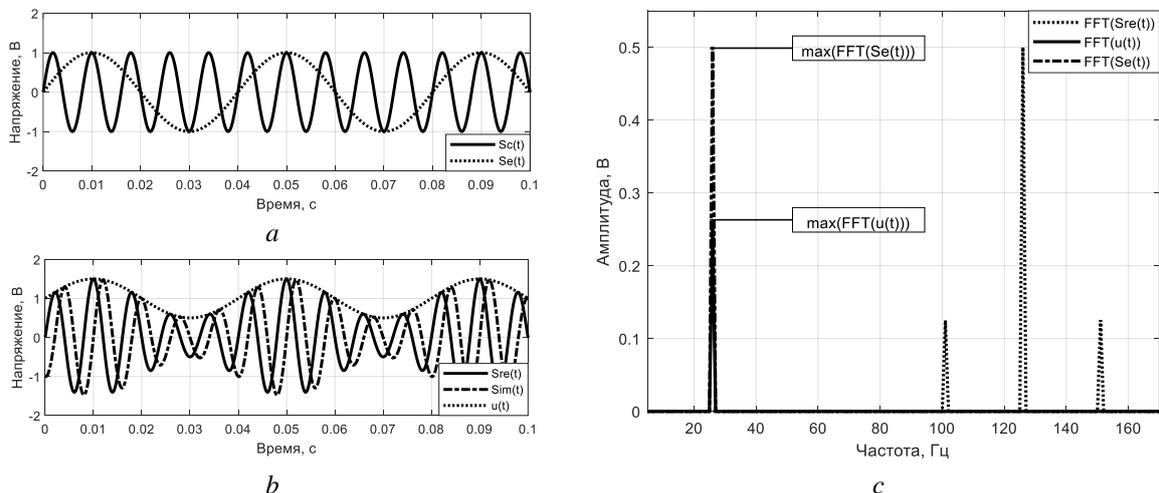


Рис. 1. Структура АМ-сигнала: a – несущее и модулирующее колебание; b – сигнал и огибающая во временной области; c – сигналы в частотной области

Fig. 1. AM-signal and its components structure: a – carrier – modulating oscillation; b – signal and envelope (time domain); c – all signals (frequency domain)

Для случая, когда модулируется не одна, а множество гармоник (речевой сигнал), форма огибающей приобретает сложную форму, поскольку отражает мгновенные амплитуды интерференции составляющих его частот, а не их сумму [5].

На рис. 2 показан речевой сигнал $s_{\text{речь}}(t)$ (запись фразы «Добрый день, как вас зовут?») длительностью 3 с, где область частот ниже 75 Гц вырезана с целью устранения помех сети,

и выделенная огибающая $u_{\text{речь}}(t)$, где частоты выше 30 Гц подавлены. Следует отметить, что в огибающей после фильтрации, соответствующей удалению порядка 99 % спектральных отсчетов, остается около 25 % ее исходной мощности.

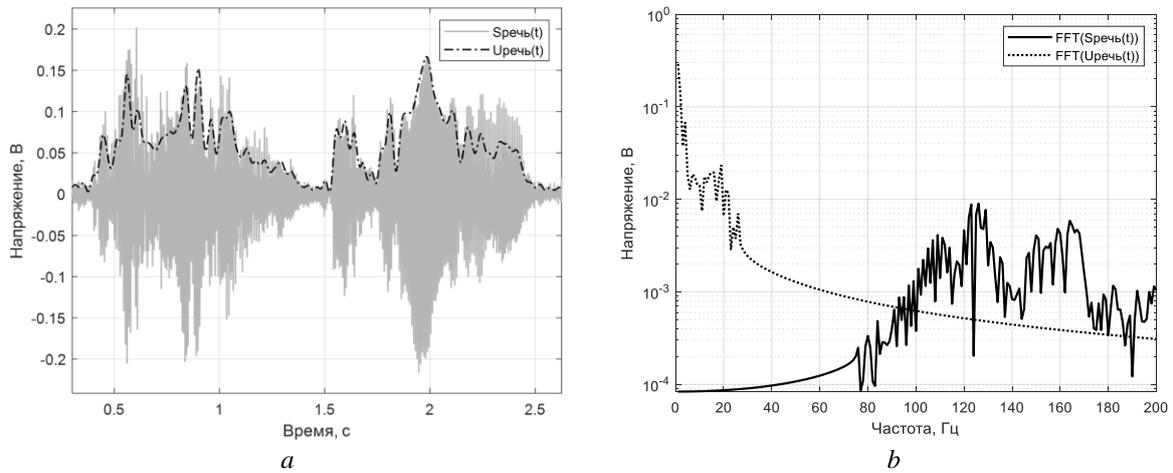


Рис. 2. Речевой сигнал и его огибающая: *a* – временная область; *b* – частотная область
Fig. 2. Speech signal and its envelope: *a* – time domain; *b* – frequency domain

Присутствие амплитудной модуляции в КУИ может быть вызвано процессами, не связанными с работой устройства, для которого осуществляется оценка защищенности. Таким образом, требуется установить взаимосвязь между излучаемым сигналом и сигналом в точке наблюдения. В качестве меры схожести последовательностей используют коэффициент корреляции Пирсона (7), обозначаемый как R [6]:

$$R = \frac{M[(s(t) - M[s(t)]) \times (u(t) - M[u(t)])]}{\sigma_{s(t)} \times \sigma_{u(t)}}, \quad (7)$$

где M – математическое ожидание; σ – стандартное отклонение.

Коэффициент корреляции R отражает то, насколько изменение одной величины влияет на другую, при этом вариация абсолютных амплитуд сигналов не оказывает воздействия на результат.

Метод оценки защищенности канала утечки информации на основе взаимно-корреляционного анализа огибающей измерительного сигнала в речевом диапазоне частот заключается в генерации и излучении измерительного сигнала, огибающая которого сравнивается с огибающей колебания в точке наблюдения. Величина, обратная амплитуде корреляции между ними, определяет степень защищенности КУИ. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Генерация измерительного АМ-сигнала $s_{\text{тест}}(t)$ в речевом диапазоне частот (5), (6). При этом модулируемое многочастотное колебание $s_{\text{с.тест}}(t)$ должно включать набор кратных гармоник основного тона $f_N = N \times f_1$, который лежит в области 100–150 Гц, а модулирующее колебание $s_{\text{е.тест}}(t)$ должно иметь квазипериодическую структуру в области до 30 Гц.

2. Выделение огибающей $u_{\text{тест}}(t)$ из измерительного АМ-сигнала (2). В общем случае $u_{\text{тест}}(t)$ эквивалентно $s_{\text{е.тест}}(t)$, следовательно, шаг является необязательным в случае синтезированного сигнала $s_{\text{тест}}(t)$.

3. Излучение измерительного сигнала $s_{\text{тест}}(t)$ в КУИ и его измерение в точке наблюдения как $s_{\text{куи}}(t)$. В простейшей модели полученный сигнал $s_{\text{куи}}(t)$ может быть представлен как аддитивная смесь $s_{\text{тест}}(t)$ с шумом КУИ $w(t)$ (8).

$$s_{\text{куи}}(t) = s_{\text{тест}}(t) + w(t). \quad (8)$$

4. Выделение из $s_{\text{куи}}(t)$ огибающей $u_{\text{куи}}(t)$ аналогично п. 2.

5. Обработка $u_{\text{тест}}(t)$ и $u_{\text{куи}}(t)$ взаимно-корреляционным способом (7).

6. Сравнение полученной величины R с нормативным пороговым значением $R_{\text{порог}}$, определяющим максимально допустимое значение схожести огибающих, при котором канал считается защищенным.

Схема модели представлена на рис. 3.

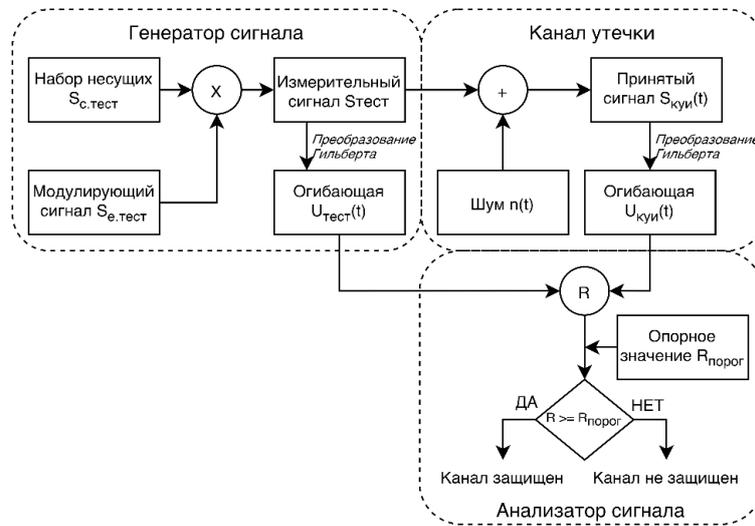


Рис. 3. Алгоритм имитационной модели метода оценки
Fig. 3. Simulation model algorithm of estimate method

Результаты и их обсуждение

Имитационная модель реализована с помощью стандартных инструментов программной среды *MatLab*. В качестве шума КУИ использовался аддитивный белый гауссовский шум (AWGN). Речевые сигналы были ограничены частотой 48 кГц, разрядность АЦП 16 бит. Коэффициент корреляции R вычислялся с использованием встроенной функции *corrcoef*.

В табл. 1 показаны результаты имитационного моделирования, которые содержат значения коэффициентов взаимной корреляции R и модуляции m измерительных сигналов как среднее арифметическое 10 измерений; данные получены согласно представленному алгоритму.

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции и модуляции сигналов в зависимости от уровня шума
Table 1. Values of correlation and modulation coefficients of signals depending on the noise level

ОСШ, дБ SNR, dB	$U_{\text{речь}}(t) - U_{\text{речь.КУИ}}(t)$				$S_{\text{речь}}(t) -$ $S_{\text{речь.КУИ}}(t)$	$U_{\text{гарм.АМ}}(t) -$ $U_{\text{гарм.АМ.КУИ}}(t)$	$S_{\text{гарм.АМ}}(t) -$ $S_{\text{гарм.АМ.КУИ}}(t)$	
	$R_{30\text{Гц}}$	$m_{30\text{Гц.КУИ}}$	R	$m_{\text{КУИ}}$	R	$R_{30\text{Гц}}$	$m_{30\text{Гц.КУИ}}$	R
-	1	1	1	1	1	1	1	1
+15	0,9994	0,9586	0,9863	0,9998	0,9845	0,9989	0,8760	0,9845
+10	0,9975	0,8678	0,9606	0,9997	0,9534	0,9963	0,7586	0,9534
+5	0,9928	0,6932	0,8745	0,9998	0,8715	0,9897	0,5872	0,8715
0	0,9825	0,5633	0,7036	0,9999	0,7067	0,9782	0,3938	0,7071
-5	0,9545	0,3765	0,4071	1	0,4902	0,9552	0,2126	0,4903
-10	0,8762	0,2020	0,1660	0,9985	0,3012	0,8485	0,1342	0,3013
-15	0,5844	0,0970	0,0645	0,9991	0,1745	0,4929	0,1041	0,1753
-20	0,2143	0,0915	0,0198	0,9995	0,0994	0,1886	0,0906	0,0988
-25	0,0821	0,0817	0,0067	0,9992	0,0559	0,0739	0,0884	0,0571

В качестве измерительных сигналов был использован речевой сигнал $S_{\text{речь}}(t)$ – озвученная на русском языке панграмма; выделенная огибающая $U_{\text{речь}}(t)$; гармонический АМ-сигнал $S_{\text{гарм.АМ}}(t)$ ($m = 1$); выделенная огибающая $U_{\text{гарм.АМ}}(t)$. Исходные речевые сигналы подвергались зашумлению во всей полосе частот с отношением сигнал/шум (ОСШ) по мощности от плюс 15 дБ

до минус 25 дБ с шагом 5 дБ. Также представлен случай, когда шум отсутствует (соответствует первой строке данных табл. 1).

В результате были получены сигналы $S_{\text{речь.КУИ}}(t)$, $U_{\text{речь.КУИ}}(t)$, $S_{\text{гарм.АМ.КУИ}}(t)$ и $U_{\text{гарм.АМ.КУИ}}(t)$ соответственно. Огибающие ограничивались по частоте до 30 Гц. Измерено соотношение исходного m и полученного $m_{30\text{Гц.КУИ}}$ коэффициента модуляции для сравнения со значениями корреляции R . Дополнительно для анализа сигналов $U_{\text{речь}}(t)$ и $U_{\text{речь.КУИ}}(t)$ был реализован вариант без ограничения огибающей по частоте для исследования влияния высокочастотной (ВЧ) составляющей на результаты моделирования, измерено соответствующее значение $m_{\text{КУИ}}$.

На рис. 4, *a* показаны значения R и $R_{30\text{Гц}}$ согласно табл. 1. Анализ табл. 1 показывает, что уровни корреляции между исходным колебанием и его зашумленной копией для речевого и гармонического сигналов практически идентичны, поэтому на рис. 4, *a* они объединены в одну кривую. На рис. 4, *b* показаны значения $m_{\text{КУИ}}$ и $m_{30\text{Гц.КУИ}}$ согласно табл. 1, при этом опущено значение $m_{\text{КУИ}}$ для неограниченной по частоте огибающей речевого сигнала. Из-за влияния шума $m_{\text{КУИ}}$ оставалось приблизительно равным единице и не содержало полезной информации, что подтверждает необходимость ограничения огибающей для последующего анализа.

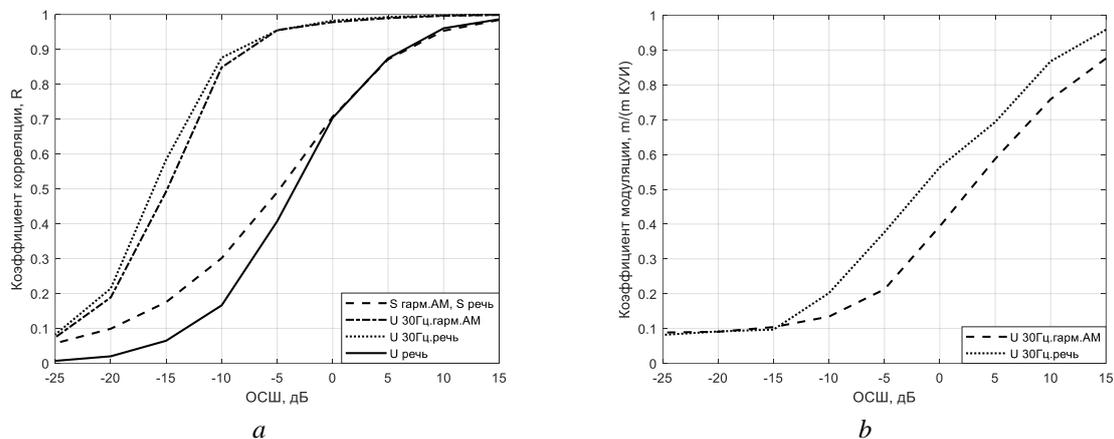


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования при различных уровнях шума, сравнение: *a* – коэффициента взаимной корреляции; *b* – коэффициента модуляции

Fig. 4. Simulation modeling results at different noise levels, comparison: *a* – cross-correlation coefficient; *b* – modulation coefficient

Из рис. 4, *a* следует, что оценка корреляционных свойств сигналов во всей доступной частотной полосе дает низкие значения, поскольку в таком случае влияние широкополосного шума значительно снижает величину меры схожести. Это подтверждается быстрым спадом кривых $S_{\text{гарм.АМ}} \cdot S_{\text{речь}}$ и $U_{\text{речь}}$ сигналов, не ограниченных по частоте. Для кривых $U_{30\text{Гц.речь}}$ и $U_{30\text{Гц.гарм.АМ}}$, соответствующих узкополосным сигналам, убывание $R_{30\text{Гц}}$ с увеличением мощности шума происходит более медленно, особенно для огибающей речевого сигнала.

Рис. 4, *b* демонстрирует характер падения коэффициента модуляции $m_{30\text{Гц.КУИ}}$, вычисленного по огибающим сигналов. Показано, что модуляция речевого сигнала более устойчива к шуму, чем гармонического модулированного сигнала. Преимущество сохраняется до уровня помех -15 дБ, а затем в обоих случаях $m_{30\text{Гц.КУИ}}$ выходит на плато значений $0,09-0,1$, соответствующих фоновому уровню m практически случайных колебаний.

Заключение

Представлен метод оценки защищенности канала утечки информации на основе взаимно-корреляционного анализа огибающей измерительного сигнала в речевом диапазоне частот и результаты имитационного моделирования метода. Произведен сравнительный анализ результатов для огибающей речевого сигнала, исходного речевого сигнала и гармонического

амплитудно-модулированного сигнала. Показаны преимущества использования огибающей речевого сигнала для оценки защищенности канала утечки информации.

Список литературы

1. Анохин В.В., Герасименко Е.А., Кондратьев А.В. Рассмотрение критериев защищенности речи на основе словесной и смысловой разборчивости. *Специальная техника*. 2016;6:22-28.
2. Шелухин О.И. *Цифровая обработка и передача речи*. Москва: Радио и связь; 2000: 456.
3. Костиков В.Г., Парфенов Е.М., Шахнов В.А. *Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2001: 344.
4. Трушин В.А., Иванов А.В., Рева И.Л. О корректировке методики оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам. *Специальная техника*. 2016;6:22-30.
5. Бутырский Е.Ю. Преобразование гильберта и его обобщение. *Научное приборостроение*. 2014;24(4):30-37.
6. Рябенко Д.С., Лавров С.В., Боровкова Е.С. Приложение сигнальных графов и матричного анализа для математического моделирования каналов утечки информации. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2018;4:56-60.

References

1. Anohin V.V., Gerasimenko E.A., Kondrat'ev A.V. [Consideration of speech security criteria based on verbal and semantic intelligibility.] *Special'naya tekhnika=Special equipment*. 2016;6:22-28. (In Russ.)
2. Speluhin O.I. [Digital processing and transmission of speech]. Moscow: Radio i svyaz'; 2000: 456. (In Russ.)
3. Kostikov V.G., Parfenov E.M., Shahnov V.A. [Sources of power supply of electronic means. Circuit engineering and design]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2001: 344. (In Russ.)
4. Trushin V.A., Ivanov A.V., Reva I.L. [On the correction of the methodology for assessing the security of speech information from leakage through technical channels.] *Special'naya tekhnika=Special equipment*. 2016;6:22-30. (In Russ.)
5. Butyrskiy E.Yu. [Hilbert transform and its generalization.] *Nauchnoe priborostroenie=Scientific Instrumentation*. 2014;24(4):30-37. (In Russ.)
6. Ryabenko D.S., Lavrov S.V., Borovkova E.S. [Application of signal graphs and matrix analysis for mathematical modeling of information leakage channels.] *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nye nauki=Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences*. 2018;4:56-60. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи.
All authors contributed equally to the paper writing.

Сведения об авторах

Железняк В.К., д.т.н., профессор Полоцкого государственного университета.

Адамовский Е.Р., м.т.н., аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета.

Филиппович А.Г., к.т.н., главный специалист Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь.

Information about the authors

Zheleznyak V.K., Dr. of Sci. (Tech.), Professor of the Polotsk State University.

Adamovskiy Y.R., M. Sci. at the Department of Computing Systems and Networks of the Polotsk State University.

Filipovich A.G., Cand. of Sci., Chief Specialist at the Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Блохина, 29,
Полоцкий государственный университет;
тел. +375 33 387-46-89;
e-mail: e.adamovsky@psu.by
Адамовский Егор Русланович

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Novopolotsk, Blokhina St., 29,
Polotsk State University;
tel. +375 33 387-46-89;
e-mail: e.adamovsky@psu.by
Adamovskiy Yehor Ruslanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-52-60>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 004.415.533

МЕРА ОТЛИЧИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕСТОВ

В.Н. ЯРМОЛИК¹, Н.А. ШЕВЧЕНКО², В.В. ПЕТРОВСКАЯ¹

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

²Дармштадский технический университет (г. Дармштадт, Германия)

Поступила в редакцию 26 марта 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Исследуется задача построения характеристик различия тестовых последовательностей. Обосновывается ее актуальность для генерирования управляемых вероятностных тестов и сложность нахождения мер отличия для символьных тестов. Показывается ограниченность применения расстояния Хэмминга и Дамерау – Левенштейна для получения меры отличия тестовых наборов. Для произвольного случая определяется новая мера различия двух символьных тестовых наборов на основе интервала, используемого в теории строя цепи последовательных событий. Расстояние $D(T_i, T_k)$ между тестовыми наборами T_i и T_k , использующее характеристику интервала, основано на определении независимых пар одинаковых (тождественных) символов, принадлежащих двум наборам, и вычислении интервалов между ними. Показывается комбинаторный характер вычисления предложенной меры отличия для символьных тестовых наборов произвольного алфавита и размерности. Приводится пример вычисления данной меры и показываются возможные ее модификации и ограничения. Рассматривается применение меры различия для случая многократного тестирования запоминающих устройств на основе адресных последовательностей pA с четным p повторением адресов. Для случая $p = 2$ приводятся математические соотношения вычисления интервалов и расстояния $D(T_i, T_k)$ для последовательностей адресов $2A$, используемых для управляемого вероятностного тестирования запоминающих устройств. Приводятся экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенной меры отличия.

Ключевые слова: расстояние, расстояние Хэмминга, расстояние Левенштейна, тест, тестовый набор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ярмолик В.Н., Шевченко Н.А., Петровская В.В. Мера отличия для управляемых вероятностных тестов. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 52-60.

DISTANCE MEASURE FOR CONTROLLED RANDOM TESTS

VYACHESLAV N. YARMOLIK¹, MIKALAI A. SHAUCHENKA², VITA V. PETROVSKAYA¹

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

²Darmstadt Technical University (Darmstadt, Germany)

Submitted 26 March 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The problem of constructing characteristics of the difference between test sequences is investigated. Its relevance for generating controlled random tests and the complexity of finding difference measures

for symbolic tests are substantiated. The limitations of using the Hamming and Damerau–Levenshtein distances to obtain a measure of the difference between test patterns are shown. For an arbitrary case, a new measure of the difference between two symbolic test sets is determined based on the interval used in the theory of the chain of successive events. The distance $D(T_i, T_k)$ between test patterns T_i and T_k , using the interval characteristic, is based on determining independent pairs of identical (equal) symbols belonging to two patterns and calculating the intervals between them. The combinatorial nature of the calculation, the proposed difference measure for symbolic test patterns of an arbitrary alphabet and dimension, is shown. An example of calculating this measure is given and its possible modifications and limitations are shown. The application of the measure of difference is considered for the case of multi-run testing of memory devices based on address sequences pA with even p repetition of addresses. For the case $p = 2$, mathematical relations are given for calculating intervals and distances $D(T_i, T_k)$ for address sequences $2A$ used for controlled random testing of memory devices. Experimental results are presented confirming the effectiveness of the proposed difference measure.

Keywords: distance, Hamming distance, Levenshtein distance, test, test pattern.

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

For citation. Yarmolik V.N., Shauchenka M.A., Petrovskaya V.V. Distance Measure for Controlled Random Tests. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 52-60.

Введение

Вероятностное тестирование (random testing) является традиционной технологией тестирования, основанной на методе черного ящика, которая не учитывает особенности объекта тестирования [1–3]. Формально вероятностный тест определяется количеством q тестовых наборов $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$, $i \in \{0, 1, \dots, q-1\}$ данных $t_{i,j}$, $j \in \{0, 1, \dots, n-1\}$, их пространством, определяемым заданным алфавитом данных, и числом n в наборе. Чаще всего в качестве тестовых данных рассматриваются двоичные значения, когда тестовый набор $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$ представляет собой n -разрядный двоичный вектор. Однако в общем случае T_i представляет собой последовательность из n символов алфавита, определяемого объектом тестирования. Для повышения эффективности вероятностных тестов используют их модификации, которые получили общее название «управляемые вероятностные тесты» (Controlled Random Tests) [1–3]. Под управляемыми вероятностными тестами понимают вероятностные тесты, в которых очередной тестовый набор формируется с учетом ранее сгенерированных наборов и которые соответствуют следующему определению [1, 2].

Определение 1. Управляемым вероятностным тестом $CRT = \{T_0, T_1, \dots, T_{q-1}\}$ является тест, состоящий из q наборов $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$ тестовых данных $t_{i,j}$, $j \in \{0, 1, \dots, n-1\}$, сгенерированных случайным образом так, что очередной тестовый набор T_i удовлетворяет заданным критериям, полученным на основании ранее сгенерированных наборов T_0, T_1, \dots, T_{i-1} .

Согласно определению 1 ключевой особенностью управляемого генерирования вероятностных тестовых наборов T_i является информация, которая извлекается в виде некоторых характеристик (метрик) из ранее сгенерированных тестовых наборов и используется для формирования очередного набора [1]. Основная идея управляемых вероятностных тестов заключается в том, что очередной тестовый набор T_i формируется максимально удаленным от ранее сгенерированных наборов T_0, T_1, \dots, T_{i-1} в терминах заранее определенных мер отличия. Таким образом, принимается гипотеза, что для двух тестовых наборов T_i и T_k , имеющих минимальное различие, количество обнаруживаемых неисправностей будет минимальным и, наоборот, для максимально различных тестовых наборов обнаруживающая способность будет максимальной [1–3]. Задача управляемого вероятностного тестирования состоит в нахождении мер отличия для тестовых наборов T_i и T_k . Вычисление мер отличия символьных последовательностей, в свою очередь, сводится к задаче их сравнения.

Меры отличия символьных последовательностей

Проблема сравнения символьных последовательностей актуальна для различных областей науки. Основная трудность заключается в том, что в пространстве символьных последовательностей сложно ввести метрику отличия [4]. Формально подобная метрика в таком пространстве существует – это *расстояние Хэмминга* [2, 4]. Первоначально отметим, что расстояние Хэмминга $HD(T_i, T_k)$ между двумя наборами T_i и T_k равняется числу несовпадающих их компонент $t_{i,j}$ и $t_{k,j}$.

$$HD(T_i, T_k) = \sum_{j=0}^{n-1} I_{t_{i,j} \neq t_{k,j}}. \quad (1)$$

Выражение $I_{t_{i,j} \neq t_{k,j}}$ представляет собой индикаторную функцию, равную единице при $t_{i,j} \neq t_{k,j}$ и нулю в противном случае [5]. Содержательно эта метрика малопродуктивна, так как позволяет лишь различать полностью совпадающие последовательности при $HD(T_i, T_k) = 0$ и все остальные несовпадающие [4]. Наиболее распространенным в настоящее время методом сравнения символьных последовательностей является метод выравнивания, или *редакционного расстояния*, и его модификации [4, 5]. Чаще всего в литературе упоминается *расстояние Дамерау – Левенштейна* (*Damerau – Levenshtein distance*). Этот метод заключается в сравнении одной последовательности символов с другой с помощью операций вставки, замены (либо удаления) и транспозиции так, чтобы эти две последовательности совпали. Метод выравнивания требует выбора системы штрафных (весовых) функций и выбора опорной последовательности, относительно которой проводится выравнивание, кроме того, его эффективность снижается экспоненциально при увеличении длины строк символов [5].

В [6] предлагается подход, который предназначен для формального описания и анализа *строа*, представляющего собой последовательность данных (символов) любой природы. Под *строем* цепи событий (символов) понимают упорядоченное множество, в котором каждому символу цепи поставлено в соответствие натуральное число, причем идентичные по выбранному признаку компоненты отображены одним и тем же числом, т. е. нумеруются элементы собственного алфавита данной символьной последовательности по порядку их встречаемости [6]. Подобное отображение строа унифицирует его представление независимо от его алфавита и является необязательным атрибутом. Для определения строа отдельной цепи при обычном (естественном) способе ее чтения поэлементно подряд используется вторая нумерация, представляющая собой сквозную нумерацию всех компонентов строа от начала до конца, что, по сути, является их индексами. Пример строа для случая символьных данных $t_{i,j}$, который по своей структуре повторяет тестовый набор T_i , приведен на рис. 1.

V	N	A	B	J	K	T	T	B	T	A	A	T	V	T	A
1	2	3	4	5	6	7	7	4	7	3	3	7	1	7	3
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рис. 1. Пример строа цепи событий для случая символьных данных
Fig. 1. An example of order a chain of events for the case of character data

Важным результатом теории строа является формализация получения компактных числовых характеристик как результата разложения цепи, подобно используемым для описания случайных величин, которые являются необходимыми при идентификации строев цепей и определении степени их различия. В общем случае цепь может представлять собой последовательность символов любого алфавита, произвольной структуры и длины, а ее разложение осуществляется по различным правилам [6]. Исходной числовой характеристикой является *интервал*, определяемый как расстояние от выделенного в цепи символа до другого ближайшего, отмеченного в направлении просмотра, такого же символа. Величина интервала – это натуральное число, определенное как модуль разности индексов двух выделенных символов, а направление просмотра может быть справа налево, слева направо, циклическим либо произвольным [6]. Для примера строа, приведенного на рис. 1, при его циклическом анализе для символа **V** существует два интервала, равные 13 и 3, для символа **N** – один интервал величиной 16, а символ **A** имеет 4 интервала, величины которых равняются 8, 1, 4 и 3.

Идея использования характеристики интервала оказалась весьма продуктивной для получения числовых характеристик строя цепи событий любой природы [4–7]. Важно отметить, что структура строя и его особенности, определяемые природой его формирования, могут быть весьма различны. Обобщенной моделью строя является случайная и независимая последовательность символов произвольной длины из заданного алфавита. Однако во многих приложениях размерность строя и его алфавит фиксированы, так же как и сама их структура может характеризоваться разнообразными зависимостями. Примером могут быть тестовые последовательности, состоящие из тестовых наборов фиксированной длины. Для случая строя, представляющего собой тестовую последовательность адресов, характеристика интервала применялась для оценки эффективности адресных последовательностей с точки зрения обнаруживающей способности тестов запоминающих устройств [7].

Определение 2. Под последовательностью адресов понимают упорядоченную последовательность из 2^m m -битовых векторов $A(i) = a_{m-1}(i) a_{m-2}(i) \dots a_0(i)$, $a_r(i) \in \{0, 1\}$, $r \in \{0, 1, \dots, m-1\}$ и $i \in \{0, 1, \dots, 2^m-1\}$, каждый из которых принимает одно из 2^m значений.

Данное определение можно интерпретировать как определение последовательности произвольных, отличающихся друг от друга символов, т. е. $A(i) \neq A(k)$, $i \neq k \in \{0, 1, \dots, n\}$ фиксированной длины $n = 2^m$. Новым развитием адресных последовательностей являются pA последовательности для произвольного четного p , удовлетворяющие определению [7].

Определение 3. Адресной последовательностью pA , состоящей из $p2^m$ адресов, называется упорядоченная последовательность адресов $A(i) = a_{m-1}(i) a_{m-2}(i) \dots a_0(i)$, $i \in \{0, 1, \dots, p2^m - 1\}$, где $a_r \in \{0, 1\}$ для $r \in \{0, 1, \dots, m-1\}$, состоящая из всех возможных 2^m m -разрядных двоичных комбинаций $a_{m-1}(i) a_{m-2}(i) \dots a_0(i)$, каждая из которых формируется ровно p раз.

Для тестовых последовательностей адресов, соответствующих определению 3, с использованием характеристики интервала, была определена метрика расстояния $D(A, pA)$ [7]. Показано, что в общем случае произвольная пара из возможных пар повторяющихся адресов $A \in \{0, 1, 2, \dots, 2^m-1\}$ в последовательности pA имеет два значения метрики расстояния $D(A, pA)$, а именно r и $p2^m - r$. Для оценки каждого адреса A в последовательности pA использовалось минимальное значение расстояния $MD(A, pA)$ из всех возможных расстояний $D(A, pA)$. В качестве характеристики последовательности pA была введена метрика среднего значения $AD(pA)$ минимальных расстояний $MD(A, pA)$ между повторяющимися адресами A последовательности pA . Эта метрика для $p = 2$ определяется согласно выражению

$$AD(2A) = \frac{1}{2^m} \sum_{A=0}^{2^m-1} \min [D(A, 2A), (2^{m+1} - D(A, 2A))]. \quad (2)$$

Рассмотренные метрики $MD(A, pA)$ и $AD(pA)$ для последовательностей pA являются их характеристиками, что позволило сформулировать условие максимальной эффективности теста *March_pA_2* запоминающих устройств в терминах указанных характеристик. Эти характеристики $MD(A, pA)$ и $AD(pA)$ идентифицируют последовательность pA , которая, по своей сути, представляет строй цепи событий. Эффективность этой характеристики показана в [7] для случая однократного тестирования запоминающих устройств.

Расстояние отличия для символьных тестовых наборов

При построении управляемых вероятностных тестов, как отмечалось ранее, очередной тестовый набор T_i формируется максимально отличающимся от ранее сгенерированных наборов. Соответственно, нахождение такого набора сводится к задаче сравнения двух тестовых наборов T_i и T_k . Для решения этой задачи введем метрику расстояния $D(T_i, T_k)$, основанную на характеристике интервала [6–7]. Первоначально, используя теорию строя, уточним определение 1 тестового набора T_i для произвольного случая. Будем считать, что тестовые данные $t_{i,j}$, $j \in \{0, 1, \dots, n_i-1\}$ набора T_i принадлежат алфавиту с заданной мощностью L , а их количество $n_i > 0$ в наборе принимает произвольное значение из допустимого диапазона. Примером тестовых наборов T_i и T_k , в которых данные представлены символами английского

алфавита ($L = 26$), являются два набора, приведенные на рис. 2. Отметим, что для T_i величина n_i равняется 9, а для $T_k - n_k = 7$.

T_i	V	N	A	B	J	K	T	T	B
j	0	1	2	3	4	5	6	7	8
T_k	T	A	A	T	V	T	A		
j	0	1	2	3	4	5	6		

Рис. 2. Примеры символьных тестовых наборов T_i и T_k
Fig. 2. Examples of symbolic test sets T_i and T_k

Мера отличия $D(T_i, T_k)$ тестовых наборов T_i и T_k , использующая характеристику интервала, основана на определении независимых пар одинаковых (тождественных) данных, принадлежащих двум наборам. Независимость пар означает участие каждого значения данных $t_{i,j}$ и $t_{k,j}$ тестовых наборов T_i и T_k только в одной паре. Процедура формирования подобных пар носит комбинаторный характер и заключается в нахождении такого их сочетания, для которого сумма их минимальных положительных разностей индексов (интервалов) также минимальна. Эти значения для всех данных наборов T_i и T_k суммируются, и в результате формируется численное значение расстояния $D(T_i, T_k)$. При отсутствии пары для очередного значения данных в наборе T_i разность величин индексов принимается равной $\min(n_i, n_k)$. Такое же значение задается и данным в наборе T_k , для которых отсутствует пара в T_i .

В упрощенном варианте получение сочетания пар одинаковых данных тестовых наборов T_i и T_k может быть реализовано путем анализа тестовых наборов, например, начиная с T_i , слева направо, справа налево или циклически. При нахождении очередной пары данные, участвующие в ней, не рассматриваются при дальнейшем поиске пар.

Минимальное значение метрики $D(T_i, T_k)$ определяется соотношением $\min D(T_i, T_k) = |n_i - n_k| \cdot \min(n_i, n_k)$, что свидетельствует о максимальном совпадении двух наборов T_i и T_k . При выполнении равенства $n_i = n_k$ значение $\min D(T_i, T_k)$ равняется нулю, что свидетельствует о тождественности сравниваемых наборов. Максимальное значение $D(T_i, T_k)$ определяется как $\max D(T_i, T_k) = (n_i + n_k) \cdot \min(n_i, n_k)$, что свидетельствует о полном (максимальном) отличии наборов T_i и T_k . Среднее значение $AD(T_i, T_k)$ определяется как взвешенная сумма интервалов $AD(T_i, T_k)$, аналогично соотношению (2), исследованному ранее [7].

Рассмотрим пример вычисления $D(T_i, T_k)$ для тестовых наборов T_i и T_k , приведенных на рис. 2, для которых $\min(n_i, n_k) = \min(9, 7) = 7$. Анализ данных в указанных наборах будем производить слева направо, начиная с набора T_i . Значение первого данного $t_{i,0} = \mathbf{V}$ набора T_i равняется такому же данному $t_{k,4}$ набора T_k , образуя пару данных $(t_{i,0}, t_{k,4})$ с интервалом, равным $|0 - 4| = 4$, т. е. $(t_{i,0}, t_{k,4}) = 4$. Следующее значение данных $t_{i,1}$ не имеет пары $(t_{i,1}, -)$, так как в наборе T_k отсутствует значение **N**, тогда $(t_{i,1}, -) = \min(n_i, n_k) = 7$. Последовательно анализируя данные набора T_i , находим остальные пары и соответствующие им величины интервалов: $(t_{i,2}, t_{k,2}) = 0$; $(t_{i,3}, -) = 7$; $(t_{i,4}, -) = 7$; $(t_{i,5}, -) = 7$; $(t_{i,6}, t_{k,5}) = 1$; $(t_{i,7}, t_{k,0}) = 2$ и $(t_{i,8}, -) = 7$. На следующем шаге определяются данные набора T_k , не участвующие в ранее определенных парах данных, и для них задается значение интервала, равное $\min(n_i, n_k)$, т. е. $(t_{k,3}, -) = 7$; $(t_{k,1}, -) = 7$ и $(t_{k,6}, -) = 7$. Сумма значений всех полученных интервалов и определяет численное значение $D(T_i, T_k)$, которое в данном примере принимает значение 63, а $\max D(T_i, T_k) = 16 \cdot 7 = 112$. Соотношение величины $D(T_i, T_k) = 63$ с $\max D(T_i, T_k) = 112$ и $\min D(T_i, T_k) = 14$ показывает количественную степень отличия тестовых наборов T_i и T_k .

Метрика расстояния $D(T_i, T_k)$, описанная выше, определена для общего случая тестовых наборов T_i и T_k . При наличии ограничений на размерность наборов и их структуру расстояние $D(T_i, T_k)$ позволяет большую его формализацию. Например, при многократном тестировании памяти на принципах управляемого вероятностного тестирования важным является использование данной метрики $D(B, C)$, показывающей степень отличия тестовых адресных последовательностей B и C . Обе адресные последовательности соответствуют определению 2, а метрика расстояния $D(B, C)$ определяется согласно следующему соотношению:

$$D(B, C) = \sum_{i=0}^{2^m-1} \sum_{k=0}^{2^m-1} I_{B(i)=C(k)} \cdot \min [|i - k|, 2^m - |i - k|]. \quad (3)$$

Аналогично, как и в (1), выражение $I_{B(i)=C(k)}$ представляет собой индикаторную функцию, равную нулю при $B(i) \neq C(k)$ и единице в противном случае. Минимальное значение $D(B, C)$ равняется 0 при совпадении последовательностей B и C , а максимальное $\max D(B, C)$ для отличающихся последовательностей принимает значение 2^{2m-1} .

Для случая адресных последовательностей pB и pC , соответствующих определению 3, вычисление метрики $D(pB, pC)$ сопряжено с определением минимальной суммы минимальных расстояний для всех возможных пар одинаковых значений адресов $A \in \{0, 1, \dots, 2^m-1\}$, входящих в pB и pC . Основная сложность определения данной метрики заключается в получении $p!$ сочетаний пар для каждого адреса в pB и pC . Для случая последовательностей $2B$ и $2C$ количество подобных сочетаний равняется двум. Рассмотрим задачу вычисления $D(2B, 2C)$ для случая последовательностей $2B$ и $2C$, представленных на рис. 3.

$2B=$ $=B(i)$	000	001	011	010	110	111	101	100	100	101	111	110	010	011	001	000
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$2C=$ $=C(k)$	110	111	101	100	101	000	001	011	010	000	010	011	100	110	001	111
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рис. 3. Примеры тестовых последовательностей адресов $2B$ и $2C$
Fig. 3. Examples of test sequences for addresses $2B$ and $2C$

В последовательностях $2B$ и $2C$ каждый из 8 адресов повторяется дважды и каждый из них входит в два возможных сочетания пар адресов. Например, адрес 011 входит в последовательность $2B$ как два ее элемента $B(2)$ и $B(13)$, а в последовательность $2C$ соответственно, как $C(7)$ и $C(11)$. Таким образом, первое сочетание пар адресов состоит из двух пар $B(2), C(7)$ и $B(13), C(11)$, а второе сочетание – из пар $B(13), C(7)$ и $B(2), C(11)$.

В общем случае для каждого значения адреса $\{0, 1, \dots, 2^m-1\}$ в адресных последовательностях $2B$ и $2C$ используются четыре одинаковых значения $B(i) = B(l) = C(k) = C(g)$, образующие два сочетания пар адресов. Соответственно, $\{(B(i), C(k)), (B(l), C(g))\}$ представляет собой первое сочетание, а $\{(B(l), C(k)), (B(i), C(g))\}$ – второе. Каждое сочетание пар адресов характеризуется суммой минимальных интервалов для каждой пары сочетания. Далее для каждого адреса $A \in \{0, 1, 2, \dots, 2^m-1\}$ определяется минимальное значение суммы минимальных интервалов в соответствии с выражением:

$$D(A) = \min \left\{ \begin{array}{l} \min[|i-k|, 2^{m+1}-|i-k|] + \min[|l-g|, 2^{m+1}-|l-g|], \\ \min[|l-k|, 2^{m+1}-|l-k|] + \min[|i-g|, 2^{m+1}-|i-g|] \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Значение 2^{m+1} в выражении (4) представляет собой размерность последовательностей $2B$ и $2C$, которая для примера, приведенного на рис. 3, равняется $2^{3+1} = 16$. Соотношение $\min[|i-k|, 2^{m+1}-|i-k|]$ в выражении (4) представляет собой расстояние $D(B(i), C(k))$ между адресами $B(i)$ и $C(k)$ при циклическом их анализе.

Как показывалось ранее, адрес $A = 011$ образует в последовательностях $2B$ и $2C$ два сочетания адресов $\{(B(2), C(7)), (B(13), C(11))\}$ и $\{(B(13), C(7)), (B(2), C(11))\}$. Соответствующие расстояния $D(B(i), C(k))$ между адресами пары $(B(i), C(k))$ первого сочетания принимают значения: $D(B(2), C(7)) = \min(|2-7|, 16-|2-7|) = \min(5, 11) = 5$; $D(B(13), C(11)) = \min(|13-11|, 16-|13-11|) = \min(2, 14) = 2$. Для второго сочетания получим: $D(B(13), C(7)) = \min(|13-7|, 16-|13-7|) = \min(6, 10) = 6$; $D(B(2), C(11)) = \min(|2-11|, 16-|2-11|) = \min(9, 7) = 7$. Далее для каждого сочетания, в соответствии с (4), вычисляется сумма полученных расстояний, которая для первого сочетания адресов 011 равняется $D(B(2), C(7)) + D(B(13), C(11)) = 5 + 2 = 7$, а для второго – $D(B(13), C(7)) + D(B(2), C(11)) = 6 + 7 = 13$. Окончательно для адреса 011, согласно (4), имеем значение $D(011) = 7$. Для адреса $A = 000$ существуют два сочетания $\{(B(0), C(5)), (B(15), C(9))\}$ и $\{(B(15), C(5)), (B(0), C(9))\}$ (см. рис. 3). Соответствующие интервалы для каждой из пар двух сочетаний принимают значения: $D(B(0), C(5)) = 5$; $D(B(15), C(9)) = 6$; $D(B(15), C(5)) = 6$; $D(B(0), C(9)) = 7$. Тогда, в соответствии с (4), $D(000) = 11$.

В общем случае для последовательностей $2B$ и $2C$, соответствующих определению 3, метрика расстояния $D(2B, 2C)$, показывающая их отличие друг от друга, определяется как сумма сумм минимальных расстояний $D(A)$ (4) для всех значений адресов $A \in \{0, 1, \dots, 2^m-1\}$.

Для рассмотренного выше примера значение $D(2B, 2C) = D(000) + D(001) + D(010) + D(011) + D(100) + D(101) + D(110) + D(111) = 11 + 5 + 7 + 7 + 8 + 9 + 6 + 9 = 62$. Метрика расстояния $D(2B, 2C)$ для произвольных последовательностей $2B$ и $2C$, удовлетворяющих условиям определения 3, по аналогии со схожей метрикой, рассмотренной в [7], принимает значения в диапазоне $0 \leq D(2B, 2C) \leq 2^{2m}$. Для рассмотренного выше примера $D(2B, 2C) = 62$, а $\max D(2B, 2C) = 2^{2 \cdot 3} = 64$, что свидетельствует о большой степени отличия адресных тестовых последовательностей $2B$ и $2C$, представленных на рис. 3.

Экспериментальные результаты

Для подтверждения эффективности предложенной меры отличия при реализации управляемого вероятностного тестирования был проведен ряд вычислительных экспериментов. В качестве объекта тестирования рассматривалось запоминающее устройство, в котором моделировалась кодочувствительная неисправность PNPSF k для $k = 5$. Во время эксперимента случайным образом задавалась неисправность PNPSF5, после чего применялся однократно, двукратно и трехкратно тест MATS++ и фиксировалось обнаружение неисправности либо ее необнаружение. После проведения 1 000 000 таких экспериментов вычислялась полнота покрытия FC как процентное отношение количества обнаруженных тестом кодочувствительных неисправностей PNPSF5 к общему их числу. В качестве тестовой последовательности использовалась случайная адресная последовательность $A(i)$, удовлетворяющая определению 2, для $m = 3$ и 4. При повторных процедурах тестирования применялись модифицированные последовательности $A(i+s)$, представляющие собой сдвинутые на s позиций (индексов) копии исходной последовательности адресов $A(i)$. Для каждого сочетания адресных последовательностей вычислялось значение меры отличия $D(A(i), A(i+s))$. Экспериментальные результаты для двукратного теста MATS++ представлены в табл. 1 и 2 для $m = 3$ и 4.

Таблица 1. Покрывающая способность FC двукратного применения теста MATS++ для $m = 3$, %

Table 1. Coverage FC of two run MATS++ tests for $m = 3$, %

s	0	1	2	3	4	5	6	7
$D(A(i), A(i+s))$	0	8	16	24	32	24	16	8
FC	6,20	10,1	11,8	12,3	12,4	12,3	11,8	10,1

Таблица 2. Покрывающая способность FC двукратного применения теста MATS++ для $m = 4$, %

Table 2. Coverage FC of two run MATS++ tests for $m = 4$, %

s	0	1	2	3	4	5	6	7
$D(A(i), A(i+s))$	0	16	32	48	64	80	96	112
FC	6,12	8,10	9,50	10,60	11,30	11,70	12,00	12,20
s	8	9	10	11	12	13	14	15
$D(A(i), A(i+s))$	128	112	96	80	64	48	32	16
FC	12,33	12,20	12,0	11,70	11,30	10,60	9,50	8,10

Из табл. 1, 2 видно, что наибольшая эффективность двукратного применения теста MATS++ достигается в том случае, когда мера отличия $D(A(i), A(i+s))$ принимает максимальные значения, соответственно равные 32 и 128. При трехкратном применении теста MATS++, кроме исходной случайной адресной последовательности $A(i)$, удовлетворяющей определению 2, использовались две ее циклические копии $A(i+s_1)$ и $A(i+s_2)$, сдвинутые соответственно на s_1 и s_2 позиций относительно $A(i)$.

Как видно из табл. 3, максимальная полнота покрытия FC достигается при максимальном отличии каждой последовательности по отношению друг к другу. Действительно, максимальное значение 17,7 % обеспечивается для $A(i), A(i+2)$ и $A(i+5)$, для которых $D(A(i), A(i+2)) = 16$, $D(A(i), A(i+5)) = 24$ и $D(A(i+2), A(i+5)) = 24$. Аналогично в двух остальных случаях максимального значения FC имеем: $D(A(i), A(i+3)) = 24$, $D(A(i), A(i+5)) = 24$ и $D(A(i+3), A(i+5)) = 16$; $D(A(i), A(i+3)) = 24$, $D(A(i), A(i+6)) = 16$ и $D(A(i+3), A(i+6)) = 24$.

Таблица 3. Покрывающая способность FC трехкратного применения теста $MATS++$ для $m = 3$, %
Table 3. Coverage FC of three run $MATS++$ tests for $m = 3$, %

s_1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
s_2	2	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7
FC	14,00	15,67	16,13	16,13	15,60	14,00	15,60	17,33	17,70	17,33	15,60
s_1	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	
s_2	4	5	6	7	5	6	7	6	7	7	
FC	16,20	17,70	17,70	16,20	16,20	17,30	16,20	15,60	15,60	14,00	

Для оценки эффективности предложенной меры отличия при управляемом тестировании запоминающих устройств с применением неразрушающих тестов $March_2A_2$ рассматривались неисправности PNPSF3. В качестве тестовых последовательностей для случая $m = 3$ применялись последовательности $2A(i)$, $2B(i)$ и $2C(i)$, соответствующие определению 3, приведенные в табл. 4 [7].

Таблица 4. Последовательности $2A(i)$, $2B(i)$ и $2C(i)$ для $m = 3$
Table 4. Sequences $2A(i)$, $2B(i)$ and $2C(i)$ for $m = 3$

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$2A(i)$	000	001	010	011	100	101	110	111	000	001	010	011	100	101	110	111
$2B(i)$	100	101	110	111	000	001	010	011	100	101	110	111	000	001	010	011
$2C(i)$	001	000	011	010	101	100	111	110	001	000	011	010	101	100	111	110

Первоначально использовалась тестовая последовательность $2A(i)$, которая обеспечивала полноту покрытия 50 % для неисправностей PNPSF3. Повторное тестирование с применением тестовой адресной последовательности $2B(i)$, для которой $D(2A(i), 2B(i)) = 64$, увеличило полноту покрытия FC неисправностей PNPSF3 до 78,57 %. В то же время использование в качестве второй адресной последовательности $2C(i)$ с минимальным значением меры отличия $D(2A(i), 2C(i)) = 16$ обеспечило только 64,29 % покрытия.

Результаты, приведенные в табл. 5, для больших размеров памяти $m = 8$ и одинаковых по структуре последовательностей $2A(i)$ и $2B(i)$ подтверждают эффективность предложенной меры отличия для управляемого на ее основе тестирования запоминающих устройств.

Таблица 5. Покрывающая способность FC двукратного применения теста $March_2A_2$ для $m = 8$, %
Table 5. Coverage FC of two run $March_2A_2$ tests for $m = 8$, %

$A(i), B(i)$	Counter				Gray Code		Pseudorandom			
$D(A(i), B(i))$	768	7936	32512	65280	512	65536	33082	33272	40846	44566
FC	25,63	30,96	45,54	58,54	25,5	49,46	58,21	58,25	58,42	59,04

Как видно из табл. 5, во всех парах $2A(i)$, $2B(i)$ адресных последовательностей, а именно счетчиковых (*Counter*), кода Грея (*Gray Code*) и псевдослучайных (*Pseudorandom*), для больших значений новой меры отличия обеспечивается большее значение FC для PNPSF3.

Заключение

Предложена мера отличия для построения управляемых вероятностных тестов, основанная на применении интервала, используемого в теории строя цепи последовательных событий. Показана ее эффективность для случая тестирования запоминающих устройств при применении различных видов тестовых наборов управляемых вероятностных тестов. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части свойств новой меры отличия и ее применимости для различных прикладных задач. Наиболее интересным является применение данной меры отличия в современных поисковых приложениях и оценка вычислительной сложности ее получения.

Список литературы / References

1. Huang R., Sun W., Xu Y., Chen H., Towey D., Xia X. A Survey on Adaptive Random Testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2021;47(10):2052-2083. DOI: 10.1109/tse.2019.2942921.
2. Yarmolik V.N, Mrozek I., Yarmolik S.V. Controlled Method of Random Test Synthesis. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015;49(6):395-403.
3. Леванцевич В.А., Ярмолик В.Н. Многократное управляемое вероятностное тестирование. *Доклады БГУИР*. 2019;121(3):65-69. / Levantsevich V.A., Yarmolik V.N. [Multiple controlled random testing]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;121(3):65-69. (in Russ.)
4. Sadovsky M.G. Comparison of symbol sequences: no editing, no alignment. *Open Systems & Information Dynamics*. 2002;09(01):19-36. DOI: 10.1023/A:1014278811727.
5. Bard G.V. Spelling-error tolerant, order-independent pass-phrases via the Damerau – Levenshtein string-edit distance metric. *Proc. of the Fifth Australasian Symposium on ACSW Frontiers*. 2007:117-124.
6. Gumenyuk A.S., Skiba A.A., Pozdnichenko N.N., Shpynov S.N. About Similarity Measures of Components Arrangement of Naturally Ordered Data Arrays. *SPIIRAS Proceedings*. 2019;18(2):471-503. DOI: 10.15622/sp.18.2.471-503. / Gumenyuk A.S, Skiba A.A., Pozdnichenko N.N., Shpynov S.N. [On the measures of similarity of the arrangement of components in arrays of naturally ordered data]. *Proc. SPIIRAS*. 2019;18(2):471-503. DOI: 10.15622/sp.18.2.471-503. (In Russ.)
7. Mrozek I., Yarmolik V.N. Transparent Memory Tests Based on the Double Address Sequences. *Entropy*. 2021;23:894. DOI: 10.3390/e23070894.

Вклад авторов

Ярмолик В.Н. предложил меру отличия для управляемых вероятностных тестов.
Шевченко Н.А. принял участие в обобщении результатов и проведении экспериментов.
Петровская В.В. приняла участие в анализе результатов и проведении экспериментов.

Authors' contribution

Yarmolik V.N. proposed a distance measure for controlled random tests.
Shauchenka M.A. took part in the generalization of the results and conduct of experiment.
Petrovskaya V.V. took part in the analysis of the results and experiments.

Сведения об авторах

Ярмолик В.Н., д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шевченко Н.А., студент Дармштадского технического университета.

Петровская В.В., магистр технических наук Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Yarmolik V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shauchenka M.A., Student at the Darmstadt Technical University.

Petrovskaya V.V., M. Sci. at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 29 769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Ярмолик Вячеслав Николаевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 29 769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-61-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. РАБЦЕВИЧ., В.Ю. ЦВЕТКОВ

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

Поступила в редакцию 11 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Приведены результаты оценки эффективности алгоритмов сегментации изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов, полученных с помощью атомного силового микроскопа (АСМ-изображения), а также синтезированных в программных пакетах Matlab и Gwyddion. Для сегментации использованы алгоритмы на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений (без остановки и с остановкой на заданном уровне), маркерного водораздела (с автоматической расстановкой маркеров, под контролем оператора), водораздела на основе расстояний, выращивания областей (без выбора начальных точек, с выбором начальных точек на основе экстремумов), водораздела Винсента – Солли (классического, с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области, с выделением контуров областей и последующим их заполнением), двухфазного водораздела. Рассмотрены реализации алгоритмов сегментации в Matlab и в специализированном программном пакете Gwyddion. Оценка эффективности алгоритмов проведена с использованием числа сегментов, однородности яркости внутри сегментов, контраста на границе соседних сегментов и комплексного критерия, учитывающего однородность яркости в сегментах, их количество и размер.

Ключевые слова: сегментация изображений, атомная силовая микроскопия, волновое выращивание областей, водораздел Винсента – Солли, локальный максимум, АСМ-изображения, маркерный водораздел.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Оценка эффективности алгоритмов сегментации АСМ-изображений. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 61-69.

EFFICIENCY EVALUATION OF SEGMENTATION ALGORITHMS FOR AFM IMAGES

VIYALETA V. RABTSEVICH, VIKTAR YU. TSVIATKOU

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

Submitted 11 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The results of evaluating the efficiency of algorithms for segmentation of images of surfaces of materials with an absent or weakly expressed substrate and a convex shape of objects obtained using an atomic force microscope (AFM images), as well as synthesized in the Matlab and Gwyddion software are presented. For segmentation, algorithms were used based on wave growth of local maximum regions with their selection in decreasing order of values (without stopping and with stopping at a given level), marker watershed (with automatic placement of markers, under the control of the operator), watershed based on distances, growing areas (without selecting starting points, with the choice of starting points based on extrema), the Vincent – Sulli watershed (classical, with a preliminary calculation of the gradient in an eight-connected area, with the selection of the contours of the areas and their subsequent filling), a two-phase watershed. Segmentation algorithms realization in Matlab and in the specialized software package Gwyddion are considered. Algorithms efficiency was assessed using segments number, uniformity brightness within a segment, contrast at the border of adjacent segments, and a complex criterion that takes into account the uniformity of segments brightness, their number and size.

Keywords: image segmentation, atomic force microscopy, wave growing regions, Vincent – Sulli watershed, local maximum, AFM images, marker watershed.

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

For citation. Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. Efficiency Evaluation of Segmentation Algorithms for AFM Images. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 61-69.

Введение

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) используются три режима измерения: контактный, бесконтактный и полуконтактный. Независимо от режима измерения и природы (электрическая, механическая, магнитная, тепловая и др.) физической величины, на основе которой проводится измерение, регистрируются две силы – притяжения, которая действует на большом расстоянии от поверхности, и отталкивания – на малом расстоянии [1]. В результате сканирования прямоугольного фрагмента поверхности материала формируется двумерная матрица чисел, эффективно представляемая полутоновым АСМ-изображением, в котором яркости пикселей коррелируют с экстремумами измеренной физической величины в соответствующих точках зондирования поверхности.

Для автоматизированной оценки качества материалов используется сегментация АСМ-изображений, позволяющая выделять области, соответствующие структурным составляющим поверхностей материалов. Алгоритмы сегментации основаны на учете различных локальных характеристик изображений (направление градиента, различие в значениях смежных пикселей, местоположение локальных экстремумов и т. д.) и дают поэтому различные результаты на одних и тех же изображениях. В этой связи имеет смысл рассматривать задачу выбора наиболее эффективного алгоритма для сегментации изображений определенного типа. В данной работе рассматриваются АСМ-изображения поверхностей материалов (металлы с плотной атомной решеткой, волокна с высокой плотностью элементов), в которых подложка отсутствует или слабо выражена, а объекты имеют выпуклую форму. АСМ-изображения такого типа могут быть представлены моделью в виде совокупности областей, яркость каждой из которых монотонно уменьшается от локального максимума, соответствующего вершине объекта, до локальных минимумов, соответствующих подложке или границе другой области.

Показатели качества сегментации изображений также могут давать противоречивые результаты для одних и тех же изображений. Это связано с учетом различных характеристик изображений: дисперсии яркости внутри сегментов, контраста на границах сегментов, числа и размеров сегментов [2]. Поэтому для объективной оценки качества сегментации АСМ-изображений необходимо использовать несколько таких показателей.

Целью работы является определение наиболее эффективных алгоритмов выделения областей на основе различных показателей качества сегментации для синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов.

Оцениваемые алгоритмы сегментации и тестовые АСМ-изображения

Оценка эффективности алгоритмов сегментации осуществлена с использованием их реализаций в Matlab (M) и в программном пакете Gwyddion (Gwyddion [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gwyddion.net>. – Date of access: 02.05.2021.) (G). Исследованы алгоритмы на основе: волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений AWS (AWS-M) [3]; волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений и остановкой на заданном уровне AWSS (AWSS-M) [3]; маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров (MWA-M) [4]; водораздела на основе расстояний (MWD-M) [4]; выращивания областей без выбора начальных точек (RG-M) [5]; выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов (SRG-M) [6]; водораздела по классическому алгоритму Винсента – Солли (VSC-G) [7]; двухфазного водораздела (TPW-G) [3].

Для оценки эффективности данных алгоритмов использованы тестовые АСМ-изображения поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов. Тестовые изображения разделены на три типа: 1) синтезированные в Matlab (54 базовых и производные от них изображения, содержащих от 9 до 200 объектов с различными яркостями и формами); 2) синтезированные в программном пакете Gwyddion (205 изображений, имитирующих различные материалы); 3) полученные с помощью атомно-силового микроскопа (98 изображений поверхностей различных материалов с предварительным выравниванием высоты подложки, без подавления шумов и артефактов). Изображения каждого типа дополнительно разделены на группы (рис. 1, 2).

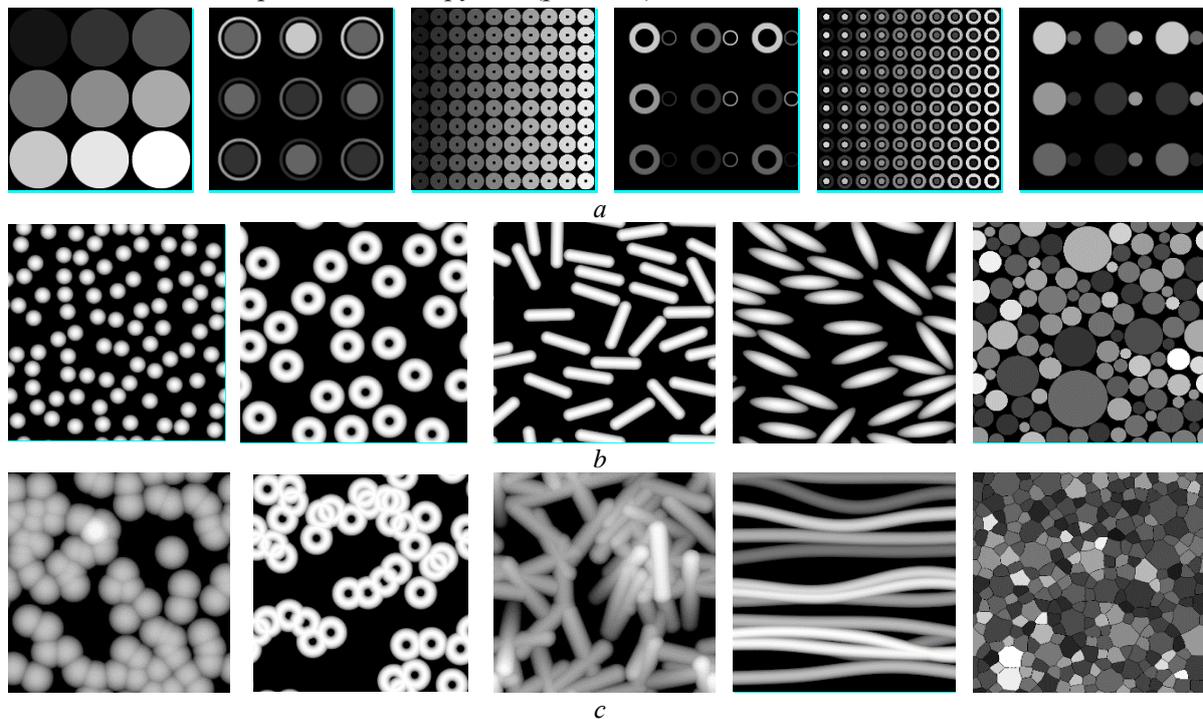


Рис. 1. Примеры тестовых АСМ-изображений типов 1 и 2: *a* – тип 1, группа 1; *b* – тип 2, группа 1; *c* – тип 2, группа 2
Fig. 1. Examples of test AFM images types 1 and 2: *a* – type 1, group 1; *b* – type 2, group 1; *c* – type 2, group 2

Изображения первого типа разделены на три группы: контрольная (группа 1), состоящая из синтезированных изображений, содержащих объекты с известными параметрами (рис. 1, *a*), и группы 2 и 3, изображения которых содержат те же объекты, что и первая группа, но после гаусс-фильтра с размерами 3 и 5 и стандартным отклонением 10 и 15 соответственно (для имитации реальных АСМ-изображений).

Изображения второго и третьего типов разделены на две группы в зависимости от взаимного расположения объектов на поверхности материала: группа 1 – изображения отдельно расположенных объектов (рис. 1, *b* – тип 2, рис. 2, *a* – тип 3); группа 2 – изображения соприкасающихся и перекрывающихся объектов (рис. 1, *c* – тип 2, рис. 2, *b* – тип 3).

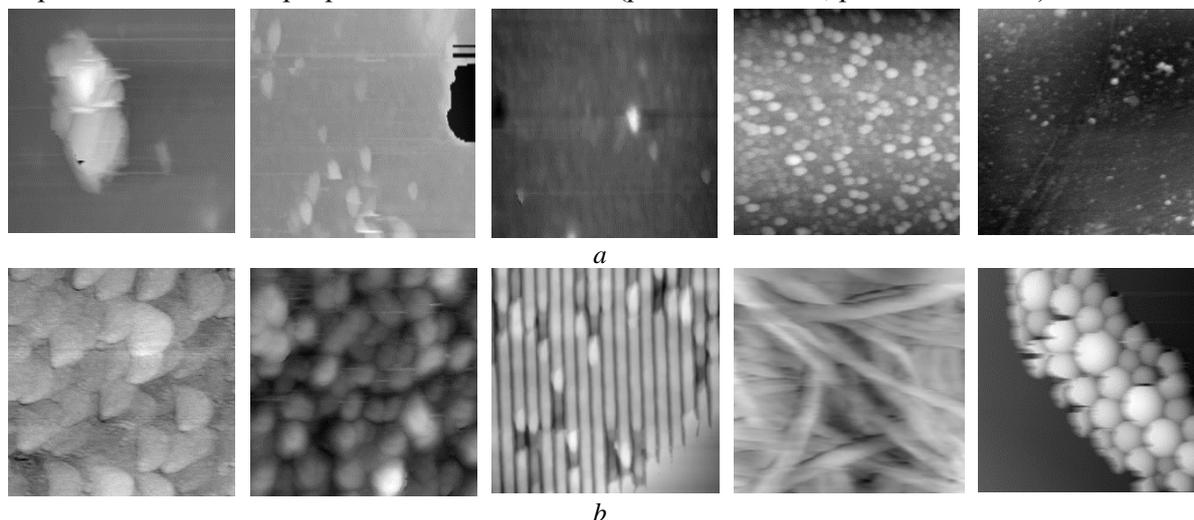


Рис. 2. Пример тестовых АСМ-изображений типа 3: *a* – группа 1; *b* – группа 2
Fig. 2. Example of test AFM images type 3: *a* – group 1; *b* – group 2

Оценка качества сегментации АСМ-изображений на основе числа сегментов

Произведена оценка качества сегментации синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов по числу сегментов. В табл. 1–3 приведены средние (AD), максимальные (MaxDV) и минимальные (MinDV) значения разниц, стандартные отклонения (SD) для истинного числа сегментов и числа сегментов, обнаруженных на тестовых изображениях различных типов.

Таблица 1. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 1

Table 1. Segmentation quality indicators based on segments number for the first type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	RG-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (54 изображения)	AD	0,00	27,33	61,61	591,50	0,00	67,78	1,61
	MaxDV	0,00	101,00	219,00	2700,00	0,00	221,00	10
	MinDV	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	0,00	39,79	78,34	757,625	0,00	77,76	2,06
Группа 2 (54 изображения)	AD	0,61	23147,72	60,83	585,83	0,61	57,56	1,11
	MaxDV	9,00	51701,00	219,00	3100,00	9,00	241,00	2,00
	MinDV	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	2,12	166882,05	78,91	802,8876	2,06	86,39	0,32
Группа 3 (54 изображения)	AD	10,94	48294,06	55,22	561,06	6,94	67,61	8,89
	MaxDV	93,00	109201,00	199,00	2320,00	57,00	260,00	99,00
	MinDV	0,00	283,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
	SD	29,08	34723,59	68,12	700,40	17,82	90,83	23,86
Среднее значение по группам		3,85	23823,04	59,22	579,46	2,52	64,15	3,87

Таблица 2. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 2

Table 2. Segmentation quality indicators based on segments number for the second type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	RG-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (105 изображений)	AD	583,87	49731,28	620,91	826,09	590,38	630,35	645,00
	MaxDV	11666,00	85533,00	11666,00	12129,00	11667,00	11737,00	11819,00
	MinDV	0,00	365,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00
	SD	1499,91	21854,79	1487,98	1607,34	1498,39	1523,18	1541,51
Группа 2 (100 изображений)	AD	30,03	64182,58	226,75	82,69	26,98	24,94	72,18
	MaxDV	299,00	131771	861,00	394,00	189,00	135,00	312,00
	MinDV	1,00	13057	12,00	1,00	0,00	0,00	2,00
	SD	47,75	25863,86	205,1664	84,86	39,46	33,05	68,78
Среднее значение по группам		306,95	56956,93	423,83	454,39	308,68	327,65	358,59

Таблица 3. Значения показателей качества сегментации на основе числа сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 3

Table 3. Segmentation quality indicators based on segments number for the third type of test AFM images

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации				
		AWS-M	RG-M	MWA-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (57 изображений)	AD	3542,05	32601,07	5233,77	4553,41	2323,68
	MaxDV	14279,00	143860,00	15839,00	13889,00	10362,00
	MinDV	12,00	822,00	10,00	9,00	5,00
	SD	4221,98	32308,13	4236,24	3838,83	2476,50
Группа 2 (41 изображение)	AD	2026,37	37513,46	3078,98	2778,22	1627,90
	MaxDV	19774,00	133552,00	19774,00	16057,00	7540,00
	MinDV	12,00	2789,00	0,00	158,00	0,00
	SD	3680,23	27356,69	3470,50	3222,20	1733,51
Среднее значение по группам		2784,21	35057,27	4156,38	3665,82	1975,79

Из табл. 1 следует, что минимальное отклонение показывают алгоритмы AWS, SRG-M и VSC-G. Алгоритм AWS показывает результат, аналогичный VSC-G, но в 1,53 раза хуже по сравнению с SRG-M. Однако алгоритм VSC-G выполняется под контролем оператора, с возможностью выбора оптимальных параметров сегментации, а SRG-M требует предварительного определения начальных точек роста. Алгоритм RG-M обнаруживает в 6188 раз больше сегментов по сравнению с алгоритмом AWS (пересегментация). Алгоритмы MWA-M, MWD-M и TPW-G показывают соответственно в 15,38, 150,51 и 16,67 раза больше ошибок при нахождении количества сегментов по сравнению с алгоритмом AWS.

Из табл. 2 следует, что минимальное отклонение показывает алгоритм AWS, количество ошибок для которого уменьшается в 1,01, 185,56, 1,38, 1,48, 1,07 и 1,17 раза по сравнению с алгоритмами SRG-M, RG-M, MWA-M, MWD-M, TPW-G и VSC-G соответственно.

Из табл. 3 следует, что алгоритм AWS проигрывает по точности только алгоритму VSC-G в 1,41 раза, который выполняется под контролем оператора, и показывает результаты лучше в 12,59, 1,49 и 1,32 раза по сравнению с алгоритмами RG-M, MWA-M и TPW-G. Из сравнения исключен алгоритм SRG-M, так как основан на предварительном поиске локальных экстремумов и разница между количеством найденных объектов и экстремумов равна нулю. Алгоритм MWD-M не распознал объекты на тестовых АСМ-изображениях из-за содержащегося в них шума.

Оценка качества сегментации АСМ-изображений на основе однородности, контраста и комплексного критерия

Произведена оценка качества сегментации синтезированных и реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов по однородности яркости (яркость эквивалентна высоте в канале топологии АСМ-изображения) внутри сегмента [8], глобальному контрасту на границах сегментов [9] и комплексному критерию [10].

Однородность U_{Mz} вычисляется на основе дисперсии яркости внутри сегментов с помощью выражения ($1 -$ лучшее значение)

$$U_{Mz} = 1 - \sum_{S_i \in Mz} \frac{\omega_i \sigma_i^2}{N}, \quad (1)$$

где $\omega_i = \frac{A_i \sigma_i^2}{A_{Mz} \sigma_{\max}^2}$ – вес, определяющий вклад сегмента в результирующую матрицу; A_i – площадь

i -го сегмента; A_{Mz} – площадь всей матрицы; σ_i^2 – дисперсия яркости в i -м сегменте, $\sigma_i^2 = \sum_{i \in S} \frac{(f_i - \bar{f}_i)^2}{A_i}$;

$\sigma_{\max}^2 = \frac{1}{2}(f_{\max} - f_{\min})^2$ – максимальное значение дисперсии признака; N – нормирующий множитель; f_{\max} , f_{\min} – максимальные и минимальные значения яркости на всей исследуемой матрице сегментации; \bar{f}_i – среднее значение яркости в i -м сегменте.

Контраст C_{Mz} на границе соседних сегментов определяется как (1 – лучшее значение)

$$C_{Mz} = \frac{\sum_{S_i \in Mz} \omega_i c_i}{\sum_{S_i \in Mz} \omega_i}, \quad (2)$$

где $c_i = \sum_{S_j} p_{ij} c_{ij}$ – контраст рассматриваемого сегмента; p_{ij} – коэффициент смежности

рассматриваемого сегмента; $c_{ij} = \frac{|\bar{f}_i - \bar{f}_j|}{\bar{f}_i + \bar{f}_j}$ – контраст двух соседних сегментов.

Комплексный критерий Q учитывает однородность яркости внутри сегментов, их количество и размер и определяется с помощью выражения (0 – лучшее значение)

$$Q = \frac{1}{10000N} \sqrt{R} \sum_{i=1}^R \left[\frac{e_i^2}{1 + \log A_i} + \left(\frac{R(A_i)}{A_i} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где N – количество пикселей на изображении; R – количество сегментов; e_i – величина, характеризующая степень однородности i -го сегмента (изменяется в пределах 0–1, 0 – лучшее значение); $R(A_i)$ – количество сегментов, имеющих площадь, близкую к A_i .

В табл. 4 – 6 приведены значения U_{Mz} , C_{Mz} , Q , усредненные по изображениям. Из анализа исключен алгоритм RG-M из-за пересегментации.

Таблица 4. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 1

Table 4. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 1

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (54 изображения)	U_{Mz}	0,66	1,00	0,81	0,88	0,99	0,81	1,00
	C_{Mz}	0,17	1,00	0,44	0,82	0,99	0,72	0,94
	Q	6,39E-05	2,77E-06	1,67E-04	4,70E-02	2,93E-06	2,80E-04	3,39E-06
Группа 2 (54 изображения)	U_{Mz}	0,69	0,92	0,83	0,87	0,93	0,83	0,93
	C_{Mz}	0,19	0,98	0,42	0,80	0,79	0,67	0,99
	Q	4,93E-05	2,31E-06	9,59E-05	6,56E-02	8,20E-06	4,08E-02	2,31E-06
Группа 3 (54 изображения)	U_{Mz}	0,72	0,87	0,85	0,85	0,89	0,85	0,89
	C_{Mz}	0,19	0,91	0,43	0,77	0,68	0,65	0,99
	Q	4,20E-05	2,03E-06	9,61E-05	3,42E-02	5,15E-05	2,37E-04	1,56E-06
U_{Mz} среднее по группам		0,69	0,93	0,83	0,87	0,94	0,83	0,94
C_{Mz} среднее по группам		0,18	0,96	0,43	0,79	0,89	0,68	0,97
Q среднее по группам		5,17 E-05	2,37 E-06	1,19 E-04	4,89 E-02	2,09E-05	1,38E-02	2,42 E-06

Таблица 5. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 2

Table 5. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 2

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (105 изображений)	U_{Mz}	0,75	0,93	0,22	0,94	0,79	0,93	0,93
	C_{Mz}	0,14	0,93	0,19	0,96	0,68	0,85	0,99
	Q	1,05E-04	1,96E-02	4,86E-01	3,85E-02	1,32	1,26E-02	8,37E-03
Группа 2 (100 изображений)	U_{Mz}	0,81	0,94	0,87	0,90	0,84	0,86	0,93
	C_{Mz}	0,16	0,54	0,47	0,65	0,58	0,52	0,85
	Q	2,47E-05	5,70E-02	2,58E-05	2,14E-04	1,07E-03	9,21E-05	1,68E-06
U_{Mz} среднее по группам		0,78	0,93	0,55	0,92	0,82	0,90	0,93
C_{Mz} среднее по группам		0,15	0,74	0,33	0,74	0,63	0,69	0,92
Q среднее по группам		6,49E-05	3,83E-02	2,40E-01	1,93E-02	6,60E-01	6,30E-03	4,19E-03

Таблица 6. Значения показателей качества сегментации на основе однородности яркости, контраста, количества и размеров сегментов для тестовых АСМ-изображений типа 3

Table 6. Values of segmentation quality indicators based on uniformity of brightness, contrast, number and size of segments for test AFM images of type 3

Изображения	Показатель качества	Алгоритмы сегментации						
		AWS-M	AWSS-M	MWA-M	MWD-M	SRG-M	TPW-G	VSC-G
Группа 1 (57 изображений)	U_{Mz}	0,94	0,96	0,81	–	0,97	0,97	0,95
	C_{Mz}	0,13	0,13	0,14	–	0,19	0,15	0,25
	Q	3,85E+01	1,86E+01	1,58E-01	–	3,27E+03	5,04E-01	8,33E+01
Группа 2 (41 изображение)	U_{Mz}	0,96	0,98	0,76	–	0,97	0,96	0,97
	C_{Mz}	0,09	0,15	0,14	–	0,22	0,13	0,28
	Q	8,16E-01	5,10E+00	2,20E-01	–	8,86E+02	3,79E-01	7,23E+01
U_{Mz} среднее по группам		0,95	0,97	0,79	–	–	0,97	0,96
C_{Mz} среднее по группам		0,11	0,14	0,14	–	–	0,14	0,27
Q среднее по группам		1,97 E+01	1,19E+01	1,89E-01	–	–	4,42E-01	7,78 E+01

Из табл. 4 следует, что по однородности яркости внутри сегментов в трех группах лучший результат показывают алгоритмы AWSS-M, SRG-M и VSC-G. Алгоритмы AWS-M и MWD-M проигрывают им в 1,35 и 1,07 раза, а алгоритмы MWA-M и TPW-G – в 1,12 раза. По контрасту алгоритмы AWSS-M и VSC-G превосходят алгоритм AWS-M в 5,33 раза, MWA-M – в 2,23 раза, MWD-M – в 1,22 раза, SRG-M – в 1,05 раза, TPW-G – в 1,37 раза. По комплексному критерию алгоритмы AWSS-M и VSC-G превосходят алгоритмы AWS-M и SRG-M на порядок, MWA-M – на два порядка, MWD-M и TPW-G – на четыре порядка.

Из табл. 5 следует, что по однородности яркости внутри сегментов в двух группах лучший результат показывают алгоритмы AWSS-M и VSC-G. Алгоритмы AWS-M, MWA-M, MWD-M, SRG-M и TPW-G проигрывают им в 1,19, 1,69, 1,01, 1,13 и 1,04 раза. По контрасту алгоритм VSC-G превосходит алгоритм AWSS-M в 1,24 раза. Алгоритмы AWSS-M и MWD-M превосходят алгоритм AWS-M в 4,93 раза, MWA-M – в 2,24 раза, SRG-M – в 1,17 раза, TPW-G – в 1,08 раза. По комплексному критерию алгоритм AWS-M показывает лучший результат, превосходя алгоритмы VSC-G и TPW-G на два порядка, алгоритмы AWSS-M и MWD-M – на три порядка, алгоритмы MWA-M и SRG-M – на четыре порядка.

Из табл. 6 следует, что по однородности яркости внутри сегментов алгоритмы AWS, AWSS, SRG-M, TPW-G и VSC-G показывают практически одинаковый результат, который в среднем в 1,22 раза лучше по сравнению с MWA-M. Алгоритм VSC-G показывает лучший результат по контрасту по сравнению с MWA-M, AWSS и TPW-G в 1,93 раза, по сравнению с SRG-M – в 1,29 раза, по сравнению с AWS – в 2,45 раза.

По комплексному критерию алгоритмы TPW-G и MWA-M показывают лучшие результаты на два порядка по сравнению с AWS, AWSS и VSC-G, на четыре порядка – по сравнению с SRG-M. В табл. 6 отсутствуют данные для алгоритма MWD-M из-за недостаточной сегментации. Для алгоритма AWSS уровень остановки определяется по крайнему левому резкому изменению гистограммы изображения.

Заключение

Анализ результатов сегментации реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов, полученных с использованием различных алгоритмов сегментации, показал, что все они обеспечивают высокую однородность распределения яркости сегментов, за исключением алгоритмов водораздела на основе автоматической расстановки маркеров и расстояний. По контрасту результатов сегментации лучшие результаты показывают алгоритмы водораздела Винсента – Солли (примерно в 2 раза) и выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов (примерно в 1,5 раза). Однако эти алгоритмы значительно проигрывают другим алгоритмам по комплексному критерию, учитывающему однородность яркости внутри сегментов, их количество и размер. Кроме того, алгоритм водораздела Винсента – Солли выполняется под контролем оператора, а алгоритм выращивания областей с выбором начальных точек на основе экстремумов требует предварительного их выделения, что ведет к существенному росту вычислительной сложности. Лучшие по комплексному критерию алгоритмы двухфазного водораздела, выполняемого под контролем оператора, и маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров показывают существенно большие значения ошибок по числу сегментов по сравнению с другими алгоритмами. Наименьшие ошибки по числу сегментов показывают алгоритмы водораздела Винсента – Солли и волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений. Алгоритмы волнового выращивания областей локальных максимумов не требуют участия оператора в процессе сегментации, чем превосходят алгоритмы Винсента – Солли и двухфазного водораздела, а также обеспечивают большую скорость сегментации по сравнению с этими и другими алгоритмами. Среди алгоритмов автоматической сегментации с учетом минимальных ошибок сегментации, высоких значений однородности и контраста, а также средних значений комплексного критерия алгоритмы волнового выращивания областей локальных максимумов являются наиболее эффективными для сегментации реальных АСМ-изображений поверхностей материалов с отсутствующей или слабо выраженной подложкой и выпуклой формой объектов. На АСМ-изображениях, синтезированных в Matlab и Gwyddion, эти алгоритмы также показывают лучшие результаты.

Список литературы

1. Головин Ю.И. *Основы нанотехнологий*. М.: Машиностроение; 2012.
2. Zakharov A.V., Koltsov P.P., Osipov A.S., Kutsaev A.S., Kravchenko. [On the quantitative performance evaluation of image analysis algorithms]. *Trudy NIISI RAN*. 2012;2(2):87-99. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-542-556.
3. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Сегментация АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений. *Доклады БГУИР*. 2022; 20(3): 26-35.
4. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing. Third Edition*. 2008: 798-800.
5. Pratt W.K. *Digital Image Processing. Third Edition*. 2001:562-566.
6. Fan M., Lee T. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI: 10.1049/iet-ipr.2014.0490.
7. Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13:583-598. DOI: 10.1109/34.87344.
8. Levine M.D., Nazif A. Dynamic measurement of computer generated image segmentations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1985;7(2):155-164. DOI: 10.1109/TPAMI.1985.4767640.
9. Remes V., Haindl M. Region of interest contrast measures. *Kybernetika*. 2018;54(5):978-990. DOI: 10.14736/kyb-2018-5-0978.

10. Borsotti M., Campadelli P., Schettini R. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*. 1998;19(8):741-747. DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00052-X.

References

1. Golovin Yu.I. [*Fundamentals of nanotechnology*]. Moscow: Mashinostroenie; 2012. (in Russ.)
2. Zakharov A.V., Koltsov P.P., Osipov A.S., Kutsaev A.S., Kravchenko. [On the quantitative performance evaluation of image analysis algorithms]. *Trudy NIISI RAN*. 2012;2(2):87-99. DOI:10.18287/0134-2452-2015-39-4-542-556.
3. Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. AFM Image Segmentation Based on Wave Growth of Local Maximum Regions with their Selection in Order of Decreasing Values. *Doklady BGUIR*. 2022; 20(3): 26-35.
4. Gonzalez, R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2008: 798-800.
5. Pratt, W. K. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2001:562-566.
6. Fan M., Lee T. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI:10.1049/iet-ipr.2014.0490
7. Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13:583-598. DOI:10.1109/34.87344.
8. Levine M.D., Nazif A. Dynamic measurement of computer generated image segmentations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1985;7(2):155-164. DOI:10.1109/TPAMI.1985.4767640
9. Remes V., Haindl M. Region of interest contrast measures. *Kybernetika*. 2018;54 (5): 978-990. DOI:10.14736/kyb-2018-5-0978
10. Borsotti M., Campadelli P., Schettini R. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*. 1998;19(8):741-747. DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00052-X.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Рабцевич В.В., ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Information about the authors

Rabtsevich V.V., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. + 375 017 293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 017 293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-70-77>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.942, 51-7, 615.8

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ СФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

А.В. ЧУРАКОВ, П.В. КАМЛЯЧ, И.В. ШУЛЬГИНА

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

²Республиканская клиническая больница медицинской реабилитации

Поступила в редакцию 9 июня 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Для изучения проницаемости тканей при экстракорпоральном воздействии различными видами излучений необходимо использование мультифизического и математического моделирования всех этапов разрабатываемой технологии с учетом диэлектрических и акустических свойств тканей организма человека. Применяемые в медицине технологии воздействия сфокусированным ультразвуком достаточно часто имеют высокий уровень артефактов при визуализации диагностических исследований и осложнений при проведении терапии. При моделировании воздействия сфокусированным ультразвуком применяемые решатели должны учитывать распространение волны давления, изменения и скачки плотности, нелинейность и потери диффузии, которые происходят в тканях человека, и предлагать моделирование акустического распространения в неоднородных установках практически в реальном времени. В статье представлены результаты мультифизического и математического моделирования в пакете Sim4Life for Science V7.0 с применением полноволнового акустического решателя (P-ACOUSTICS) современной вычислительной акустики.

Ключевые слова: биологический образец, моделирование, ультразвук.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность ZMT Zurich MedTech AG и лично инженеру-консультанту Мелине Боулди.

Для цитирования. Чураков А.В., Камляч П.В., Шульгина И.В. Модель воздействия сфокусированного ультразвука на биологические ткани. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 70-77.

MODEL OF THE IMPACT OF FOCUSED ULTRASOUND ON BIOLOGICAL TISSUES

ANDREJ V. CHURAKOV¹, PAVEL V. KAMLACH¹, IRINA V. SHULGINA²

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

²*Republican Clinical Hospital of Medical Rehabilitation (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 9 June 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. To study tissue permeability under extracorporeal exposure to various types of radiation, it is necessary to use multiphysical and mathematical modeling of all stages of the technology being developed, taking into account the dielectric and acoustic properties of human body tissues. The technologies used in medicine with focused ultrasound often have a high level of artifacts in the visualization of diagnostic studies and complications during therapy. When modeling exposure to focused ultrasound, the applied solvers must take into account pressure wave propagation, density changes and jumps, non-linearity and diffusion losses that occur in human tissues, and offer simulation of acoustic propagation in inhomogeneous installations in near real time. The article presents the results of multiphysics and mathematical modeling in the Sim4Life for Science V7.0 package using a full-wave acoustic solver (P-ACOUSTICS) of modern computational acoustics.

Keywords: biological sample, modeling, ultrasound.

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

Gratitude. The authors express their gratitude to ZMT Zurich MedTech AG and personally to the engineering consultant Melina Bouldy.

For citation. Churakov A.V., Kamlach P.V., Shulgina I.V. Model of the Impact of Focused Ultrasound on Biological Tissues. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 70-77.

Введение

Ультразвуковые методы и приборы для применения в хирургии, терапии и медицинской диагностике в настоящее время прочно вошли в практику здравоохранения. Так, объем использования в медицине ультразвуковых приборов и аппаратов для визуализации внутренних органов уже стал сравнимым с лидером в этой области – рентгеновской техникой. Растет число научных центров, разрабатывающих новые акустические методы и приборы для применения в медицине. В мировой научной литературе имеются десятки книг, посвященных различным аспектам медицинского ультразвука и, прежде всего, ультразвуковой визуализации тканей.

Биологические эффекты, достигаемые с помощью фокусированного ультразвука, весьма многообразны: от разрушения тканей до стимуляции различных физиологических процессов или активизации действия лекарственных веществ в определенном участке организма. В широкую клиническую практику вошли ультразвуковые методы локального неинвазивного разрушения злокачественных и доброкачественных опухолей.

Сегодня имеется огромное разнообразие медицинских процедур, которые основываются на самых разных физических явлениях. Естественно, важной задачей является изучение и понимание того, каким образом на тело человека будет действовать та или иная процедура и как сконструировать устройство для ее грамотного проведения. Однако сборка прототипов устройств и проверка их работы в реальных условиях зачастую представляется довольно трудозатратным и дорогим процессом. Решением этой проблемы может быть специализированное программное обеспечение для моделирования физических воздействий. Одной из таких программ и является Sim4Life for Science.

Математическая и компьютерная модель воздействия сфокусированного ультразвука на биологические ткани

Sim4Life for Science – это инновационная платформа для моделирования, обладающая различными физическими решателями для непосредственного анализа биологических явлений реального мира и сложных технических устройств в проверенной биологической и анатомической среде, в том числе для моделирования различных видов воздействия на биологические ткани [1].

Среда моделирования световой акустики Sim4life предлагает 3D-полноволновой решатель для моделирования распространения волн давления в неоднородных средах. Все соответствующие явления, такие как рассеяние, отражение, преломление, дифракция, интерференция и поглощение, улавливаются этим решателем. Решатель основан на уравнении волны линейного акустического давления (*LAPWE*), которое было расширено и оптимизировано для гетерогенных материалов с потерями, встречающихся в анатомических структурах. Элементарная форма дифференциальных уравнений в частных производных *LAPWE* [2]:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где p – давление; c – скорость звука; t – время.

Однако поскольку решатель применяется к гетерогенным средам, учитываются изменения плотности и поглощение путем расширения состава [2]:

$$\rho \nabla \cdot \frac{1}{p} \nabla p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\tilde{\alpha}}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность массы; $\tilde{\alpha}$ – коэффициент, описывающий поведение поглощения в соответствии с формулой

$$\tilde{\alpha} = 2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{\alpha^2 \cdot c^4}{\omega^2} + c^2}, \quad (3)$$

где α – коэффициент поглощения; ω – угловая частота.

Метод конечных разностей во временной области (FDTD) используется для решения дифференциального уравнения (3) в частных производных в трехмерной области. Этот подход требует дискретизации вычислительной области с использованием структурированной декартовой сетки, состоящей из шестигранных элементарных ячеек. Алгоритм FDTD работает с неоднородными декартовыми сетками, позволяя адаптировать уточнение дискретизации к геометрическим требованиям установки. Решатель оптимизирован для быстрой обработки больших структур данных на графических процессорах (GPU), но также поддерживает обработку на процессорах [3].

Акустический источник моделируется как объемное тело, излучающее акустические волны со всей своей поверхности. Говоря численно, каждая дискретизированная поверхностная грань источника рассматривается как элементарный акустический излучатель, следуя принципу Гюйгенса. Этот принцип гласит, что волновой фронт может быть представлен или состоять из (бесконечного) числа точечных источников. Такой подход обеспечивает гибкость при использовании источников любой формы и формы без необходимости специального обращения с исходными терминами [2].

Акустический импеданс – это характеристическая величина, определяемая для любого материала, подверженного распространению акустических волн. Он рассчитывается исходя из формулы [2]

$$Z = \rho \cdot c. \quad (4)$$

Акустический импеданс является свойством материала и может быть оценен по параметрам, указанным в настройке моделирования. Эта величина играет важную роль в определении акустического отражения и передачи на границе раздела различных сред.

Коэффициент отражения R представляет собой отношение давления отраженной волны и давления падающей волны, а коэффициент пропускания T – отношение давления передаваемой волны и давления падающей волны. Эти величины связаны с акустическими импедансами задействованных сред следующим образом [4]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (5)$$

$$T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (6)$$

Волна давления, распространяющаяся через среду, может терять энергию в результате неупругих процессов. Эта энергия откладывается в среде и проявляется в виде тепла. Количество энергии, поглощаемой средой, зависит от частоты волны [4]:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot f^b, \quad (7)$$

где α_0 – коэффициент ослабления на частоте 1 МГц; f – частота, МГц; b – показатель ослабления.

Для выполнения моделирования был спроектирован ряд прямоугольных параллелепипедов для последовательной имитации различных биологических материалов (кожи, жировой ткани, мышц и кости) и одноэлементный фокусирующий излучатель (рис. 1).

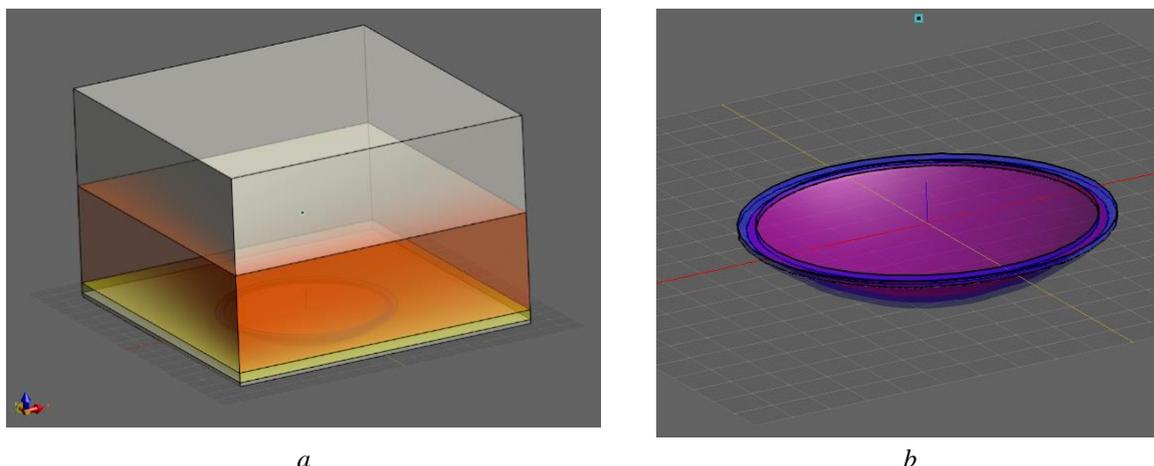


Рис. 1. Модель в пакете Sim4Life: тканей человека (a); одноэлементного фокусирующего излучателя (b)
Fig. 1. Model in the Sim4Life: human tissues (a); single element focusing emitter (b)

На рис. 2 представлено взаимное расположение геометрической модели и одноэлементного фокусирующего излучателя.

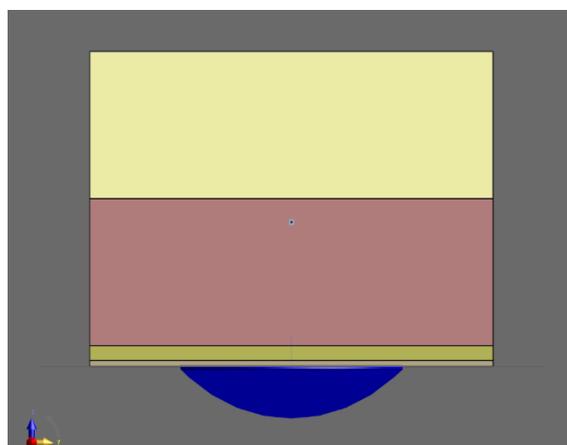


Рис. 2. Исследуемая модель в пакете Sim4Life
Fig. 2. The model under study in the Sim4Life

Геометрические параметры спроектированной модели задавались исходя из средних значений параметров анатомических тканей тела человека:

- общие размеры параллелепипеда $160 \times 160 \times 107$ мм;
- толщина слоя кожи 2 мм;
- толщина слоя жировой ткани 5 мм;
- толщина слоя мышц 50 мм;
- толщина слоя кости 50 мм;
- размеры излучателя (крайние точки) $84,3 \times 84,3 \times 15,4$ мм;
- расстояние от излучателя до точки фокуса 49 мм.

В табл. 1 представлены параметры биологических материалов.

Таблица 1. Параметры материалов
Table 1. Material parameters

Материал Material	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Скорость звука в материале, м/с The speed of sound in the material, m/s	Удельный акустический импеданс, мкг/с·м Specific acoustic impedance, mkg/s·m
Вода	1000	1500	1,5
Кожа	1109	1624	1,80102
Жир	911	1440,19	1,31201
Мышцы	1090,4	1588,43	1,73202
Кость	1908	3514,86	6,70635

Параметры акустического сигнала воздействия:

- вид сигнала синусоидальный;
- время воздействия 40 периодов;
- амплитудное давление 1 МПа.

Результаты и их обсуждение

Для исследования проведено моделирование воздействия ультразвука с различными частотами (110 кГц, 880 кГц, 1 МГц), использующимися в практической медицине.

Распределение интенсивности при частоте 110 кГц (стандартная терапевтическая частота) в структуре модели представлено на рис. 3.

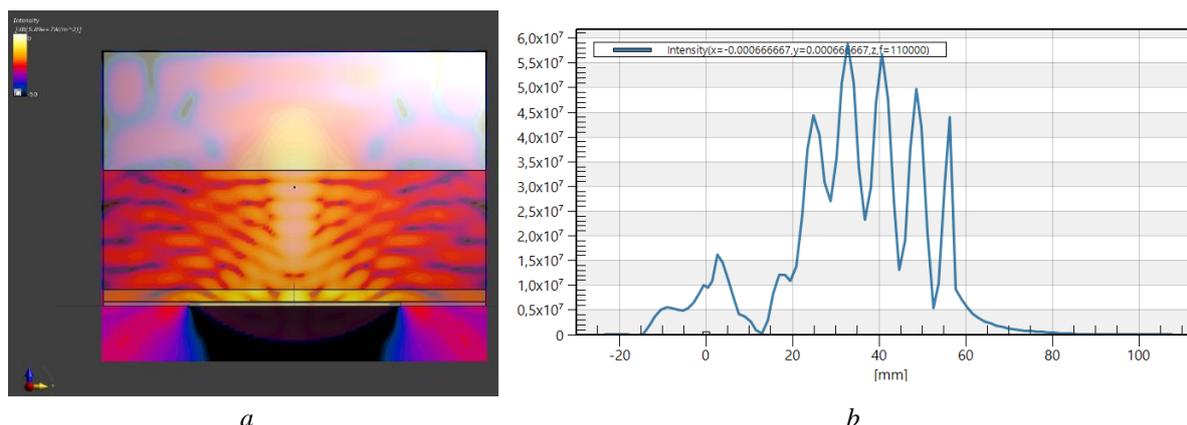


Рис. 3. – Распределение интенсивности в структуре модели при частоте 110 кГц:
a – графическое изображение; *b* – график распределения интенсивности, Вт/м²

Fig. 3. Intensity distribution in the model structure at a frequency of 110 kHz:
a – graphic image; *b* – intensity distribution graph, W/m²

Как видно из графика (рис. 3, *b*), максимум интенсивности достигается при прохождении мышц (пик – 33 мм) и равен $5,9 \cdot 10^7$ Вт/м². В структуре модели интенсивность выделяется пиками, расстояние между которыми приблизительно равно 10 мм.

Распределение интенсивности для частоты 880 кГц (стандартная терапевтическая частота) в структуре модели представлено на рис. 4.

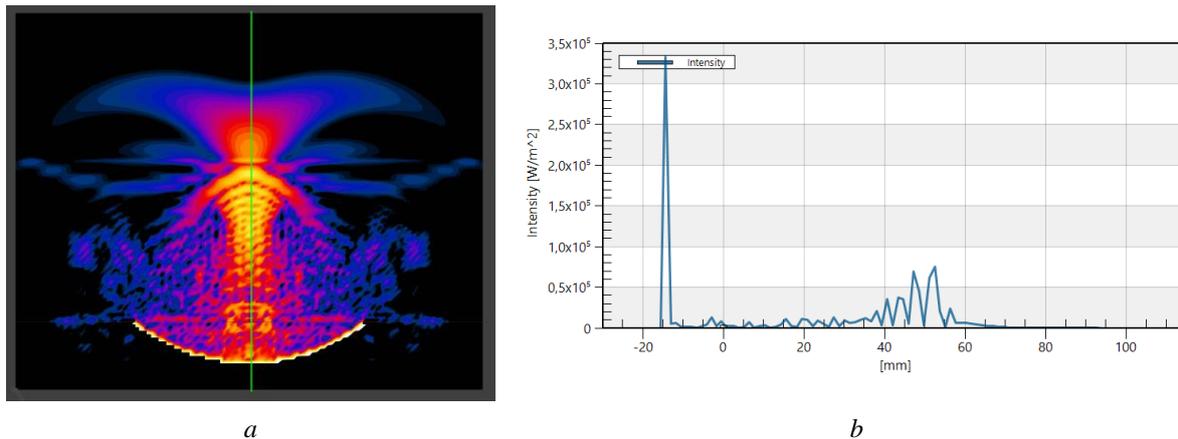


Рис. 4. – Распределение интенсивности в структуре модели при частоте 880 кГц:
a – графическое изображение; *b* – график распределения интенсивности, Вт/м²

Fig. 4. Intensity distribution in the model structure at a frequency of 880 kHz:
a – graphic image; *b* – intensity distribution graph, W/m²

Аналогично, как и для частоты 110 кГц, при частоте 880 кГц интенсивность распределяется пиками. Максимум равен $0,8 \cdot 10^5$ Вт/м² на расстоянии 53 мм, т. е. при прохождении участка мышц (рис. 4, *b*). При прохождении границы мышца – кость интенсивность резко падает так же, как и при частоте 110 кГц.

Распределение интенсивности при частоте 1 МГц (стандартная терапевтическая частота) в структуре модели представлено на рис. 5.

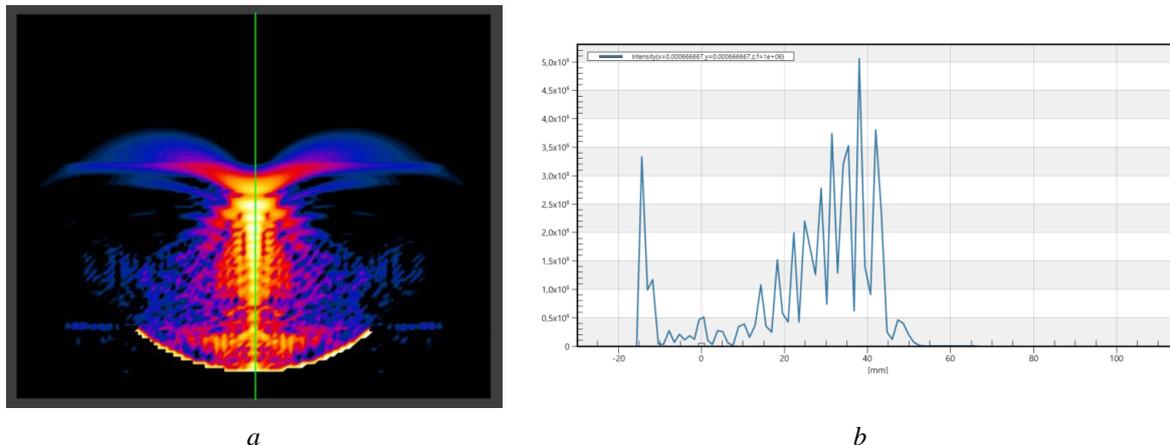


Рис. 5. – Распределение интенсивности в структуре модели при частоте 1 МГц:
a – графическое изображение; *b* – график распределения интенсивности, Вт/м²

Fig. 5. Intensity distribution in the model structure at a frequency of 1 MHz:
a – graphic image; *b* – intensity distribution graph, W/m²

Из рис. 5, *b* отчетливо видно, что пик интенсивности достигается на 38 мм и равен $5,1 \cdot 10^5$ Вт/м². Аналогично результатам при 110 и 880 кГц при 1 МГц интенсивность распределяется пиками. До структуры кости ультразвук практически не доходит.

При распределении ультразвука в структуре модели критическим является переход между слоями исследуемой модели. При переходе границы мягкие ткани – кость большая часть ультразвука рассеивается, при этом в костной ткани отмечается полное затухание сигнала. Это четко видно при частотах 110 и 880 кГц.

Исследование проводилось сфокусированным ультразвуком. При увеличении частоты глубина проникновения ультразвука вглубь модели уменьшалась. Так, при частоте 2 МГц интенсивность не доходит до точки фокусировки, которая расположена на расстоянии 49 мм. То есть, исходя из проведенного моделирования, можно сказать, что при изменении частоты

радиус фокусировки смещался ближе к коже. Максимум достигается при частоте 110 кГц на 33 мм (мышцы), при 880 кГц – 53 мм (мышцы), при 1 МГц – 38 мм (мышцы), при 2 МГц – 14 мм (мышцы), при 7,5 МГц – 2 мм (кожа).

Интенсивность в структуре модели распределялась пиками. При частоте 110 кГц расстояние между пиками приблизительно равно 10 мм. С увеличением частоты увеличивается и расстояние между пиками.

Изменяя частоту и радиус сфокусированного излучателя, можно добиться локального применения, но при этом будет теряться глубина проникновения в структуру модели.

Заключение

Полученные результаты моделирования в Sim4Life for Science V7.0 позволят применять полученные результаты и предложенный вычислительный алгоритм при разработке, дизайне и оптимизации новых датчиков ультразвуковых устройств. Применение данного подхода на основе сфокусированного ультразвукового воздействия является необходимым перед проведением тромболитика и нейронной стимуляции, абляции опухолей, лечении нейропатической боли, двигательных расстройств. В отличие от других современных платформ, используемых в медицинской биоинформатике, Sim4Life for Science V7.0 реализует линейные и нелинейные трехмерные полноволновые решатели, основанные на уравнении Вестервельта – Лайтхилла (расширенном с учетом изменения плотности для учета костной ткани и сильно отражающего материала), новый гибридный решатель, сочетающий метод быстрого ближнего поля (FNM) и метод гибридного углового спектра (hASM), позволяющий моделировать установки, включающие ультразвуковые преобразователи.

Список литературы

1. Kamlach P.V., Grodo D.S., Churakov A.V., Kamlach V.I., Bondarik V.M., Madveiko S.I., Klyuev A.P. [Model of electromagnetic field impact on biological tissues]. *Doklady BSUIR = Doklady BSUIR*. 2020;18(8):46-52. (In Russ.).
2. Sim4Life light Reference Guide Release 5.0. Zurich Med Tech. Sim4Life Application and Support Team, Zurich, Switzerland; 2019.
3. Содиков Н.О., Содиков М.Н., Темиров Ф.Н. *Применение ультразвука в медицине*. 2020: 32.
4. Сперанский А.П. *Ультразвук и его лечебное применение*. Москва: Медицина; 1970: 224.
5. Чураков А.В. *Принципы моделирования и проектирования приборов магнито-и ультразвуковой терапии: учебно-методическое пособие*. Минск: БГУИР; 2019: 146.

References

1. Kamlach P.V., Grodo D.S., Churakov A.V., Kamlach V.I., Bondarik V.M., Madveiko S.I., Klyuev A.P. [Model of electromagnetic field impact on biological tissues]. *Doklady BSUIR = Doklady BSUIR*. 2020;18(8):46-52. (In Russ.).
2. Sim4Life light Reference Guide Release 5.0. Zurich Med Tech. Sim4Life Application and Support Team, Zurich, Switzerland; 2019.
3. Sodikov N.O., Sodikov M.N., Temirov F.N. [The use of ultrasound in medicine]. 2020:32. (In Russ.)
4. Speransky A.P. [Ultrasound and its therapeutic application]. Moscow: Medicine; 1970: 224. (In Russ.)
5. Churakov A.V. [Principles of modeling and designing devices for magnetic and ultrasonic therapy: study guide. allowance]. Minsk: BSUIR; 2019: 146. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Чураков А.В., к.м.н., доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Камлач П.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шульгина И.В., заведующая кабинетом рентгенокомпьютерной диагностики рентгеновского отделения Республиканской клинической больницы медицинской реабилитации.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293-84-14;
e-mail: kamlachpv@bsuir.by
Камлач Павел Викторович

Information about the authors

Churakov A.V., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kamlach P.V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shulgina I.V., Head of the X-ray Computer Diagnostics Room of the X-ray Department of the Republican Clinical Hospital for Medical Rehabilitation.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. + 375 17 293-84-14;
e-mail: kamlachpv@bsuir.by
Kamlach Pavel Viktaravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-78-84>

Original paper

UDC 339.138

MODELING IOT SMART HOME NETWORK

U.A.VISHNIAKOU, Y. CHUYUE

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

Submitted 29 March 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of the article is to present the process of modeling the IoT smart home (SH) network, which combines both user needs and efficiency requirements. The use of Alibaba cloud platform, which reduces complexity and development time, reduces costs, was justified in the project of building the IoT SH network. The structure of this platform is given, its main components are considered and an algorithm for its configuration is given. MQTT is used as an access protocol in the IoT SH network to achieve fast and reliable data transmission. Open source code, reliability, simplicity and other characteristics justify the choice of this data transfer protocol. Modeling of the network IoT SH is based on the knowledge gained in the process of practical implementation. First, the online problems of the system are tested, after the system is able to work after modification and debugging of programs, a street lamp is used as an example to create an instance of an IoT SH network on a cloud platform. The process of creating an example of an IoT SH network is described in detail in steps, in which data from a street lamp is transmitted to a cloud platform, processed there, and then displayed on a mobile device. A mobile phone was used to implement two-way interaction, simulate the sensor of the IoT SH network and display the results. The algorithms for configuring the platform, modeling the sensor and creating an object model of the device of the IoT SH network are given. For some modern control systems, this system is compatible and suitable for a larger number of cases, which contributes to the development of intelligent control in the IoT network.

Keywords: smart home IoT network structure, MQTT, cloud platform, simulation, algorithms.

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

For quoting. Vishnyakou U.A., Chuyue Yu. Modeling IoT Smart Home Network. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 78-84.

Introduction

IoT networks make it possible to implement automation of production processes, management of transport, energy, agriculture, medicine facilities at a new level, create smart shops, smart homes, districts and cities [1].

In accordance with the needs and different technologies, the devices used are selected, and a smart home solution is proposed using cloud platform technology to simulate the implementation of an IB network. To automate the creation of IoT systems, the world's leading companies have developed design tools in the form of IoT cloud platforms [2]. On the basis of a cloud platform, authors will consider the process of modeling the IoT network. To simulate the network IoT SH authors use the scheme that includes a Smartphone (to simulate sensors, communication, display results) and a cloud platform.

Choosing of cloud platform

The choice of a cloud platform for a IoT network is directly related to the entire process of developing. For the IoT networks, cloud platforms have become the focus of attention of large cloud computing manufacturers, in details are given in article [2]. In combination with the requirements for the network modeling of smart homes in this project, Alibaba's IoT cloud platform is explored as the platform of this system. In comparing with better others world IoT platforms from Amazon, Google, IBM, Alibaba IoT platform has same parameters, but more assessable in Belaeus.

Alibaba Cloud IoT platform is a universal device management platform, specially released by Alibaba Group in September 2009 for developers in the field of the IoT, which allows devices to carry out two-way communication with cloud servers with low latency [3]. Currently Alibaba cloud platform mainly offers three types of cloud services: IaaS, PaaS, SaaS, as well as many product areas such as cloud computing, big data and IoT. Alibaba cloud platform has a high level of security. In 2014 it helped the gaming company to resist the largest DDoS attack in the history of IoT in the world.

When using the platform, users can rely on the platform's powerful device status management capabilities to implement remote device management, and the SDK tool provides large-scale connections to devices without purchasing a server. Alibaba's cloud platform has more than 200 data centers around the world. It supports connecting multiple devices and collecting data from devices with further storage in the cloud.

Alibaba is an integrated platform that integrates capabilities such as device management, data security, and messaging to users. To implement the latter, cloud APIs are used, which are implemented by the server. That's why we chose Alibaba's IoT cloud platform as the basis for modeling the IoT network.

Choosing of transport protocol

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protocol [4] it is similar to the HTTP protocol, both of which are application layer transmission protocols based on the TCP transmission protocol [5]. But the MQTT protocol can implement the reverse control of the device, at the same time it is data-oriented, and the amount of data is small and simple, so it is used in the process of use (as protocol CoAP – Constrained Application Protocol, which support datagram). A small amount of code can implement remote connection of devices, for example, a connection between some small devices and satellites, which saves traffic and electricity, and management is simple and convenient. Ultimately, the protocol itself has low overhead and high efficiency.

Compared to the HTTP protocol and the DTS protocol, the MQTT protocol has many advantages in terms of protocol standards, so its performance will be better in the Internet of Things environment [6]. MQTT includes the application of several languages, such as PHP, JAVA, Python, C, C#, which can be used on any platform. The protocol transfers data between several devices simultaneously, so it is suitable for the IoT [7–9] and mobile applications [10], which can be applied in many areas, such as smart homes, smart cities and medical care.

After the above analysis and comparison, the MQTT protocol has great advantages over the HTTP protocol, it has been chosen as a transmission protocol in the IoT SH network.

Structure and configuration of the Alibaba cloud platform

The architecture of Alibaba's IoT cloud platform is divided into parts: the IoT Hub, Data analyses, Device management, Rules engine and Security authentication, as shown in Fig. 1.

Let's consider the structure and functioning of the Alibaba IoT cloud platform [4]. The IoT hub is responsible for access to devices; the device management function provides management of the device lifecycle, object model, etc.; the rules mechanism is used for further processing of data downloaded from sensors.

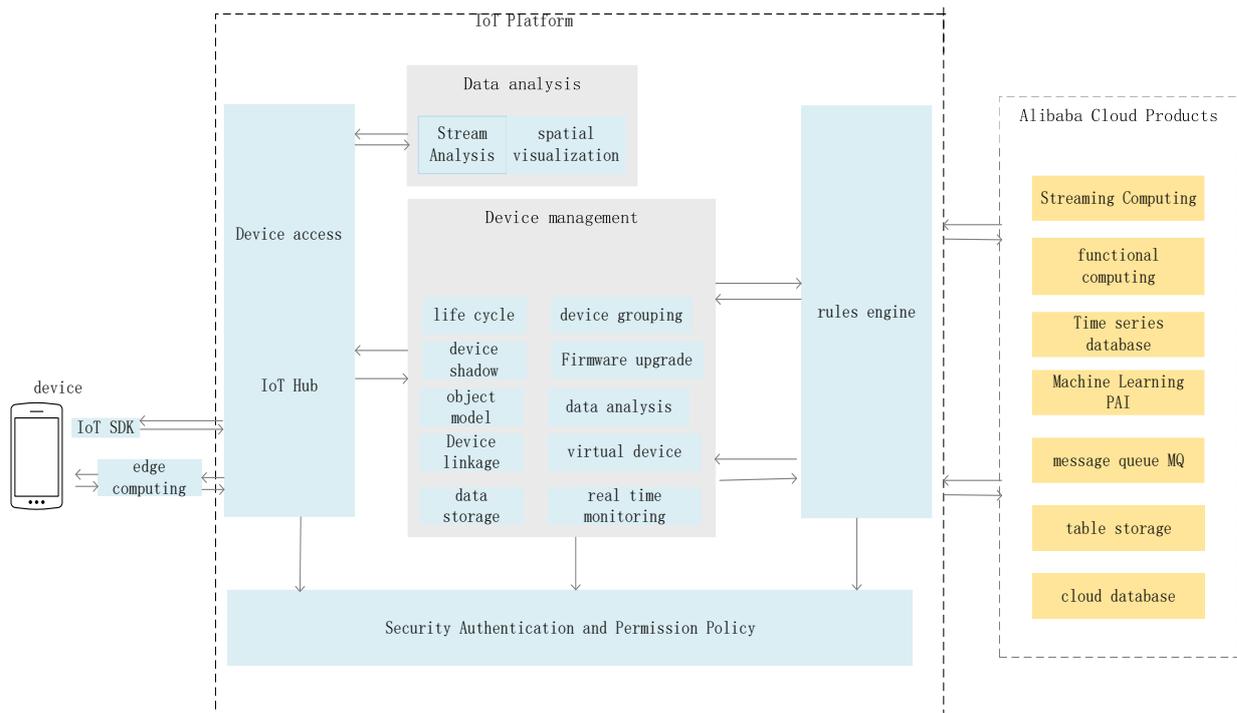


Fig 1. IoT Platform Architecture

The security authentication module is the main link in ensuring the security of the IoT, when a device is connected to the IoT platform, authentication information and security certification are required. Access to the device is supported by the following points.

1. The device-side code provides guidance on cross-platform migration and allows businesses to access devices based on multiple platforms.
2. Availability of MQTT and CoAP communication protocol devices in the SDK, which not only meet the requirements of real-time exchange with long connections, but also support the requirements for low power consumption with short connections.
3. Providing NB-IoT, LoRa and other various solutions for access to network equipment for access control problems to heterogeneous enterprise network equipment.

Devices can use the IoT platform for bidirectional communication with the cloud via the IoT Hub. The IoT platform provides upstream and downstream channels between devices and the cloud, providing stable and reliable support for device reports and issuing commands.

Device management requirements for the IoT platform is the following.

1. Providing device announcement function, registration support, function definition, scenario analysis, online debugging, remote configuration, firmware update, remote maintenance, real-time monitoring, group management and device removal.
2. Providing an object model of the device to simplify application development.
3. Availability of online and offline notification of equipment changes, which is convenient for obtaining the status of equipment in real time.
4. Providing data storage capability, which is convenient for storing and accessing massive device data in real time.
5. Support for OTA (over the air) updates, allowing remote hardware updates.
6. Provide a device shadow caching mechanism to separate the device from the application and solve the problem of unreliable communication in an unstable wireless network.

Security support (sensor authentication):

1. Providing a device authentication mechanism using one machine and one password, reduce the risk of device hacking and is suitable for devices that have the ability to pre-distribute identification keys in batches and write them to each chip. High level of security.
2. Providing pre-recording of a device with one type and one density and receiving data during authentication.

Communication security capabilities.

1. Support for Transport Layer Security (TLS for MQTT\HTTP), Datagram Transport Layer Security (DTLS for CoAP) data transmission channels to ensure confidentiality and data integrity, suitable for devices with sufficient hardware resources and not very sensitive to power consumption.

2. Availability of user-defined symmetric data encryption channels over TCP (MQTT) and UDP (CoAP), which are suitable for devices with limited resources and power consumption

3. The presence of a device management mechanism to ensure secure communication between it and the cloud platform.

4. Maintain isolation of communication resources at the device level (THEMES, etc.) to prevent problems such as unauthorized access to the device.

The platform's rules engine analyzes the forwarding data using the following algorithm.

1. Setting up rules for implementing communication between devices and fast implementation of M2M scenarios.

2. We redirect the data to the message queue (MQ) to ensure the stability and reliability of the uplink data of the consumer device of the application.

3. We redirect the data to the table storage to provide a joint solution: device data collection and structured storage.

4. Redirecting data to streaming computing to provide a joint solution: device data collection and streaming computing.

5. We forward the data to the TSDB database to provide a joint solution: collecting equipment data and storing time series data.

6. We redirect data to functional calculations to collect data about equipment and events.

After connecting the device to the Internet of Things platform, the data is transmitted directly to the platform server via the HTTP/2 protocol. At this step, we will configure the subscription function on the HTTP/2 server side. The server can receive device data by connecting to HTTP/2 via the SDK.

Simulation of the IoT SH network using the Alibaba cloud platform

Let's simulate the sensor. The first step in using the IoT platform is to create a product and the corresponding device in the cloud platform and obtain a device certificate (ProductKey, DeviceName and DeviceSecret). A street lamp is used as an example of a SH network sensor for modeling. Let's describe the algorithm for modeling the device.

1. Create an account and log in to the cloud platform console.

2. In the upper-left corner of the console, select the region where the Internet of Things platform is located, and then click "Public Instances" on the instance overview page.

3. On the left navigation panel, select Device Management > Products and click Create Product.

4. On the New Product page, after setting the parameters, click OK. The product name in the example in this section is a street lamp, and the category it belongs to is a custom category. Default values are used for other parameters.

5. On the Product Creation page, click the Go button to add the device.

6. On the Device List tab, click the Add Device button, enter the device name (DeviceName) as device2, set the note name as device 2 and click OK.

7. After successfully creating the device, in the pop-up dialog box "Add Full", click the "Copy device certificate with one click" button to get the device certificate. On the device details page, click View on the right side of DeviceSecret to get the device certificate. The device certificate contains the ProductKey, DeviceName and DeviceSecret components, which are an important authentication for the device when communicating with the IB cloud platform.

The Alibaba platform supports the definition of an object model for a product, abstracting the actual product into a data model consisting of attributes, services and events, which facilitates cloud management and data interaction. After creating the device, we will execute the algorithm for creating an object model, the device within the product will automatically inherit the contents of the object model.

1. Log in to the console of the IoT cloud platform

2. In the upper-left corner of the console, select the region where the platform is located, and then on the Instance Overview page, click Public Instances.

3. On the left navigation panel, select Device Management > Products. In the list of products, we will find the created product for street lighting and click "View" on the action bar.

4. On the Product Details page, go to the Function Definitions tab, and then click Edit Draft.

5. In the default module, on the Function Definition page, click the Add Custom Function button, configure the object model, and then click OK. We will install the main light switch and the operating current properties of the street lighting device, as shown below. Fill in the page.

6. After creating the full object model, you can click the TSL of the object model, and on the “Full Object Model” tab you can see the full JSON file of the product object model.

Click the release button in the lower left corner of the page, the “Online Release Model” dialog box will appear, click “Add Release Notes” and enter the version number or version description, click “OK” to view the model.

The algorithm for connecting the sensor to the platform:

1. On the Device page, click the “Add device” button.
2. In the “Add Device” dialog box, enter the device name: LightSwitch. Then click the Confirm button. Let's prepare the development environment.

3. Configure the file parameters in the project.

4. Click the “Form” button to complete the compilation of the project.

Performing a device simulation on a smartphone includes steps.

1. After the project is compiled, click the “Start” button to launch the project, the demo program is successfully launched on a virtual device, the device is connected to the Internet of Things platform.

2. Click on the “Mqtt Example” button.

3. On the Mqtt example page, after setting up the theme, click “Subscribe”.

4. After a successful subscription, we will return to the platform. On the List of Topics tab of the device details page, click Publish message on the control panel of the subscribed topic and enter the message input field in the Publish Message dialog box, enter a message, for example: Hello, world!, to simulate sending a message from the Internet of Things platform to the device.

5. On the “Mqtt Example” page, click the “Publish” button.

6. In the left navigation panel, select “Device Management > Device”, find the device and view its status. If the device status is displayed as online, it means that the device is successfully connected to the platform.

7. In the navigation bar on the left, click on the menu “Monitoring Operation > Registration Service”, select the product “night light switch” and view the logs of the device's Internet access, subscriptions to topics and reports.

Results and its discussion

After the project was compiled, clicked the green triangle button to run the project, As shown in the Fig.2., the demo program ran successfully in the virtual device, and the device was successfully connected to the IoT platform.

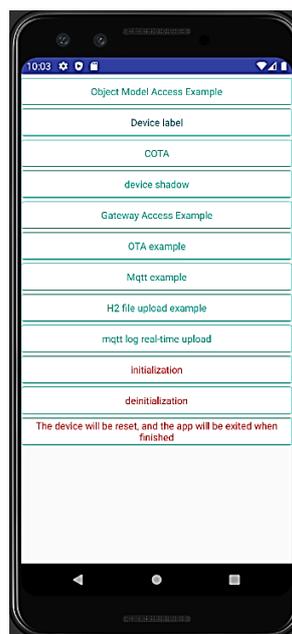


Fig. 2. Virtual phone show sub-page

After the topic was subscribed successfully, returned to the IoT platform. On the Topic list tab of the device details page, clicked Publish Message in the operation bar of the subscribed Topic, and then entered the message input field in the Publish Message dialog box, input a message as shown in Fig.4., for example: hello world!, to simulate sending a message from the IoT platform to the device.

Clicked on the Mqtt example, on the Mqtt example page, after set the Topic, clicked Subscribe as shown in Fig. 3, 4.

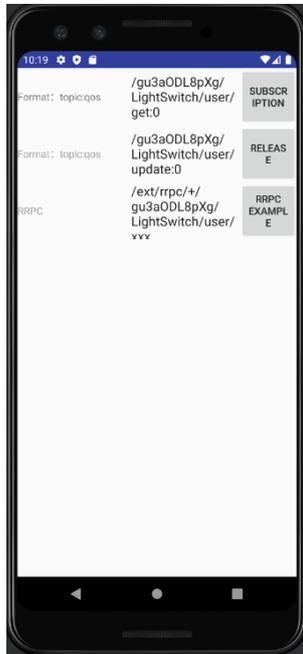


Fig. 3. Subscribe page

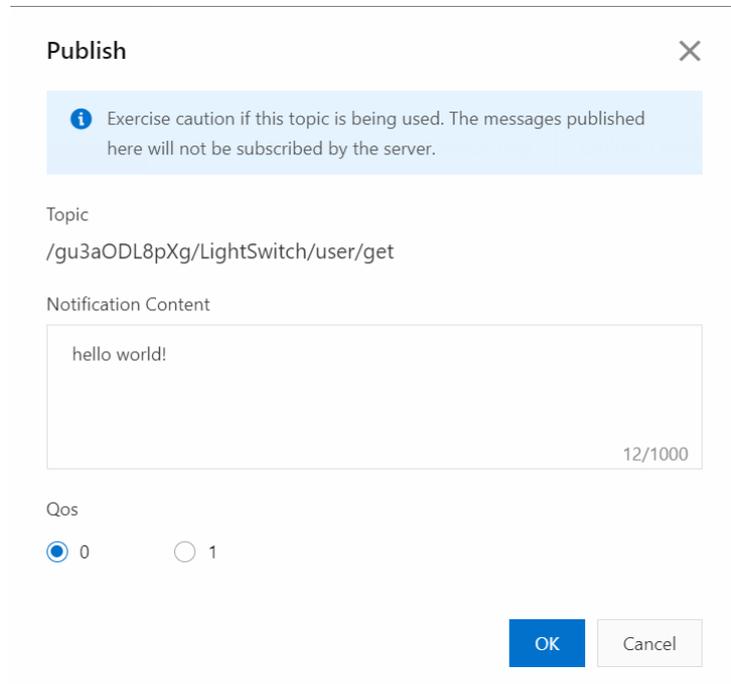


Fig. 4. Entered a message

On the Mqtt example page, after set the topic of the message to be published, clicked Publish, On the left navigation bar, selected Device Management > Device, found the device, and viewed the device status. If the device status was displayed as online, it means that the device is successfully connected to the IoT platform. In the navigation bar on the left, selected Monitoring Operation > Log Service, selected the night light switch product, and viewed the logs of the device going online, subscribed to topics, and reported messages as shown in Fig. 5.



Fig. 5. The mobile phone received the message sent by the platform

Conclusion

1. Alibaba IoT cloud platform has been selected as a cloud server for the IoT network project. Based on this cloud platform, the process of modeling the IoT network is considered. When modeling the IoT network, the structure was used that includes a smartphone (to simulate sensors, communication, display results) and a cloud platform. The use of Alibaba cloud platform, which reduces complexity of development process, was justified in the project of building the IoT smart home network.

2. The structure of the Alibaba IoT cloud platform is given, its main components are considered and the algorithm of its configuration is given. MQTT is used as an access protocol in the IoT network to achieve fast and reliable data transmission. As a sensor, a street lamp was used to create an instance of an IoT network on a cloud platform. The process of creating an IoT network is described in detail in steps, in which data from a street lamp is transmitted to a cloud platform, processed there, and then displayed on a mobile device. A mobile phone was used to implement two-way interaction, simulate the sensor of the IoT SH network and display the results. The algorithms for configuring the platform, modeling the sensor and creating an object model of the device of the IoT SH network are given. Results were shown.

References

1. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu. [Internet of Things]. Samara: PGUTiI; 2015. (In Russ)
2. Vishnyakov V.A. [Platforms for the development of Internet of Things networks]. *Bulletin of Communications*. 2021;2:62-65. (In Russ)
3. Analysis of the Advantages of China's Five Internet of Things Platforms. *Internet of Things Technology*. 2018;8(04):3-4.
4. Shuqing J., Ying F. A data acquisition control system based on MQTT protocol. *Information and Communication*. 2019;37(08):80-82.
5. Yao D., Xie X.S., Yang J.J. Research and Implementation of Internet of Things Communication System Based on MQTT Protocol. *Information Communication*. 2016;(3):33-35.
6. Luthfi F., Juanda E., Kustiawan I. Optimization of Data Communication on Air Control Device Based on Internet of Things with Application of HTTP and MQTT Protocols. *Materials Science and Engineering*. 2018, July: 1-9.
7. Amnalou S., Bakar K.A.A. Lightweight security mechanism over MQTT protocol for IoT devices. *International Journal of Advance Computer Science. Application*. 2020;11(7):202-207.
8. Hussein N.A. Shujaa M.I. DNA computing based stream cipher for internet of things using MQTT protocol. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020;10(1):1035-1042.
9. Jingang Yu. Research on key technologies of converged communication based on IMS. *University of Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences)*. 2018: 1-13.
10. Chen S.L., Lee K.M., Li I.C. Using MQTT IIo T gateway to implement bi-direction communication manufacturing information system for smart factory. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*. 2020;41(5):585-594.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Information about the authors

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

Yu Chuyue – M. of Sci. 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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-85-93>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 004.021

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КЛАССИФИКАЦИИ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ В ЛЕСАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.К. ЛАБОХА, А.Ю. ШАМЫНА, А.Д. АРДЯКО

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

Поступила в редакцию 8 июня 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье предлагаются усовершенствования методики определения уровня пожарной опасности в лесах на основе прогнозных метеорологических и аэрокосмических данных. Проведен краткий анализ различных методик определения уровня пожарной опасности в лесах и используемых при этом наборов исходных параметров с целью определения оптимальных характеристик и свойств конечной методики для дальнейшего применения. Расчет оценки пожароопасности производится на основе базового показателя горимости по условиям погоды и корректирующих коэффициентов по значениям вегетационных индексов. Предложено разбиение вегетационных индексов по квартилям для относительной оценки растительности на рассматриваемой территории. Получены карты распределения лесных кварталов по классам пожарной опасности для территории Воложинского лесхоза согласно предложенной и иным методикам. Проведен сравнительный анализ численных и пространственных характеристик полученных оценок пожарной опасности в лесах по различным методикам. Согласно результатам оценки усовершенствованной методики, результаты ее применения коррелируют с оценкой согласно стандартизированной методике, позволяя скорректировать ее по результатам оценки растительности. Целесообразна верификация предложенной методики в пожароопасный период в реальных условиях с последующей оценкой результатов и доработкой в случае необходимости.

Ключевые слова: оценка опасности лесных пожаров, классы пожарной опасности, показатель горимости, аэрокосмические данные, вегетационные индексы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лабоха А.К., Шамына А.Ю., Ардяко А.Д. Совершенствование методики классификации уровня пожарной опасности в лесах с использованием метеорологических и аэрокосмических данных. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 85-93.

IMPROVEMENT OF THE CLASSIFICATION METHOD FOR THE FIRE HAZARD LEVEL IN FORESTS USING METEOROLOGICAL AND AEROSPACE DATA

ALEXANDER K. LABOKHA, ARTSIOM Yu. SHAMYNA, ALIAKSEI D. ARDYAKO

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

Submitted 8 June 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article proposes improvements to the method for determining the fire hazard level in forests based on predictive meteorological and aerospace data. A brief analysis of various methods for the fire hazard level determining in forests and the sets of initial parameters used in this case was carried out in order to determine the final method's optimal characteristics and properties for further application. The calculation of the fire hazard assessment is based on the flammability basic indicator according to weather conditions and correction factors based on the vegetation indices values. Vegetation indices division into quartiles is proposed for a vegetation relative assessment in the territory under consideration. Maps of the forest blocks distribution by fire hazard classes for the Volozhinsky forestry enterprise territory were obtained according to the proposed and other methods. A comparative analysis of the numerical and spatial characteristics of the obtained assessments of forests fire hazard using various methods was carried out. According to the improved methodology assessment results, its application results correlate with the assessment according to the standardized methodology, but adjusted according to the vegetation assessment results. It is advisable to verify the proposed methodology during a fire hazard period in real conditions, followed by an assessment of the results and refinement if necessary.

Keywords: forest fire hazard assessment, fire hazard classes, fire rate, aerospace data, vegetation indices.

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

For citation. Labokha A.K., Shamina A.Yu., Ardyako A.D. Improvement of the Classification Method for the Fire Hazard Level in Forests Using Meteorological and Aerospace Data. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 85-93.

Введение

Классификация территории лесного фонда по классам пожарной опасности, описанная в госстандарте Республики Беларусь¹, позволяет производить регулярную оценку горимости лесов исключительно по условиям погоды и является основным подходом в Беларуси, однако имеет низкое пространственное разрешение и не учитывает оценку состояния растительности. В свою очередь, использование аэрокосмических снимков и вегетационных индексов на их основе позволяет учесть воздействие большего числа факторов, влияющих на пожароопасность лесов, а также повысить пространственную точность конечной оценки. Однако использование исключительно аэрокосмических данных не позволяет выполнять оценку пожароопасной обстановки регулярно и как минимум раз в сутки по причинам привязанности к интервалу съемки спутником и возможной потери данных на снимке ввиду высокой облачности. Соответственно, существует возможность совершенствования методики классификации уровня пожарной опасности в лесах в случае совместного применения оценки по условиям погоды и вегетационных индексов как показателей состояния растительности, что позволит выполнять регулярную оценку пожароопасности лесов вне зависимости от условий аэрокосмической съемки и детализировать ее для меньших территориальных единиц.

¹Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг аэрокосмический. Номенклатура контролируемых параметров чрезвычайных ситуаций: СТБ 1408-2003 (ГОСТ Р 22.1.04-96): [введен впервые: дата введения 01.01.2004]. – Изд. официальное. – Минск: Госстандарт, БелГИСС, печ. 2003. – III 9 с. – (Государственный стандарт Республики Беларусь).

Существующие методики оценки уровня пожарной опасности в лесах

Вопросы мониторинга и прогнозирования лесных пожаров в Беларуси регулируются госстандартом СТБ 1408-2003¹, который является модификацией стандарта Российской Федерации. Согласно стандарту комплексный показатель горимости леса по условиям погоды рассчитывается по комплексному показателю Н.А. Диченкова на основе числа сухих суток (осадков менее 2,6 мм) и разницы температур воздуха и точки росы, а класс пожарной опасности – по таблице по значению комплексного показателя и сумме осадков за 10 суток. Сейчас расчет комплексного показателя горимости производится раз в сутки на основе фактических погодных условий с 56 пунктов метеонаблюдений, неравномерно распределенных по 118 районам Республики Беларусь, из-за чего могут игнорироваться локальные аномалии погоды. Использование прогнозных данных различных метеорологических моделей позволяет решить проблему регулярности данных погодных условий и повысить их пространственное разрешение до 10–25 км в зависимости от модели.

На рис. 1 представлено распределение лесных кварталов Воложинского лесхоза по классам пожарной опасности по методике СТБ 1408-2003 (показателю Н.А. Диченкова); использовались метеоданные прогнозной модели ERA5 с пространственным разрешением 0,25°×0,25°. Территории соответствует 18 рассчитанных значений; при расчете по фактическим значениям показателя метеостанции Воложина были бы экстраполированы на всю территорию.

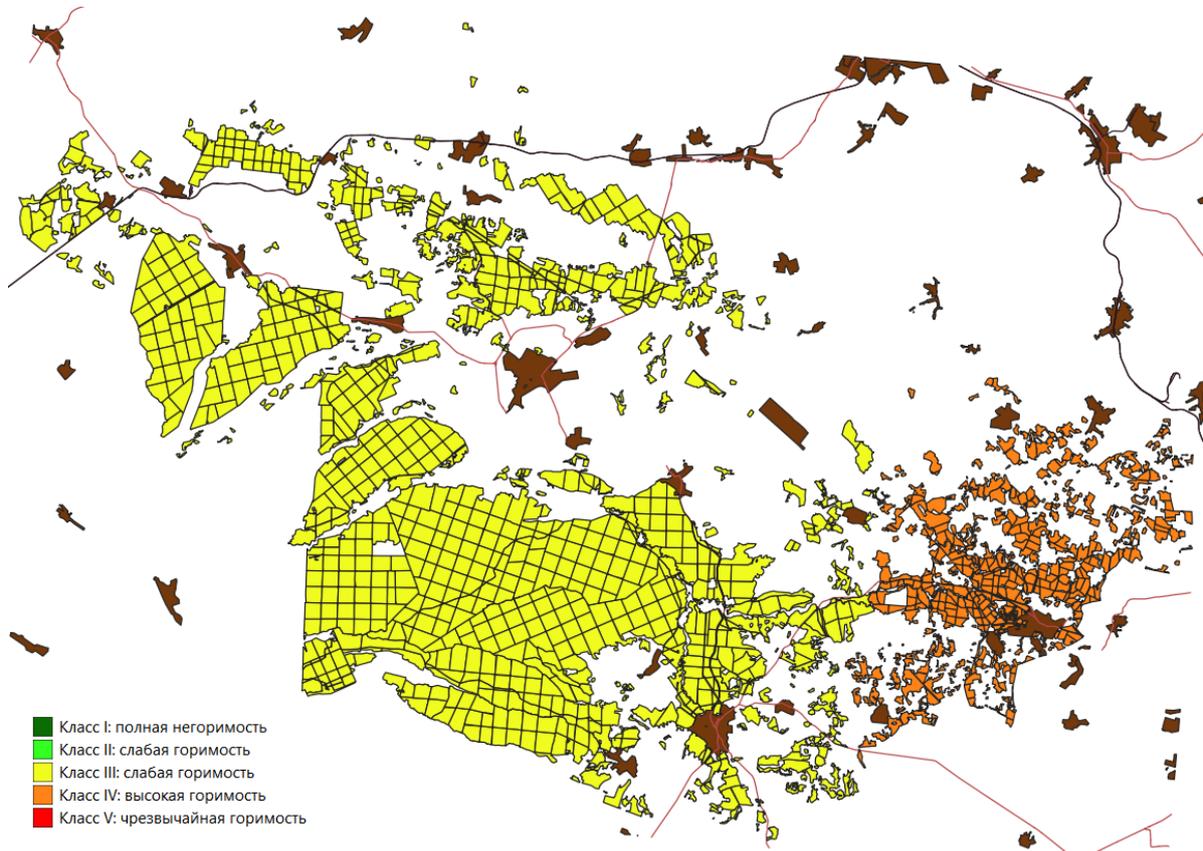


Рис. 1. Классы пожарной опасности лесных кварталов на 24.04.2019 г. по СТБ 1408-2003

Fig. 1. Fire hazard classes of forest quarters as of 24.04.2019 according to STB 1408-2003

Для оценки пожарной опасности по условиям погоды также можно использовать показатель Л.И. Сверловой [1], главное отличие которого от показателя Н.А. Диченкова – увязывание порога сбрасывания накопленного показателя с количеством выпавших осадков и учет скорости ветра. Можно сделать вывод, что оба показателя были выведены эмпирически и поэтому позволяют оценить уровень пожароопасности только на некотором приближении (пороговое число осадков для сброса показателя существенно влияет на конечную оценку).

Для определения уровня пожарной опасности в лесах также используются сведения об оценке состояния лесного фонда. В качестве примера можно привести Польшу, где согласно принятой методике (Rozporządzenie Ministra Środowiska № 1070 z dnia 13 lipca 2015 r.) степень риска лесных пожаров определяется на основании фактических измерений влажности, температуры воздуха, относительной влажности воздуха и количества осадков за последние сутки; число станций измерений показателей регламентировано в зависимости от пожарной категории лесов. Этот более комплексный подход со сбором данных непосредственно на территории лесного фонда, помимо апробации, требует значительных финансовых инвестиций. Поэтому для получения сведений о состоянии лесного фонда и последующей оценки уровня пожарной опасности в лесах возможно использовать дистанционные методы сбора данных.

Перспективным является применение аэрокосмических данных для мониторинга природных комплексов. Выполнение операций с различными спектральными каналами (диапазонами) снимков позволяет рассчитывать вегетационные индексы – показатели для оценки параметров растительности – и переходить к оценке качественных и количественных показателей зеленых насаждений. Большинство вегетационных индексов выведены эмпирически с учетом различий отражательной способности в зависимости от типа растительности и ее состояния [2]. Необходимо также учитывать существующие ограничения: нерегулярность выполнения снимков, искажения и потерю части данных в случае облачности.

Одной из первой масштабных работ в данном направлении была система ежедневного определения и прогнозирования уровня пожарной опасности для бореальных лесов Канады [3]. Для определения уровня пожарной опасности использовалась накопленная за сутки влага и три вегетационных параметра. В результате сравнения значений четырех показателей в пикселе со средним на исследуемой области каждый пиксель получал от 0 (низкий класс опасности) до 4 баллов (высокий класс опасности). Полученная система прошла верификацию определения уровня пожарной опасности: более 95 % зафиксированных пожаров произошли в областях с классом пожарной опасности от «умеренного» до «чрезвычайно высокого».

Попытка создания подобной системы были предприняты в Беларуси в 2014–2015 гг. командой А.А. Пушкина [4]. В ее основу был положен тот же принцип, что и в канадском исследовании: сравнительная оценка значений параметров на конкретном участке со средними по исследуемой территории. Конечная оценка от 0 до 4 баллов соответствует принятой в Беларуси пятиуровневой градации классов пожарной опасности.

Распределение лесных кварталов Воложинского лесхоза по классам пожарной опасности согласно методике А.А. Пушкина представлено на рис. 2. В настоящей работе в качестве источника снимков была использована спутниковая система Sentinel-2 с пространственным разрешением 20 м. Для получения индекса TVDI использовались данные спутниковой системы Sentinel-3, содержащей температурный датчик; их пространственное разрешение составляет всего 1 км, что незначительно снижает точность полученной оценки.

Анализ построенных карт с распределением по классам пожарной опасности на 24.04.2019 г., 10.06.2020 г. и 17.06.2020 г. показал, что в указанные даты кварталам были присвоены все возможные классы пожарной опасности. Выбор указанных дат обусловлен отсутствием значимой облачности на аэрокосмических снимках, а также различными уровнями пожарной опасности, определенными согласно методике по СТБ 1408-2003. На территории Воложинского лесхоза 24.04.2019 г. действовал запрет на посещение лесов, однако согласно полученной оценке в 476 кварталах из 998 (47,7 %) должен быть установлен низкий (I или II) класс пожарной опасности. Запрет на посещение лесов 10.06.2020 г. введен не был, однако согласно оценке по методике А.А. Пушкина для 128 кварталов (12,8 %) получен высокий (IV или V) класс пожарной опасности.

Можно сделать вывод, что в результате применения методики, предложенной А.А. Пушкиным, для произвольной территории и даты потенциально может быть получен любой класс пожарной опасности. Рассмотренная методика позволяет скорее оценить вегетационное состояние растительности лесных кварталов и может быть усовершенствована. Применение подобного подхода позволяет повысить пространственное разрешение и перейти от уровня лесхозов к лесничествам, лесным кварталам или выделам.

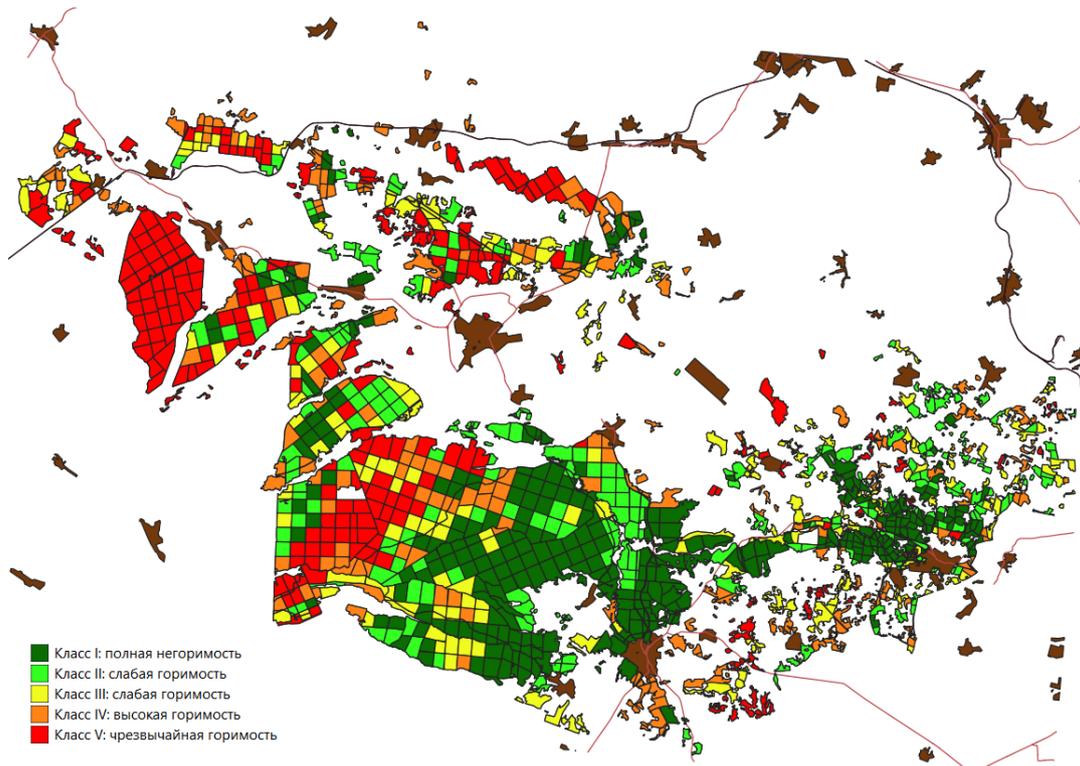


Рис. 2. Классы пожарной опасности лесных кварталов на 24.04.2019 г. по методике А.А. Пушкина
Fig. 2. Fire hazard classes of forest quarters as of 24.04.2019 according to A.A. Pushkin's method

Совершенствование системы оценки уровня пожарной опасности в лесах на основе метеорологических показателей и аэрокосмических снимков

Анализ результатов применения методики А.А. Пушкина показывает, что важен не только выбор отдельных параметров, но и каким образом они учитываются: путем анализа абсолютных значений либо их сравнения со средними значениями. Поскольку для большинства вегетационных индексов еще не получена таблица точного соответствия значений индекса фактическому состоянию растительности, отсутствует статистика изменений в зависимости от времени года и иных факторов, то определение уровня пожарной опасности по значениям вегетационных индексов потребует длительной верификации для доработки методики оценки. Поэтому в качестве базовой оценки уровня горимости насаждений было решено использовать оценку по условиям погоды на основе показателя Н.А. Диченкова¹, а ее корректировку выполнять с помощью сравнения значений вегетационных индексов.

Для более точного учета метеорологических показателей и в связи с отсутствием ограничений по использованию только целых значений классическая схема соответствия показателя Н.А. Диченкова классам горимости K_b была детализирована (табл. 1). В качестве базовой оценки по условиям погоды K_b также может быть использован комплексный показатель Сверловой [1] или предложен новый, однако это является предметом отдельного исследования.

Для корректировки базового показателя горимости были выбраны три вегетационных индекса, достаточно полно характеризующих группы факторов влияния на пожароопасность лесов согласно предшествующим исследованиям [3, 4]. Индекс наличия «сухого» углерода PSRI позволит определить количество сухой и отмирающей биомассы, которая является легковоспламеняющейся. Индекс сухости растительного покрова DMCI позволит оценить влажность поверхности, а нормализованный разностный водный индекс NDWI – влажность непосредственно растительности. Деление значений показателя относительно среднего, примененное в работах [3, 4], не учитывает степень различия со средним, уравнивая по весу значение, незначительно меньшее среднего, с близким к минимальному. Использование квартилей ($Q_1 = 0,25$, $Q_2 = 0,5$ и $Q_3 = 0,75$ квантили) для разбиения ряда значений показателя на четыре группы позволит не только сравнивать с медианой, но и учитывать степень

удаленности от нее, что дает возможность детализировать влияние состояния растительности в конечной оценке. В табл. 2 сопоставлены четверти, образуемые квантилями, с корректирующими коэффициентами для вегетационных индексов PSRI, DMCI и NDWI.

Таблица 1. Схема соответствия комплексного показателя базовому значению горимости
Table 1. Scheme of correspondence of the complex indicator to the basic value of the flammability

Комплексный показатель Complex indicator	< 250	< 350	< 450	< 550	< 700	< 1500	< 2700	< 4000	< 5700	< 7700	< 10000	< 12500	≥ 12500
Базовое значение горимости K_b Base value of burning K_b	1	$1\frac{1}{3}$	$1\frac{2}{3}$	2	$2\frac{1}{3}$	$2\frac{2}{3}$	3	$3\frac{1}{3}$	$3\frac{2}{3}$	4	$4\frac{1}{3}$	$4\frac{2}{3}$	5

Таблица 2. Корректирующие коэффициенты квантилей для вегетационных индексов
Table 2. Correction coefficients of quartiles for vegetation indices

	Квартиль Quartile	1	2	3	4
Корректирующий коэффициент K_i Corrective index	для индексов PSRI, DMCI for indexes PSRI, DMCI	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$
	для индекса NDWI for index NDWI	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	$-\frac{1}{6}$	$-\frac{1}{2}$

В результате корректирующий коэффициент оценки вегетационного состояния растительности K_{veg} будет находиться в диапазоне $[-1,5, 1,5]$ и рассчитываться по формуле

$$K_{veg} = K_{PSRI} + K_{DMCI} + K_{NDWI}, \quad (1)$$

где K_{PSRI} , K_{DMCI} , K_{NDWI} – корректирующие коэффициенты индексов PSRI, DMCI и NDWI.

Суммарный показатель $K_{res} = K_b + K_{veg}$ является дробным с диапазоном, превышающим используемый в настоящее время в Беларуси диапазон классов горимости от 1 до 5. Поэтому итоговый класс горимости K_{fire} в случае выхода K_{res} за пределы диапазона $[1, 5]$ равен ближайшей границе диапазона. Обработка аэрокосмических снимков осуществлялась в геоинформационной системе QGIS 3.10, которая позволяет получить консольный код команд для дальнейшей полной или частичной автоматизации обработки снимков.

На рис. 3 представлено распределение лесных кварталов Воложинского лесхоза по классам пожарной опасности на 24 апреля 2019 г. по усовершенствованной методике, полученное с использованием снимков спутника Sentinel-2. При ее визуальном сравнении с картами пожарной опасности согласно методик СТБ 1408-2003 (рис. 1) и А.А. Пушкина (рис. 2) можно отметить корреляцию классов пожарной опасности, определенных по усовершенствованной методике, с классами горимости по другим методикам. Класс горимости по предложенной методике в подавляющем большинстве случаев равен либо является соседним к классу, определенному по методике СТБ 1408-2003. Изменение класса пожарной опасности в сторону большей либо меньшей горимости обусловлено учетом показателей вегетации. Корреляция результатов предложенной методики с методикой А.А. Пушкина обусловлена использованием для определения корректирующего коэффициента тех же вегетационных индексов, которые используются в показателе А.А. Пушкина. Подобные утверждения также справедливы для полученных карт оценки пожарной опасности в лесах на 10 и 17 июня 2020 г. Таким образом, визуальный анализ карт пожарной опасности подтверждает адекватность предложенного показателя и наличие взаимосвязей с существующими показателями.

Динамика изменения среднего уровня пожарной опасности в лесах на территории Воложинского лесхоза, определенная по различным методикам, приведена на рис. 4. Можно заметить, что средний уровень горимости по методике А.А. Пушкина в среднем равен 2,75 и не коррелирует с погодными условиями, которые используются в методике СТБ 1408-2003. В то же время средний уровень горимости по усовершенствованной методике, очевидно, коррелирует с методикой СТБ, что обусловлено применением по результатам оценки вегетации

как положительных, так и отрицательных коэффициентов для корректировки базовой оценки по условиям погоды. Значимые расхождения (до 0,5 класса) наблюдаются только при среднем уровне горимости около 1 либо 5, что объясняется невозможностью дальнейшей корректировки класса горимости за пределы используемого диапазона.

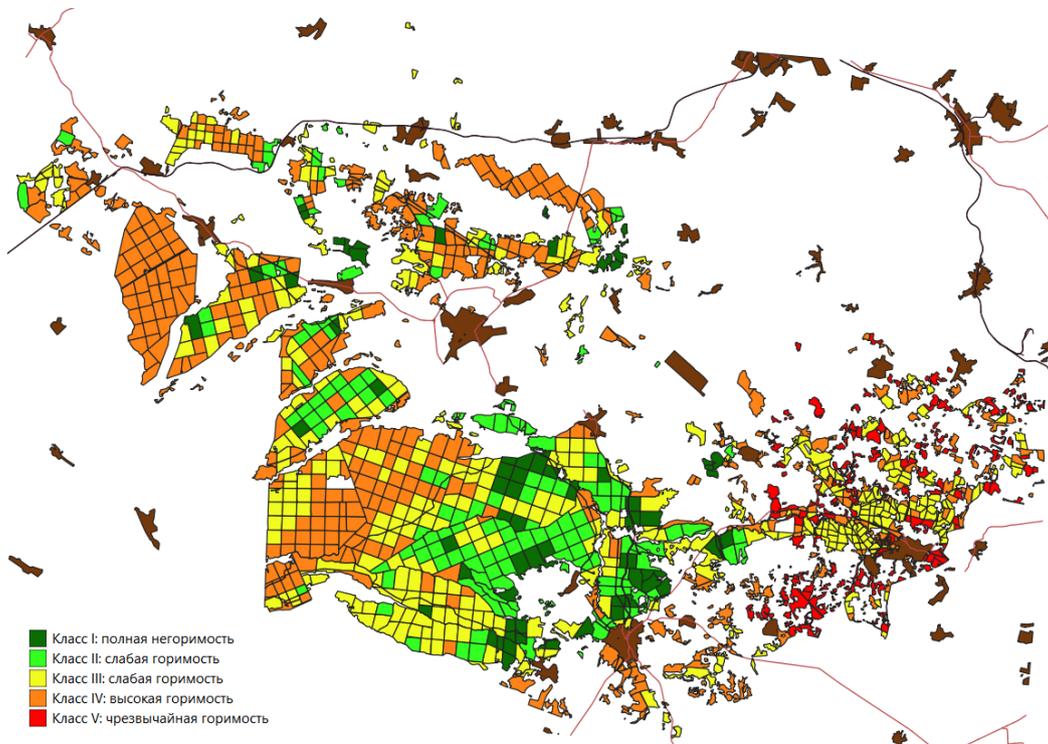


Рис. 3. Классы пожарной опасности лесных кварталов на 24.04.2019 г. по усовершенствованной методике
Fig. 3. Fire hazard classes of forest quarters as of 24.04.2019 according to the improved methodology

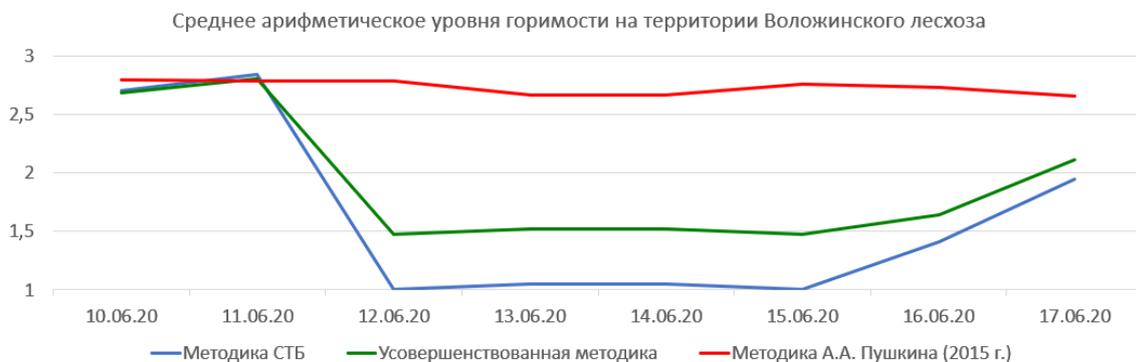


Рис. 4. Среднее арифметическое уровня горимости 10–17 июня 2020 г. по различным методикам
Fig. 4. Arithmetic mean of fire level on June 10-17, 2020 according to various methods

Был проведен анализ распределения лесных кварталов по классам пожарной опасности, его визуализация представлена на рис. 5. Показатель методики А.А. Пушкина позволяет выполнить оценку состояния растительности и сопутствующих показателей, но не подходит для использования в качестве оценки пожарной опасности в лесах с учетом существующей нормативной правовой базы. Распределение кварталов по классам горимости в результате применения усовершенствованной методики в целом соответствует распределению по действующему стандарту: часть кварталов была перераспределена в соседние классы пожарной опасности по результатам оценки вегетации. Таким образом, предложенный показатель сохраняет преимущество в определении уровня горимости лесов по условиям погоды, но при этом позволяет лучше стратифицировать кварталы в пределах лесничеств и обходов на основе оценки состояния растительности по вегетационным индексам. Это позволит оптимизировать проведение защитных мероприятий в лесах по предупреждению пожаров, маршруты обхода и патрулирования.

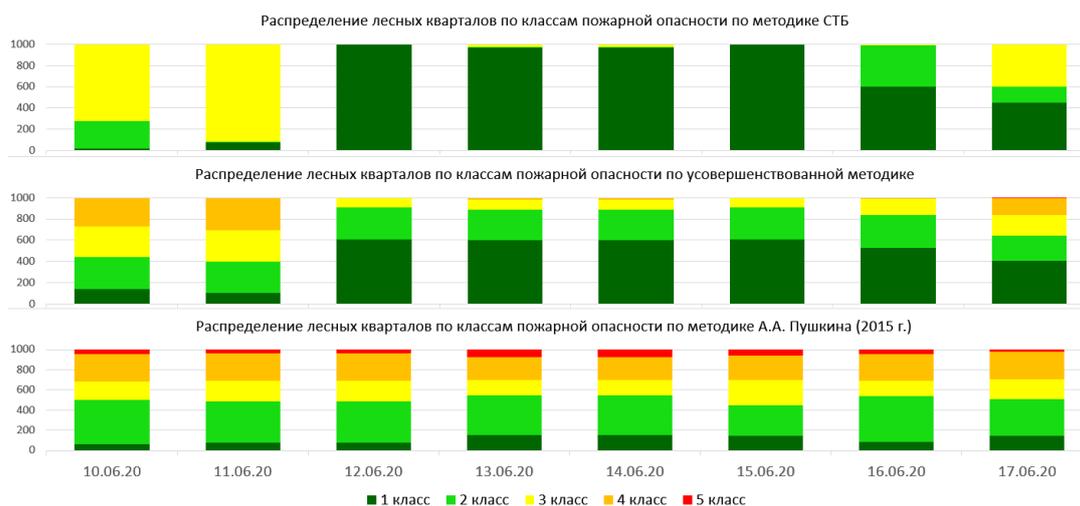


Рис. 5. Классификация пожароопасности лесных кварталов 10-17 июня 2020 г. по различным методикам
Fig. 5. Distribution of forest areas on June 10-17, 2020 by fire hazard classes according to various methods

Важно отметить, что применение методов замены участков снимка, содержащих облачность, является необходимым условием для построения качественной и эффективной системы регулярного мониторинга, использующей аэрокосмические снимки. Это обусловлено высоким процентом облачности: согласно статистике спутниковых снимков, процент облачных дней составляет до 60 % для территории Беларуси [5], а в 2019–2020 гг. из 402 снимков территории Воложинского лесхоза за пожароопасный период с марта по октябрь, выполненных спутниками Sentinel-2, только 97 снимков содержали на снимке не более 20 % облачности.

Заключение

Анализ существующих методик определения уровня пожарной опасности в лесах позволил предложить новый подход, совмещающий оценку пожарной опасности по условиям погоды с результатами сравнительного анализа состояния растительности. Проведенная верификация подтвердила адекватность предложенного показателя и возможность его использования для определения уровня пожарной опасности в лесах. Применение аэрокосмических данных позволяет повысить пространственную точность конечного результата и провести дополнительную классификацию объектов исследования на основе дополнительных факторов.

По результатам фактических наблюдений и верификации в пожароопасный период предложенная методика определения уровня пожарной опасности в лесах может быть скорректирована путем доработки используемых коэффициентов или разбиения по квантилям. Также методика может быть дополнена результатами оценки как других вегетационных индексов, так и метеорологических параметров, таких как влажность почвы. Именно методики классификации уровня пожарной опасности, включающие как оценку по метеорологическим показателям, так и оценку состояния растительности, являются наиболее перспективными.

Список литературы

1. Сверлова Л.И. *Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды*. Хабаровск: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Дальневосточный научно-исследовательский центр УГМС ДВ; 1998.
2. Черепанов А.С. Вегетационные индексы. *Геоматика*. 2011;2:98-102.
3. Chowdhury E.H.; Hassan Q.K. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 2015;7:2431-2448. DOI: 10.3390/rs70302431.
4. Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах. *Труды БГТУ*. 2015;1(174):36-40.
5. Delgado-Bonal A., Marshak A., Yang Y., Oreopoulos L. Cloud Height Daytime Variability From DSCOVR/EPIC and GOES-R/ABI Observations. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022;3:780243. DOI: 10.3389/frsen.2022.780243.

References

1. Sverlova L.I. [Method for assessing fire hazard in forests by weather conditions]. Khabarovsk: Federal'naya sluzhba Rossii po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy. Dal'nevostochnyj nauchno-issledovatel'skij centr UGMS DV; 1998. (In Russ.)
2. Cherepanov A.S. [Vegetation indexes]. *Geomatika*. 2011;2:98-102. (In Russ.)
3. Chowdhury E.H.; Hassan Q.K. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. *Remote Sens*. 2015;7:2431-2448. DOI: 10.3390/rs70302431.
4. Pushkin A.A., Sidel'nik N.YA., Kovalevskij S.V. [Use of space imagery materials for assessing fire hazard in forests]. *Trudy BGTU*. 2015;1(174):36-40. (In Russ.)
5. Delgado-Bonal A., Marshak A., Yang Y., Oreopoulos L. Cloud Height Daytime Variability From DSCOVR/EPIC and GOES-R/ABI Observations. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022;3:780243. DOI: 10.3389/frsen.2022.780243.

Вклад авторов

Лабоха А.К. Лабоха А.К. предложил усовершенствования методики определения уровня пожарной опасности в лесах и осуществил их верификацию.

Шамына А.Ю. осуществил подготовку метеоданных и интеграцию их использования в существующее решение.

Ардяко А.Д. провел подготовку картографических материалов и принял участие в обобщении полученных результатов.

Authors' contribution

Labokha A.K. proposed improvements in the method for determining the fire hazard level in forests and carried out their verification.

Shamyna A.Yu. carried out the preparation of weather data and the integration of their use into the existing solution.

Ardyako A.D. prepared cartographic materials and took part in results summarizing.

Сведения об авторах

Лабоха А.К., магистр, ассистент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шамына А.Ю., м.т.н., старший преподаватель Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ардяко А.Д., м.т.н., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Labokha A.K., M. Sci., Assistant at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Ardyako A.D., M. Sci., Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293-84-63
email: labokha.poit@bsuir.by
Лабоха Александр Константинович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 17 293-84-63;
email: labokha.poit@bsuir.by
Labokha Alexander Konstantinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-94-100>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.085.345:004.056.5

ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ЭКРАНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПСЕВДООВАЛЬНЫХ РАССЕИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ КАНАЛУ

С.Э. САВАНОВИЧ., Т.В. БОРБОТЬКО

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

Поступила в редакцию 6 июня 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В работе рассмотрены результаты исследования влияния взаимного расположения влагосодержащих псевдоовальных рассеивающих элементов с линейными размерами 10...20, 2...4, 1...4 и 1...2 мм на значения коэффициентов отражения конструкций экранов электромагнитного излучения, включающих в себя эти элементы, и эффективной поверхности рассеяния наземных объектов, на поверхности которых закреплены или нанесены указанные конструкции. Размещение трех- или двухслойных структур, сформированных на основе псевдоовальных элементов с линейными размерами 2...4, 1...4, 1...2 мм, между двумя монослоями, выполненными на основе элементов с размерами 10...20 мм, приводит к снижению до -17,6 дБ значений коэффициентов отражения в диапазоне частот 2–12 ГГц конструкций экранов электромагнитного излучения, включающих в себя эти элементы. Значения эффективной поверхности рассеяния наземных объектов, на поверхности которых размещены указанные конструкции экранов электромагнитного излучения, варьируются в пределах 0,08...11,80 м², что свидетельствует о существенном затруднении перехвата информации о местоположении и характеристиках наземных объектов средствами технической разведки в диапазоне частот их функционирования.

Ключевые слова: защита информации, конструкция экрана электромагнитного излучения, псевдоовальный рассеивающий элемент, хлорид натрия, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы, коэффициент отражения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Широкодиапазонная конструкция экрана электромагнитного излучения на основе псевдоовальных рассеивающих элементов для защиты информации от утечки по электромагнитному каналу. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 94-100.

WIDE-BAND ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING CONSTRUCTION BASED ON PSEUDO-OVAL SCATTERING ELEMENTS FOR INFORMATION PROTECTION AGAINST LEAKAGE VIA ELECTROMAGNETIC CHANNEL

SVIATLANA E. SAVANOVICH, TIMAFEY V. BORBOTKO

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

Submitted 6 June 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The paper considers the results of a study of the influence of the relative position of moisture-containing pseudo-oval scattering elements with linear dimensions of 10...20, 2...4, 1...4 and 1...2 mm on the electromagnetic radiation reflection coefficients values of the electromagnetic radiation shielding structures, including these elements, and the effective scattering surface of the ground objects, on the surface of which the indicated structures are fixed or applied. Placement of three- or two-layer structures formed on the basis of pseudo-oval elements with linear dimensions of 2...4, 1...4, 1...2 mm, between two monolayers made on the basis of elements with dimensions of 10...20 mm, leads to the decrease up to -17,6 dB of the electromagnetic radiation reflection coefficients values in the frequency range of 2–12 GHz of the electromagnetic radiation shielding structures, including these elements. The values of the effective scattering surface of ground objects, on the surface of which the indicated electromagnetic radiation shielding structures are located, vary within 0,08...11,80 m², which is the reason of a significant difficulty in intercepting information about the location and characteristics of ground objects by means of technical intelligence in the frequency range of their operation.

Keywords: information security, electromagnetic radiation shielding structure, pseudo-oval scattering element, sodium chloride, sodium carboxymethyl cellulose, reflection coefficient.

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

For citation. Savanovich S.E., Borbotko T.V. Wide-Band Electromagnetic Radiation Shielding Construction Based on Pseudo-oval Scattering Elements for Information Protection Against Leakage Via Electromagnetic Channel. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 94-100.

Введение

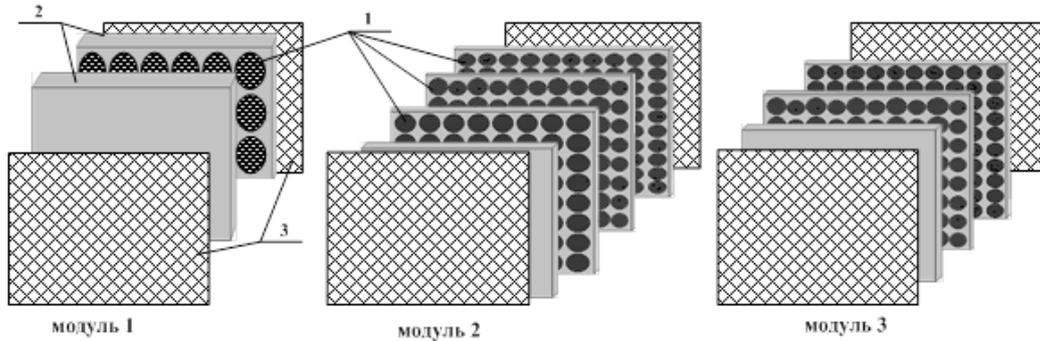
Одна из задач обеспечения защиты информации направлена на противодействие утечке информации, распространение которой ограничено [1], в том числе информации о местоположении и характеристиках наземных объектов, содержащейся в отраженных от их поверхности электромагнитных излучений (ЭМИ), формируемых средствами технической разведки (СТР) и осуществляющих ее получение по электромагнитному каналу (ЭМК) [2]. Решение указанной задачи сводится к уменьшению информативности демаскирующих признаков наземных объектов, включающих снижение их отражательных свойств и, соответственно, эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) за счет применения конструкций экранов ЭМИ [3], наносимых или закрепляемых на поверхности наземных объектов.

Учитывая, что защиту информации о наземных объектах необходимо обеспечивать в диапазоне частот 2–12 ГГц [4], актуальным представляется разработка широкодиапазонной конструкции экрана ЭМИ на основе псевдоовальных рассеивающих элементов, содержащих растворы хлорида натрия (NaCl). Целесообразность применения таких элементов в конструкциях экранов ЭМИ установлена в работах [5, 6].

Методика проведения эксперимента

Разработана конструкция экрана ЭМИ в виде совмещенных по ее ширине модулей, выполненных на основе влагосодержащих псевдоовальных рассеивающих элементов 1 и связующего материала 2 (рис. 1). Придание конструкции прочностных свойств обеспечивалось

применением армирующих элементов 3. Модуль 1 выполнен в виде монослоя, образованного при объединении двух слоев связующего материала, между которыми равномерно распределен слой влагосодержащих элементов, линейный размер которых в поперечнике составлял 10...20 мм. Модули 2 и 3 получены в результате объединения четырех и трех слоев связующего материала, между смежными слоями которого размещены элементы с размерами 2...4, 1...4, 1...2 и 1...4, 1...2 мм соответственно в порядке уменьшения их линейных размеров по отношению к поверхности наземных объектов.



1 – псевдоовальные рассеивающие элементы; 2 – связующий материал; 3 – армирующие элементы
1 – pseudooval scattering elements; 2 – binding material; 3 – reinforcing elements

Рис. 1. Эскиз модулей, выполненных на основе псевдоовальных рассеивающих элементов
Fig. 1. Sketch of modules made on the basis of pseudooval scattering elements

Для установления влияния размеров элементов и их взаимного расположения в конструкции экрана ЭМИ на ширину ее рабочего диапазона частот предложены три варианта ее конструктивного решения (рис. 2):

- 1) экран ЭМИ № 1 (рис. 2, *a*) – два модуля 1, между которыми размещен модуль 2;
- 2) экран ЭМИ № 2 (рис. 2, *b*) – два модуля 1, между которыми размещен модуль 3;
- 3) экран ЭМИ № 3 (рис. 2, *c*) – два модуля 3, между которыми размещен модуль 1.

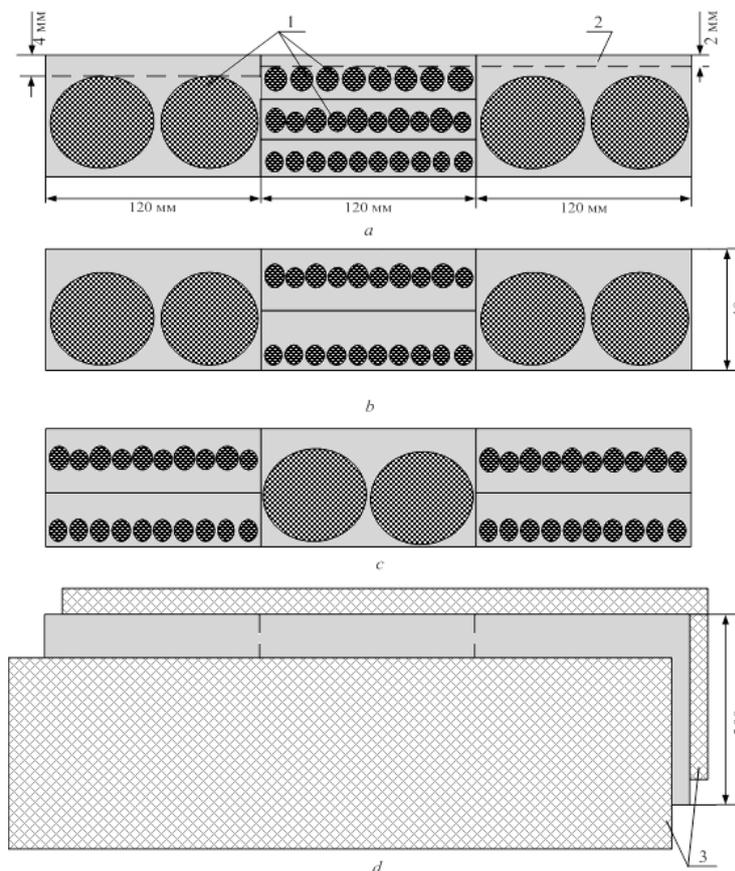


Рис. 2. Эскиз конструкций экранов электромагнитного излучения: *a, b, c* – вид спереди в разрезе, *d* – вид сверху
Fig. 2. Electromagnetic radiation shields scratch: *a, b, c* – sectional front view, *d* – view from above

Конструкции экранов ЭМИ, выполненные на основе вышеперечисленных псевдоовальных рассеивающих элементов, при их нанесении или закреплении на поверхности наземных объектов будут обеспечивать противодействие утечке информации в широком диапазоне частот за счет уменьшения ЭПР наземных объектов в случае согласования волновых сопротивлений внешней и нижней поверхностей экранов, свободного пространства и поверхности наземных объектов.

Согласование поверхностей экранов ЭМИ № 1–3 и свободного пространства обеспечивалось применением в качестве связующего материала полиуретановой мастики, которая является диэлектрическим материалом неорганического происхождения. Согласование поверхностей экранов ЭМИ и поверхности наземных объектов обеспечивалось ступенчатым увеличением диэлектрической проницаемости элементов, применяемых в конструкциях экранов, за счет пропитки псевдоовальных рассеивающих элементов с линейными размерами 10...20 и 1...2 мм растворами NaCl 20 % концентрации под воздействием вакуума, с размерами 2...4 и 1...4 растворами электролита указанной концентрации методом иммерсионного смачивания.

Влагосодержание псевдоовальных рассеивающих элементов с линейными размерами 10...20 и 1...2 мм составляло 41...45 %, 2...4 и 1...4 мм – 22...24 и 26...30 % соответственно.

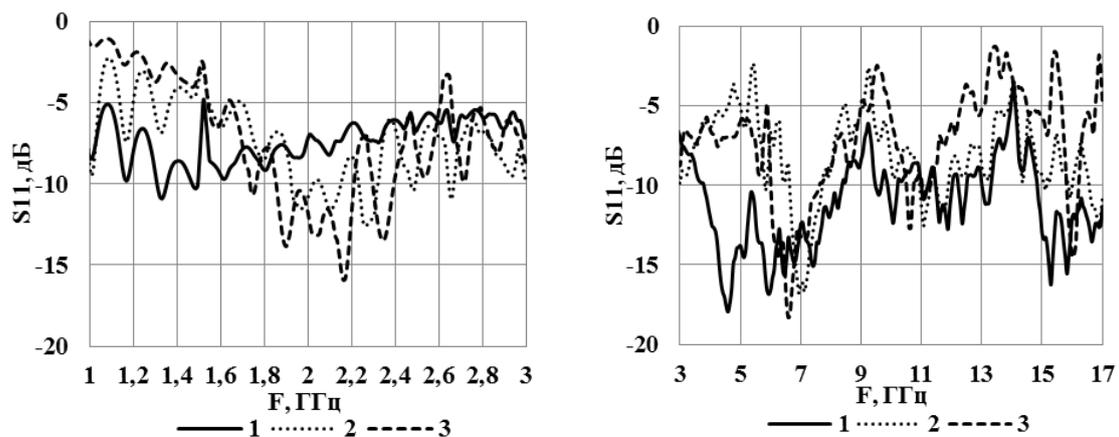
Толщина образцов экранов ЭМИ определялась в результате экспериментальных исследований и составляла 10 мм при линейном их размере 360 × 300 мм. Выбор размеров элементов, применяемых в экранах ЭМИ № 1–3, и их взаимное размещение относительно друг друга обусловлен диапазоном частот, в котором функционируют СТР.

Определение значений коэффициентов отражения ЭМИ образцов экранов № 1–3 в диапазоне частот 2–12 ГГц осуществлялось с помощью панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 с рупорными антеннами П6–23 М по методике, приведенной в [7]. При измерении значений коэффициентов отражения ЭМИ образцы экрана размещались на металлической подложке.

Измерение значений ЭПР образцов экранов ЭМИ № 1–3 выполнялось с помощью специализированного измерительного комплекса, состоящего из безэховой камеры, системы пространственной фиксации исследуемых образцов экрана, векторного анализатора электрических цепей Anristu VectorStar MS4642B и комплекта антенн П6-23А, в соответствии с методикой, приведенной в [8].

Результаты и их обсуждение

На основании анализа полученных результатов установлено, что в диапазоне частот 1–17 ГГц значения коэффициентов отражения образцов экранов ЭМИ № 1 и 2 варьируются в пределах –4,7...–17,6 и –2,5...–16,8 дБ соответственно (рис. 3). Значения коэффициента отражения образца экрана ЭМИ № 3 составляют –1,3...–18,3 дБ в рассматриваемом диапазоне частот.



Образцы экрана электромагнитного излучения: 1 – № 1, 2 – № 2, 3 – № 3
Electromagnetic radiation shield samples: 1 – No. 1, 2 – No. 2, 3 – No. 3

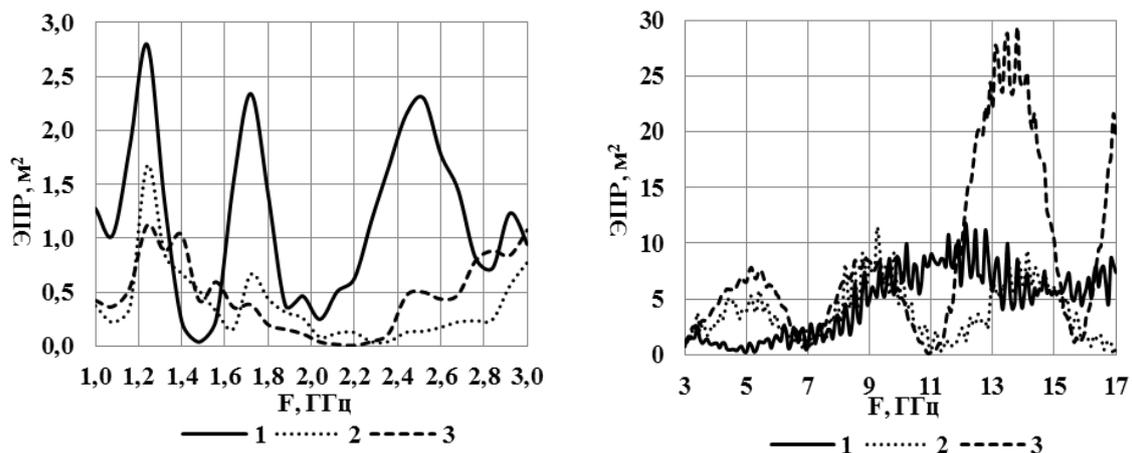
Рис. 3. Частотные зависимости (диапазон частот 1–17 ГГц) значений коэффициентов отражения электромагнитного излучения образцов экрана № 1–3, размещенных на металлической подложке
Fig. 3. Frequency dependences (frequency range 1–17 GHz) of electromagnetic radiation reflection coefficients values of the shield samples No. 1–3, placed on a metal substrate

Показано, что удаление псевдоовальных элементов с линейным размером 2...4 мм в образце экрана ЭМИ № 1 обеспечивает для образца экрана № 2 снижение его значений коэффициента отражения на частотах 1,9–3,4 ГГц при их одновременном увеличении на частотах 3,4–17,0 ГГц. Разница в значениях коэффициента отражения ЭМИ на указанных частотах составляет –3,4...–5,2, –1,5...–13,9 дБ соответственно. Это обусловлено ухудшением согласования поверхности образца экрана ЭМИ № 2 и свободного пространства, что подтверждается наличием резонанса на частотах 1,9–2,3 ГГц, свойственного для рассеивающих элементов с линейным размером 10...20 мм.

Определено, что уменьшение в два раза содержания элементов с линейным размером 10...20 мм при двукратном увеличении элементов с размерами 1...4 и 1...2 мм в образце экрана ЭМИ № 2 обеспечивает для образца экрана № 3 снижение его значений коэффициента отражения на частотах 1,9–2,3 ГГц при одновременном их увеличении на частотах 9,3–17,0 ГГц и не оказывает существенного влияния на его значения коэффициента отражения на частотах 1,0–9,3 ГГц. Разница в значениях коэффициентов отражения ЭМИ на указанных частотах составляет от –3,1 до –7,6 дБ.

Установлено, что комбинация элементов с линейными размерами 10...20, 2...4, 1...4 и 1...2 мм, реализованная в образце экрана ЭМИ № 1, обеспечивает снижение его значений коэффициента отражения в 2...4 раза на частотах 1–8 и 3–17 ГГц по сравнению с конструкциями, выполненными в виде монослоев на основе элементов с размерами 10...20 и 1...2 мм соответственно. Сочетание элементов с размерами 10...20, 1...4 и 1...2 мм, реализованное в образцах экранов ЭМИ № 2 и 3, обеспечивает снижение их значений коэффициентов отражения в 1,5...2,0 раза на частотах 1–3 ГГц по сравнению с конструкциями, выполненными в виде монослоев на основе элементов с размерами 10...20 и 1...2 мм.

Показано, что размещение образца экрана ЭМИ № 1 на поверхности наземных объектов позволяет снизить их значения ЭПР в 2...5 раз на частотах 2,8–17,0 ГГц по сравнению с конструкцией, выполненной в виде монослоя на основе элементов с размером 10...20 мм, в 1,5...10 раз на частотах 3,0–8,2 и 10–17 ГГц по сравнению с монослоем, выполненным на основе элементов с размером 1...2 мм (рис. 4). Применение образцов экранов ЭМИ № 2 и 3 приводит к снижению значений ЭПР наземных объектов в 10...15 раз на частотах 2–3, 6,4–12,0, 5,2–7,7 и 9,8–12,0 ГГц соответственно по сравнению с конструкциями, выполненными в виде монослоя, на основе элементов с размерами 10...20 и 1...2 мм.



Образцы экрана электромагнитного излучения: 1 – № 1, 2 – № 2, 3 – № 3
Electromagnetic radiation shield samples: 1 – No. 1, 2 – No. 2, 3 – No. 3

Рис. 4. Частотные зависимости (диапазон частот 1–17 ГГц) значений эффективной поверхности рассеяния образцов экрана № 1–3, размещенных на металлической подложке
Fig. 4. Frequency dependences (frequency range 1–17 GHz) of the effective scattering surface values of the shield samples No. 1–3, placed on a metal substrate

Заключение

Таким образом, показана возможность управляемого изменения значений ЭПР наземных объектов за счет варьирования линейных размеров и взаимного расположения влагосодержащих псевдоовальных рассеивающих элементов в конструкциях экранов ЭМИ, наносимых или закрепляемых на их поверхности. Определено, что оптимальным вариантом выполнения конструкции экрана ЭМИ, обеспечивающим противодействие получению достоверной информации о местоположении и характеристиках наземных объектов в диапазоне частот функционирования СТР, являются конструкции, выполненные в виде трех- или двухслойных структур, сформированных на основе влагосодержащих псевдоовальных рассеивающих элементов с линейными размерами 2...4, 1...4 и 1...2 мм, размещенные между двумя монослоями, выполненными на основе элементов с размерами 10...20 мм. В диапазоне частот 2–12 ГГц указанные конструкции экранов ЭМИ характеризуются значениями коэффициентов отражения до –17,6 дБ, что соответствует, в случае нанесения или закрепления их на поверхности наземных объектов, значениям ЭПР в пределах 0,08...11,80 м², что свидетельствует о существенном затруднении перехвата информации о местоположении и характеристиках наземных объектов СТР [9].

Список литературы

1. Акиншин Р.Н., Анищенко А.В., Ашурбейли И.Р., Киселев В.Д., Есиков О.В., Кислицын А.С. *Модели технических разведок и угроз безопасности информации*. Москва: Радиотехника; 2003.
2. Legenkiy M., Khrychov V. Numerical modeling of electromagnetic scattering from complex shape object with coating. *Frequenz*. 2022;76(1-2):75-82. DOI: 10.1515/freq-2021-0062.
3. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М., Терех И.С., Хижняк А.В. *Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах*. Минск: Бестпринт; 2006.
4. Федюнин П.А., Казьмин А.И. *Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники*. Москва: Физматлит; 2012.
5. Саванович С.Э., Борботько Т.В. Влияние вязкости водного раствора хлорида натрия, введенного в поры керамзита, на его радиопоглощающие свойства. *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2016;2:115-119.
6. Борботько Т.В., Саванович С.Э. Влияние влагосодержания керамзита на значения коэффициента отражения электромагнитного излучения конструкций экранов, выполненных на его основе. *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2021;66(3):93-100. DOI 10.29235/1561-8358-2021-66-1-93-100.
7. Неймах М.Р., Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыков Л.М. *Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов*. Минск: Бестпринт; 2013.
8. Вождаев В.В., Теперин Л.Л. *Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов*. Москва: ФИЗМАТЛИТ; 2018.
9. Maslovskiy A., Vasylets V., Nechitaylo S., Sukharevsky O. Method of radar masking of the ground based military equipment objects. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019;78(1):47-58. DOI 10.1615/TelecomRadEng.v78.i1.60.

References

1. Akinshin R.N., Anishchenko A.V., Ashurbeyli I.R., Kiselev V.D., Yesikov O.V., Kislitsyn A.S. [*Models of technical intelligence and information security threats*]. Moscow: Radiotekhnika; 2003. (in Russ.)
2. Legenkiy M., Khrychov V. Numerical modeling of electromagnetic scattering from complex shape object with coating. *Frequenz*. 2022;76(1-2):75-82. DOI: 10.1515/freq-2021-0062.
3. Borbotko T.V., Kolbun N.V., Lyn'kov L.M., Terekh I.S., Khizhnyak A.V. [*Electromagnetic radiation absorbers. Use in the armed forces*]. Minsk: Bestprint; 2006. (in Russ.)
4. Fedyunin P.A., Kazmin A.I. [*Methods of radio-wave control of parameters of protective coatings of aviation equipment*]. Moscow: Fizmatlit; 2012. (in Russ.)
5. Savanovich S.E., Borbotko T.V. [The effect of the viscosity of an aqueous solution of sodium chloride introduced into the pores of expanded clay on its radar absorbing properties]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2016;2:115-119. (in Russ.)

6. Borbot'ko T.V., Savanovich S.E. [Water content of expanded clay influence on the reflection coefficient of electromagnetic shield]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2021;66(3):93-100. DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-1-93-100. (in Russ.)
7. Neamach M.R., Boyprav O.V., Borbotko T.V. Lynkov L.M. [*Radio-Shielding Modular Structures Based on Powder Materials*]. Minsk: Bestprint Publ; 2013. (in Russ.)
8. Vozhdaev V.V., Teperin L.L. [*Characteristics of radar visibility of aircraft*]. Moscow: FIZMATLIT; 2018. (in Russ.)
9. Maslovskiy A., Vasylets V., Nechitaylo S., Sukharevsky O. Method of radar masking of the ground based military equipment objects. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019;78(1):47-58. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i1.60.

Вклад авторов

Борботько Т.В. определил цель и задачи проведения исследования.

Саванович С.Э. разработала варианты конструктивного исполнения экранов электромагнитного излучения, изготовила их образцы и выполнила интерпретацию результатов измерений значений коэффициентов отражения и эффективной поверхности рассеяния широкодиапазонных конструкций экранов, выполненных на основе псевдоовальных рассеивающих элементов.

Authors' contribution

Borbotko T.V. defined the purpose and objectives of the study.

Savanovich S.E. developed variants of the design of electromagnetic radiation screens, produced their samples and interpreted the measurement results of the reflection coefficients and the effective scattering surface of wide-range screen designs made on the basis of pseudooval scattering elements.

Сведения об авторах

Борботько Т.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Саванович С.Э., ассистент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Borbotko T.V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Security of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Savanovich S.E., Assistant at the Department of Information Security of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293-84-56;
e-mail: svetasav@bsuir.by
Саванович Светлана Эдуардовна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 17 293-84-56;
e-mail: svetasav@bsuir.by
Sviatlana Savanovich