



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ,  
НАНОФИЗИКИ И  
ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

# РЭНСИТ:

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА.  
НАНОСИСТЕМЫ.  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ.**

**2024, том 16, № 1**

ОСНОВАН В 2009 г. – печатное издание  
С 2014 г. – печатное и сетевое издание  
ВЫХОДИТ ЧЕТЫРЕ РАЗА В ГОД  
МОСКВА

*Главный редактор*

Грачев В.И.  
grachev@cplire.ru

*Зам. гл. редактора*

Макаров В.А., д.ф.-м.н., проф., МГУ

*Зам. гл. редактора*

Губин С.П., д.х.н., проф., ИОНХ РАН

*Ответственный секретарь*

Капшин В.В., к.ф.-м.н., ИРЭ РАН  
kashin@cplire.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Андреев А.В., д.ф.-м.н., МГУ

Анисимкин В.И. д.ф.-м.н., ИРЭ

Бушуев В.А., д.ф.-м.н., МГУ

Гуляев Ю.В., д.ф.-м.н., акад.РАН, ИРЭ

Дмитриев А.С., д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Илюшин Я.А., д.ф.-м.н., МГУ

Козарь А.В., д.ф.-м.н., МГУ

Колесов В.В., к.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Корнилова А.А., к.ф.-м.н., МГУ

Кузькин В.М., д.ф.-м.н., ИОФ РАН

Кузнецова И.Е. д.ф.-м.н., ИРЭ

Окопуб А.В., д.ф.-м.н., ИИХ СО РАН

Орешко А.П., д.ф.-м.н., МГУ

Петров И.Б., д.ф.-м.н., ч.-к. РАН, МФТИ

Переселков С.А., д.ф.-м.н., ВГУ

Потапов А.А., д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Русаков В.С., д.ф.-м.н., МГУ

Сигов А.С., д.ф.-м.н., акад.РАН, МИРЭА

Солдатов Е.С., д.ф.-м.н., МГУ

Фетисов Ю.К., д.ф.-м.н., МИРЭА

Черепенин В.А., д.ф.-м.н., акад.РАН, ИРЭ

Верона Э., DrSci, Италия

Кавазое Е., DrSci, Япония

Личэн Цзяо, Ph.D, Китай

Сангаа Дэлэг, DrSci, Монголия

Скиртач А., DrSci, Бельгия

Энхтор А., DrSci, Монголия

**ISSN 2218-3000**

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и  
массовых коммуникаций Российской Федерации.  
Свидетельство ПИ №ФС77-38976 от 02.03.2010 г.

Все права защищены. Никакая часть этого издания  
не может быть воспроизведена в какой-либо форме  
без письменного разрешения издателя.

©РАЕН 2024

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

125009 МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ,  
ул. Моховая, 11, корп. 7, к. 218-219,  
тел. +7 495 629 3368, факс 495 629 3678 Грачев В.И.

Отпечатано в изд.-полиграфич. центре "МАСКА"  
г. Москва 117303, ул. Малая Юшуньская, 1/2.

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО  
СИГНАЛА ПОСЛЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Дегтярев А.Н., Афонин И.А., Поляков А.А. .... 3

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ  
В ФОТОННЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ОБРАБОТКИ  
СИГНАЛОВ И ПОЛЕЙ

Потапов А.А. .... 11

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ  
БЕСПРОВОДНОЙ ПОДВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. .... 31

ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ЁМКОСТНЫМ  
ИНТЕГРИРОВАННЫМ ДАТЧИКОМ

Мовчан А.К., Ломаков Е.В., Рогожников Е.В., Савенко К.В. .... 43

### МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ ЭКГ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ, ИНЖЕНЕРНОГО ВЫБОРА ФУНКЦИЙ И  
РАДИОЧАСТОТНОГО КЛАССИФИКАТОРА

Анас Фуад Ахмед, Хадил Н. Абдуллах, Бараа М. Албакер ..... 53

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
ПОИСКА ПРИЗНАКОВ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА И

ЭССЕНЦИАЛЬНОГО ТРЕМОРА НА ОСНОВЕ АУС-ДИАГРАММ

Сушкова О.С., Морозов А.А., Хохлова М.Н., Кершнер И.А., Габова А.В.,

Чигалейчик Л.А., Карабанов А.В. .... 67

### ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ТРЕКИ СТРАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ИХ СВОЙСТВА. ПОПЫТКА  
ОБЪЯСНЕНИЯ

Пархомов А.Г., Жигалов В.А., Неволлин В.К. .... 79

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕГО СПИНОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА В  
МЕТАЛЛАХ ДЛЯ ЗАДАЧ СПИНТРОНИКИ

Игнатьев В.К., Перченко С.В., Станкевич Д.А. .... 89

### НАНОСИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СПИНТРОННЫХ  
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Горбатова А.В., Буряков А.М. .... 101

СЕНСОРНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ЛИПИДНОГО  
ЛЕНГМЮРОВСКОГО МОНОСЛОЯ С МОЛЕКУЛАМИ ФЕРМЕНТА  
ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ

Горбачев И.А., Колесов В.В. .... 111

МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА  
ГРАФЕНА

Горбачев И.А., Колесов В.В. .... 121

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО  
ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ

Кузькин В.М., Переселков С.А., Грачев В.И., Рыбьянец П.В., Ткаченко С.А. ... 129

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО  
МЕТОДА НА ХИМЕРНЫХ СЕТКАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КИЛЯ ТОРОСА

Песня Е.А., Муратов М.В., Фаворская А.В., Кожемяченко А.А. .... 137

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ 5G NR В КОСМИЧЕСКИХ  
КОММУНИКАЦИЯХ, ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Кондрашов Д.А., Крюков Я.В., Коновальчиков

А.В., Мухаммадиев С.М. .... 143

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ И РЕШЕНИЯ В ОБЛАЧНЫХ  
СРЕДАХ

Намер Хашим Касим, Наталия Боднар, Хайдер Махмуд Салман, Салама Идрис

Мустафа, Фахер Рахим ..... 157

## CONTENTS

### RADIOELECTRONICS

PHYSICALLY REALIZABLE RECONSTRUCTION OF A CONTINUOUS SIGNAL AFTER SAMPLING.

Andrey N. Degtyarev, Igor L. Afonin, Alexander L Polyakov ..... 3

COMPUTATIONAL DIELECTRIC METASURFACES IN PHOTONIC TOPOLOGICAL DEVICES FOR SIGNAL AND FIELDS PROCESSING

Alexander A. Potapov ..... 11

PRACTICAL ASPECTS OF DESIGN OF THE WIRELESS UNDERWATER OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM FOR TELECOMMUNICATION APPLICATIONS

Igor B. Shirokov, Vladislav V. Golovin, Elena A. Redkina, Idor V. Cepaюк, Pavel P. Ovcharov ..... 31

INVESTIGATION A METHOD FOR MEASURING BLOOD PRESSURE WITH A CAPACITIVE INTEGRATED SENSOR

Andrey K. Movchan, Eugeny V. Lomakov, Eugeny V. Rogozhnikov, Kirill V. Savenko ..... 43

### MEDICAL PHYSICS

A ROBUST AND EFFICIENT SCHEME FOR ECG SIGNAL CLASSIFICATION BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSING, FEATURE ENGINEERING SELECTION, AND RANDOM FOREST CLASSIFIER

Anas Fouad Ahmed, Hadeel N. Abdull, Baraa M. Albak ..... 53

INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF METHODS FOR AUTOMATIC SEARCH FOR AUC-DIAGRAM-BASED FEATURES OF PARKINSON'S DISEASE AND ESSENTIAL TREMOR

Olga S. Sushkova, Alexei A. Morozov, Margarita N. Khokhlova, Ivan A. Kershner, Alexandra V. Gabova, Larisa A. Chigaleychik, Alexei V. Karabanov ..... 67

### CONDENSED MATTER NUCLEAR PHYSICS

TRACKS OF STRANGE RADIATION. THEIR PROPERTIES. AN ATTEMPT AT EXPLANATION

Alexander G. Parkhomov, Vladislav A. Zhigalov, Vladimir K. Nevolin ..... 79

### CONDENSED MATTER PHYSICS

ANALYSIS OF THE INTRINSIC SPIN-HALL EFFECT IN METALS FOR SPINTRONICS PROBLEMS

Vyacheslav K. Ignat'ev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich ..... 89

### NANOSYSTEMS

OPTIMIZATION OF OPTICAL ABSORPTION IN SPINTRONIC TERAHERTZ EMITTERS USING BRAGG REFLECTORS

Anastasiya V. Gorbatoва, Arseny M. Buryakov ..... 101

SENSOR COATING BASED ON A LIPID LANGMUIR MONOLAYER WITH MOLECULES OF THE ENZYME GLUCOSE OXIDASE

Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov ..... 111

MORPHOLOGY AND ELECTRICAL PROPERTIES OF MODIFIED LANGMUIR GRAPHENE OXIDE FILMS

Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov ..... 121

### INFORMATION TECHNOLOGIES

MAXIMUM DETECTION RANGE OF AN UNDERWATER NOISE SOURCE USING HOLOGRAPHIC PROCESSING

Venedikt M Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko ..... 129

THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD ON CHIMERIC MESHES APPLICATION TO STUDY THE KEEL MORPHOMETRIC

CHARACTERISTICS OF ICE RIDGES

Evgeniy A. Pesnya, Mikhail V. Muratov, Alena V. Favor'skaya, Anton A. Kozhemyachenko ..... 137

APPLICATION OF THE 5G NR PHYSICAL LAYER IN SPACE COMMUNICATIONS, PERFORMANCE EVALUATION

Evgeniy V. Rogozhnikov, Edgar M. Dmitriev, Danila A. Kondrashov, Yakov V. Krukov, Artem V. Konvalchikov, Semyon M. Mukhamadiev ..... 143

DATA MANAGEMENT CHALLENGES AND SOLUTIONS IN CLOUD-BASED ENVIRONMENTS

Nameer Hashim Qasim, Nataliia Bodnar, Hayder Mahmood Salman, Salama Idris Mustafa, Fakher Rahim ..... 157



## RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF RADIOELECTRONICS, NANOPHYSICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES PROBLEM

# RENSIT:

**RADIOELECTRONICS. NANOSYSTEMS. INFORMATION TECHNOLOGIES.**

**2024, Vol. 16, no. 1**

FOUNDED IN 2009

4 ISSUES PER YEAR

MOSCOW

*Editor-in-Chief*

VLADIMIR I. GRACHEV

grachev@cplire.ru

*Deputy Chief Editor*

Vladimir A. Makarov, DrSci, MSU

*Deputy Chief Editor*

Sergey P. Gubin, DrSci, IGIC RAS

*Executive Secretary*

Vadim V. Kashin, PhD, IRE RAS

kashin@cplire.ru

### EDITORIAL BOARD

Anatoly V. Andreev, DrSci, MSU

Vladimir I. Anisimkin, DrSci, IRE

Vladimir A. Bushuev, DrSci, MSU

Vladimir A. Cherepenin, DrSci, acRAS, IRE

Alexander S. Dmitriev, DrSci, IRE

Yuri K. Fetisov, DrSci, MIREA

Yuri V. Gulyaev, DrSci, acad.RAS, IRE

Yaroslav A. Ilyushin, DrSci, MSU

Anatoly V. Kozar, DrSci, MSU

Vladimir V. Kolesov, PhD, IRE RAS

Albina A. Kornilova, PhD, MSU

Venedikt M. Kuz'kin, DrSci, GPI RAS

Iren E. Kuznetsova, DrSci, IRE

Alexander V. Okotrub, DrSci, SB RAS

Aleksey P. Oreshko, DrSci, MSU

Sergey A. Pereselkov, DrSci, VSU

Igor B. Petrov, DrSci, c-m RAS, MIPT

Alexander A. Potapov, DrSci, IRE

Vyacheslav S. Rusakov, DrSci, MSU

Alexander S. Sigov, DrSci, acRAS, MIREA

Eugeny S. Soldatov, DrSci, MSU

Ikhsamsuren Enkhdorj, DrSci (Mongolia)

Yoshiyuki Kawazoe, DrSci (Japan)

Jiao Licheng, Ph.D. (China)

Deleg Sangaa, DrSci (Mongolia)

Andre Skirtach, DrSci (Belgium)

Enrico Verona, DrSci (Italy)

### ISSN 2414-1267

The journal on-line is registered by the Ministry of Telecom and Mass Communications of the Russian Federation. Certificate EL no. FS77-60275 on 19.12.2014

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced in any form or by any means without permission in writing from the publisher.

©RANS 2024

EDITORIAL BOARD ADDRESS

218-219 of, 7 b, 11, Mokhovaya str.,

125009 MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION,

TEL. +7 495 629 3368

FAX +7 495 629 3678 FOR GRACHEV

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.003

## Физически реализуемое восстановление непрерывного сигнала после дискретизации

Дегтярев А.Н., Афонин И.Л., Поляков А.Л.

Севастопольский государственный университет, <http://www.sevsu.ru/>

Севастополь 299053, Российская Федерация

E-mail: [andegtyarev@mail.sevsu.ru](mailto:andegtyarev@mail.sevsu.ru), [ilafonin@mail.sevsu.ru](mailto:ilafonin@mail.sevsu.ru), [alpolyakov@mail.sevsu.ru](mailto:alpolyakov@mail.sevsu.ru)

Поступила 23.08.2023, рецензирована 30.08.2023, принята 07.09.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

**Аннотация:** Предлагается описывать сигналы в физически реализуемом базисе. В качестве базисных функций используются корреляционные функции импульсных характеристик физически реализуемых фильтров. Для получения аналитических выражений функций предлагаемого физически реализуемого базиса предлагается использовать обратные преобразования Фурье от аппроксимаций (Баттерворта, Чебышева и т.д.) квадратов амплитудно-частотных характеристик нормированных фильтров нижних частот. Функции базиса представляют собой копии указанных корреляционных функций импульсных характеристик, смещенные друг относительно друга на один и тот же интервал времени, который является интервалом дискретизации. Показано, что в пространстве введённых функций существует теорема отсчетов. Точное восстановление сигнала возможно в случае, если функции рассматриваемого базиса обладают свойством отсчётности. В этом случае рассматриваемые базисные функции представляют собой функции отсчётов и физически не реализуются. Для снижения погрешности восстановления непрерывного сигнала по его отсчётам с использованием предлагаемого базиса необходимо повышать порядок фильтра, импульсные характеристики которого используются при формировании базиса. Для восстановления непрерывного сигнала необходимо его отсчёты подавать на два каскадно соединенных фильтра. Первый фильтр должен иметь импульсную характеристику, корреляционная функция которой используется для формирования физически реализуемого базиса. Второй фильтр должен быть согласован с импульсной характеристикой первого фильтра.

**Ключевые слова:** дискретизация, теорема отсчетов, импульсная характеристика фильтра, корреляционная функция

УДК 621.376.5

**Для цитирования:** Дегтярев А.Н., Афонин И.Л., Поляков А.Л. Физически реализуемое восстановление непрерывного сигнала после дискретизации. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):3-10. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.003.

## Physically realizable reconstruction of a continuous signal after sampling

Andrey N. Degtyarev, Igor L. Afonin, Alexander L. Polyakov

Sevastopol State University, <http://www.sevsu.ru/>

Sevastopol 299053, Russian Federation

E-mail: [andegtyarev@mail.sevsu.ru](mailto:andegtyarev@mail.sevsu.ru), [ilafonin@mail.sevsu.ru](mailto:ilafonin@mail.sevsu.ru), [alpolyakov@mail.sevsu.ru](mailto:alpolyakov@mail.sevsu.ru)

Received August 23, 2023, peer-reviewed August 30, 2023, accepted September 07, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** It is proposed to describe signals in a physically realizable basis. Correlation functions of impulse characteristics of physically implemented filters are used as basic functions. To obtain analytical expressions of the functions of the proposed physically realizable basis, it is proposed to

use inverse Fourier transforms from approximations (Butterworth, Chebyshev, etc.) of the squares of the amplitude-frequency characteristics of normalized low-pass filters. The basis, functions are copies of the indicated correlation functions of the impulse characteristics, shifted relative to each other by the same time interval, which is the sampling interval. It is shown that there is a sampling theorem in the space of the introduced functions. The exact restoration of the signal is possible if the functions of the considered basis have the property of readability. In this case, the considered basic functions are functions of counts and are not physically implemented. To reduce the error of restoring a continuous signal from its readings using the proposed basis, it is necessary to increase the order of the filter, the pulse characteristics of which are used in the formation of the basis. To restore a continuous signal, its samples must be fed to two cascaded filters. The first filter must have an impulse response, the correlation function of which is used to form a physically realizable basis. The second filter must be matched to the impulse response of the first filter.

*Keywords:* sampling, sampling theorem, pulse characteristic of the filter, correlation function

UDC 621.376.5

*For citation:* Andrey N. Degtyarev, Igor L. Afonin, Alexander L. Polyakov. Physically realizable reconstruction of a continuous signal after sampling. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):3-10e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.003.

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. ВВЕДЕНИЕ (4)

### 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ (4)

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (9)

## ЛИТЕРАТУРА (9)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Теорема отсчетов В.А. Котельникова позволяет представлять ограниченные по частоте сигналы в виде рядов по функциям отсчётов. Коэффициентами ряда являются отсчёты сигнала, которые берутся в моменты времени кратные интервалу дискретизации  $\alpha = 1/(2f_m)$ , где  $f_m$  – максимальная частота в спектре сигнала. Функции отсчётов обладают тем свойством, что когда одна из них достигает своего максимума, то другая равна нулю. Для восстановления непрерывного сигнала по его отсчётам достаточно дельта-импульсы, взвешенные отсчётами сигнала, подать на идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ). Однако идеальные ФНЧ физически не реализуются, поэтому в качестве таких ФНЧ используются фильтры Баттерворта. Импульсная характеристика фильтров Баттерворта не обладает указанным свойством функций отсчётов [1,2,3,13,14,15].

Целесообразно рассмотреть особенности дискретизации и восстановления сигналов в базисе физически реализуемых эквидистантных функций.

### 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Пусть эквидистантные функции  $\varphi_n(t) = \varphi_0(t - n\alpha)$  ортонормированы с весом равным единице. Тогда некоторую функцию  $f(t)$ , спектральная плотность которой равна

$$F(j\omega) = F(\omega)e^{j\theta_f(\omega)},$$

можно разложить в ряд

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \varphi_n(t).$$

Поскольку базисные функции  $\varphi_n(t)$  являются эквидистантными, то

$$\Phi_n(j\omega) = \Phi_0(\omega)e^{j\theta_\varphi(\omega)}e^{-j\omega n\alpha},$$

и прямое преобразование Фурье от  $f(t)$  дает зависимость

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= F(\omega)e^{j\theta_f(\omega)} = \\ &= \Phi_0(\omega)e^{j\theta_\varphi(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n\alpha}. \end{aligned} \quad (1)$$

Средний квадрат ошибки аппроксимации рядом определяется как

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \varphi_n(t)]^2 dt, \quad (2)$$

где

$$y_n = \frac{1}{\|\varphi_n\|^2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_n(t) dt,$$

$$\|\varphi_n\|^2 = E_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n^2(t) dt.$$



На основании равенства Парсеваля (2) перепишем в виде

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F(j\omega) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \Phi_n(j\omega)] \times [F^*(j\omega) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n^* \Phi_n^*(j\omega)] d\omega =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F^2(\omega) - F(j\omega) \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n^* \Phi_n^*(j\omega) - F^*(j\omega) \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \Phi_n(j\omega) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_n y_k^* \Phi_n^*(j\omega) \Phi_k(j\omega)] d\omega.$$

Преобразуем полученное выражение и получим

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [F^2(\omega) - F(\omega) e^{j\theta_f(\omega)} \Phi_0(\omega) e^{-j\theta_\varphi(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{j\omega n \alpha} - F(\omega) e^{-j\theta_f(\omega)} \Phi_0(\omega) e^{j\theta_\varphi(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha} + \Phi_0^2(\omega) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_n y_k e^{j\omega k \alpha} e^{-j\omega n \alpha}] d\omega.$$

Будем считать, что  $F(\omega) = \Phi_0(\omega)$ , и получаем

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\Phi_0^2(\omega) - \Phi_0^2(\omega) e^{j(\theta_f(\omega) - \theta_\varphi(\omega))} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{j\omega n \alpha} - \Phi_0^2(\omega) e^{-j(\theta_f(\omega) - \theta_\varphi(\omega))} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha} + \Phi_0^2(\omega) \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n^2] d\omega =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) [1 - e^{j\Delta\theta(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{j\omega n \alpha} - e^{-j\Delta\theta(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n^2] d\omega,$$

где  $\Delta\theta(\omega) = \theta_f(\omega) - \theta_\varphi(\omega)$ .

Поскольку коэффициенты  $y_n$  дельта-коррелированы между собой, то имеем

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) [2 - e^{j\Delta\theta(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{j\omega n \alpha} - e^{-j\Delta\theta(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha}] d\omega.$$

Учитывая чётность функции  $\Phi_0^2(\omega)$  и нечётность функции  $\Delta\theta(\omega)$ , а также тот факт, что интегрирование производится по бесконечным пределам, получаем

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) [2 - 2e^{j\Delta\theta(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{j\omega n \alpha}] d\omega =$$

$$= 2E_\varphi - 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) e^{j\Delta\theta(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega =$$

$$= 2E_\varphi \left( 1 - \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) e^{j\Delta\theta(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega \right).$$

Это же выражение можно получить на основании того, что функции  $\varphi_n(t)$  являются ортогональными, не считая коэффициенты  $y_n$  дельта-коррелированными.

Для того, чтобы средний квадрат ошибки был равен нулю необходимо выполнение условия

$$\frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) e^{j\Delta\theta(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega = 1,$$

что возможно, если

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) e^{j\Delta\theta(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega = E_\varphi y_n. \quad (3)$$

Рассмотрим значение коэффициента  $y_n$

$$y_n = \frac{1}{\|\varphi_n\|^2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_n(t) dt = \frac{1}{E_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_n(t) dt.$$

На основании равенства Парсеваля запишем

$$y_n = \frac{1}{E_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_n(t) dt =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{E_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0(\omega) e^{j\theta_f(\omega)} \Phi_0(\omega) e^{-j\theta_\varphi(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega = (4)$$

$$= \frac{1}{E_\varphi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0^2(\omega) e^{j\Delta\theta(\omega)} e^{j\omega n \alpha} d\omega.$$

Из сравнения (4) и (3) становится очевидным, что равенство (3) является тождеством. Следовательно, средний квадрат ошибки аппроксимации сигнала рядом (2) равен нулю.

Выражение (4) можно переписать в виде

$$y_n = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{E_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) \Phi_0(-j\omega) e^{j\omega n \alpha} d\omega =$$

$$= \frac{1}{E_\varphi} R_{f\varphi}(n\alpha),$$

где  $R_{f\varphi}(n\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_0(t - n\alpha) dt$  — значения корреляционной функции сигнала  $f(t)$  и функции  $\varphi_0(t)$ , взятые в моменты времени  $n\alpha$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

Для того чтобы определить значение  $\alpha$ , к свойствам сигнала  $f(t)$  необходимо предъявить некоторые требования.

Так, если предположить, что сигнал  $f(t)$  ограничен по частоте максимальной частотой  $\omega_m$ , то получим известную теорему дискретизации.

Действительно, поскольку сигнал представляется в виде ряда

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \varphi_0(t - n\alpha),$$

то его спектральная плотность равна (1).

Тогда можно записать

$$\frac{F(j\omega)}{\Phi_0(j\omega)} = e^{j[\theta_f(\omega) - \theta_\varphi(\omega)]} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha}. \quad (5)$$

Выражение  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha}$  представляет собой периодическую функцию с периодом  $2\pi/\alpha$ .

Поскольку отношение спектральных плотностей  $\frac{F(j\omega)}{\Phi_0(j\omega)}$  определено для  $\omega \in [-\omega_m, \omega_m]$ , то (5) возможно только если

$$\frac{2\pi}{\alpha} = 2\omega_m.$$

Откуда получаем

$$\alpha = \frac{2\pi}{2\omega_m} = \frac{\pi}{2\pi f_m} = \frac{1}{2f_m}, \quad (6)$$

что соответствует интервалу дискретизации, который вводит теорема отсчётов.

В этом случае сигнал может быть представлен рядом

$$f(t) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{f\varphi} \left( \frac{n}{2f_m} \right) \varphi_0 \left( t - \frac{n}{2f_m} \right). \quad (7)$$

Если в качестве эквидистантных функций используются функции отсчётов

$$\varphi_n(t) = \frac{\sin \omega_m \left( t - \frac{n}{2f_m} \right)}{\omega_m \left( t - \frac{n}{2f_m} \right)},$$

то  $E_\varphi = \pi/\omega_m$ , и согласно (5) на интервале  $\omega \in [-\omega_m, \omega_m]$ , имеем

$$F(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n e^{-j\omega n \alpha}.$$

Коэффициенты ряда в этом случае определяются как

$$\int_{-\omega_m}^{\omega_m} F(j\omega) e^{j\omega n \alpha} d\omega = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \int_{-\omega_m}^{\omega_m} e^{-j\omega n \alpha} e^{j\omega n \alpha} d\omega, \quad (8)$$

$$\int_{-\omega_m}^{\omega_m} F(j\omega) e^{j\omega \frac{\pi n}{\omega_m}} d\omega = y_n \int_{-\omega_m}^{\omega_m} d\omega.$$

Поскольку

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad \int_{-\omega_m}^{\omega_m} d\omega = 2\omega_m,$$

то равенство (8) переписывается в виде

$$2\pi f \left( \frac{\pi n}{\omega_m} \right) = 2\omega_m y_n.$$

Откуда получаем

$$y_n = \frac{\pi}{\omega_m} f \left( \frac{\pi n}{\omega_m} \right).$$

Таким образом, ограниченный по частоте сигнал раскладывается в ряд по функциям отсчётов следующим образом

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f \left( \frac{n}{2f_m} \right) \varphi_0 \left( t - \frac{n}{2f_m} \right),$$

что соответствует теореме отсчётов.

Заметим, что теорему отсчётов мы получили, исходя из общих положений аппроксимации функций рядами по эквидистантным функциям. Предположения, которые непосредственно привели к теореме отсчётов, состояли в том, что во-первых, сигнал должен быть ограничен по частоте и, во-вторых, в качестве эквидистантных функций используются функции отсчётов [4,5,6,7].

Итак, в общем случае сигнал, разложенный в ряд по эквидистантным функциям, может быть записан в виде

$$f(t) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{f\varphi}(n\alpha) \varphi_0(t - n\alpha).$$

Целесообразно определить зависимость коэффициентов ряда от отсчётов сигнала.

Возьмем  $m$ -й отсчёт этого сигнала

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - m\alpha) dt =$$

$$= \frac{1}{E_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{f\varphi}(n\alpha) \varphi_0(t - n\alpha) \delta(t - m\alpha) dt.$$

Используя фильтрующее свойство дельта-функции, получаем

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{f_\varphi}(n\alpha) \varphi_0[(m-n)\alpha]. \quad (9)$$

Т.е.  $m$ -й отсчёт сигнала  $f(t)$  вычисляется через значения взаимной корреляционной функции сигнала  $f(t)$  и функции  $\varphi_0(t)$  достаточно сложно (9), с помощью дискретного фильтра с импульсной характеристикой  $\varphi_0(m\alpha)$ .

Рассмотрим, какие требования могут быть предъявлены к функции  $\varphi_0(t)$  для упрощения практического определения  $m$ -го отсчёта сигнала  $f(t)$ .

Поскольку  $R_{f_\varphi}(n\alpha)$  являются отсчётами корреляционной функции сигнала  $f(t)$  и функции  $\varphi_0(t)$ , то можно записать

$$R_{f_\varphi}(n\alpha) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) \varphi_0[(k-n)\alpha].$$

Имеем

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) \varphi_0[(k-n)\alpha] \varphi_0[(m-n)\alpha].$$

Введем замену  $l = k - n$  ( $n = k - l$ ) и получим

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) \varphi_0[l\alpha] \varphi_0[(l+m-k)\alpha] = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) \sum_{l=-\infty}^{\infty} \varphi_0[l\alpha] \varphi_0[(l+m-k)\alpha].$$

Учтём, что

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} \varphi_0[l\alpha] \varphi_0[(l+m-k)\alpha] = R_\varphi[(m-k)\alpha],$$

где  $R_\varphi[(m-k)\alpha]$  — отсчёты корреляционной функции элементарного сигнала  $\varphi_0(t)$ , взятые в моменты времени  $(m-k)\alpha$ , и будем иметь

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) R_\varphi[(m-k)\alpha]. \quad (10)$$

Введём замену  $n = m - k$  ( $k = m - n$ ) и тогда

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[(m-n)\alpha] R_\varphi(n\alpha). \quad (11)$$

Для того, чтобы это равенство было тождеством, необходимо, чтобы при всех  $n \neq 0$  отсчёты корреляционной функции  $R_\varphi(n\alpha) = 0$ .

Используя сформулированное требование к корреляционной функции  $R_\varphi(n\alpha)$ , преобразовываем правую часть равенства (11)

$$\frac{1}{E_\varphi} f(m\alpha) R_\varphi(0) = \frac{1}{E_\varphi} f(m\alpha) E_\varphi = f(m\alpha)$$

и заключаем, что (11) является тождеством.

Заметим, что с точки зрения линейных преобразований равенство (11) представляет собой линейное дискретное преобразование с воспроизводящим ядром. Ядром преобразования является выражение  $R_\varphi[(m-k)\alpha]$ .

Выражение (11) даёт основание считать, что ряд, коэффициентами которого являются отсчёты сигнала, должен быть построен только с применением функций, которые имеют характер эквидистантно смещенных корреляционных функций импульсных характеристик линейных систем:

$$f(t) = \frac{1}{E_\varphi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\alpha) R_\varphi(t - k\alpha). \quad (12)$$

Отметим, что это выражение согласуется с теоремой отсчётов. Действительно корреляционная функция функции

$$\varphi_0(t) = \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t}$$

равна

$$R_\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \frac{\sin \omega_m (t - \tau)}{\omega_m (t - \tau)} dt = \frac{\sin \omega_m \tau}{\omega_m \tau}. \quad (13)$$

Подстановка (13) в (12) приводит к известной теореме отсчётов.

Будем раскладывать сигнал  $f(t)$  в ряд по ортогональным функциям

$$\varphi_n(t) = \varphi_0(t - n\alpha) = R_\varphi(t - n\alpha)$$

таким, что  $R_\varphi(0) \neq 0$  и  $R_\varphi(n\alpha) = 0$ , если  $n\alpha \neq 0$ .

Примем, что модуль спектральной плотности сигнала  $f(t)$  равен модулю спектральной плотности функций  $R_\varphi(t - n\alpha)$ .

Имеем

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n R_\varphi(t - n\alpha). \quad (14)$$

Определим коэффициент ряда  $y_m$

$$y_m = \frac{1}{E_R} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) R_\varphi(t - m\alpha) dt = \frac{1}{E_R} R_{fR}(m\alpha), \quad (15)$$

где  $E_R = \int_{-\infty}^{\infty} R_\varphi^2(t - n\alpha) dt$ ,  $R_{fR}(m\alpha)$  —  $m$ -й отсчёт взаимной корреляционной функции сигнала и функции  $R_\varphi(t)$ .

Выражение (14) запишется в виде

$$f(t) = \frac{1}{E_R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{fR}(n\alpha) R_{\varphi}(t - n\alpha).$$

Определим  $m$ -й отсчёт сигнала  $f(t)$

$$\begin{aligned} f(m\alpha) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - m\alpha) dt = \\ &= \frac{1}{E_R} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{fR}(n\alpha) R_{\varphi}(t - n\alpha) \delta(t - m\alpha) dt. \end{aligned}$$

Используя фильтрующее свойство дельта-функции, получаем

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{fR}(n\alpha) R_{\varphi}[(m - n)\alpha].$$

Учитывая оговоренные свойства функции  $R_{\varphi}(t)$ , получаем

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_R} R_{fR}(m\alpha) R_{\varphi}(0) = R_{fR}(m\alpha).$$

Таким образом, коэффициенты  $y_m$  представляют собой отсчёты сигнала  $f(t)$ , которые берутся в моменты времени кратные  $\alpha$ , и ряд (14) можно переписать в виде

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n\alpha) R_{\varphi}(t - n\alpha). \quad (16)$$

Вернёмся к (15). Перепишем (15) с учётом (14)

$$y_m = \frac{1}{E_R} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n R_{\varphi}(t - n\alpha) R_{\varphi}(t - m\alpha) dt.$$

Замена вида  $\tau = t - n\alpha$  и изменение порядка суммирования и интегрирования позволяет записать

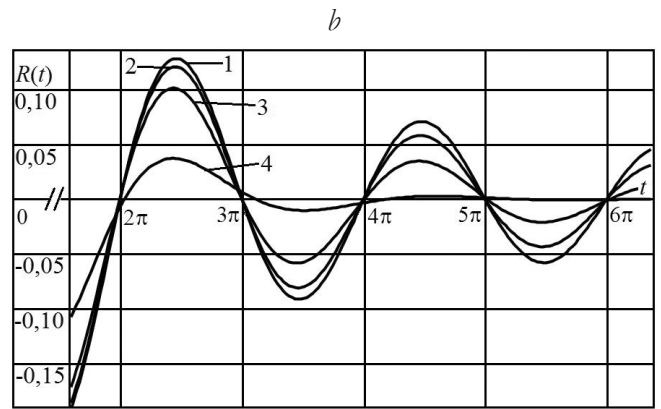
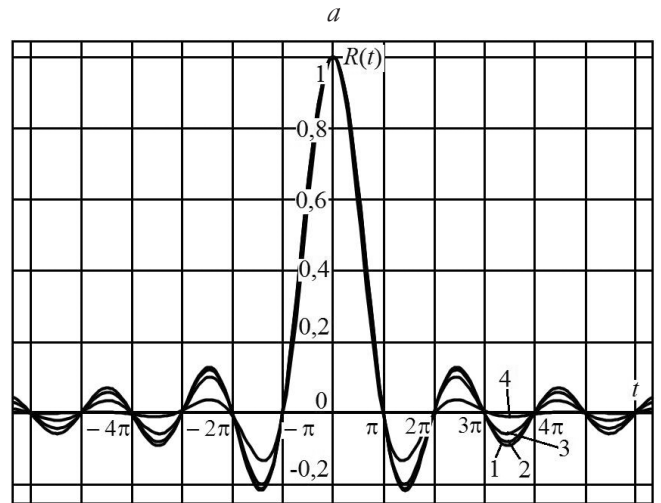
$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \int_{-\infty}^{\infty} R_{\varphi}(\tau) R_{\varphi}(\tau + n\alpha - m\alpha) d\tau.$$

Под знаком интеграла в этом равенстве стоит значение корреляционной функции  $R_{2\varphi}(t)$  функции  $R_{\varphi}(t)$ , определённое в момент времени  $t = n\alpha - m\alpha$ . Можно записать

$$f(m\alpha) = \frac{1}{E_R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n R_{2\varphi}(n\alpha - m\alpha).$$

Для того, чтобы  $y_m = f(m\alpha)$ , на значения корреляционной функции  $R_{2\varphi}(n\alpha)$  необходимо накладывать условия, аналогичные условиям, принятым для значений корреляционной функции  $R_{\varphi}(n\alpha)$ . То есть,

$$R_{2\varphi}(0) \neq 0 \text{ and } R_{2\varphi}(n\alpha) = 0, \text{ if } n\alpha \neq 0.$$



1 – функция  $\text{sinc}t$ ; нормированные корреляционные функции импульсных характеристик, нормированных ФНЧ Баттерворта: 2 – 20-го порядка; 3 – 10-го порядка; 4 – 4-го порядка.

**Рис. 1.** Функция  $\text{sinc}t$  и нормированные корреляционные функции импульсных характеристик нормированных ФНЧ Баттерворта.

Следует заметить, что для функций  $R_{2\varphi}(t)$  и  $R_{\varphi}(t)$ , которые могут быть получены физически (например, как корреляционные функции импульсных характеристик линейных физически реализуемых систем), эти требования выполняются с определённой погрешностью (Рис. 1). Кроме того, система функций, получаемая путем смещения корреляционной функции  $R_{\varphi}(t)$  на интервалы времени кратные  $\alpha$ , не являются ортогональными. Поэтому ряд (16) приближенно описывает сигнал.

Итак, для того, чтобы приближенно восстановить сигнал по его отсчётам необходимо восстановить сигнал по его отсчётам необходимо отсчёты подавать на два каскадно соединенных фильтра, один из которых имеет импульсную характеристику  $g(t)$ , а второй — согласован с



этой импульсной характеристикой, причём корреляционная функция импульсной характеристики равна  $R_{\varphi}(t)$ .

Интервал смещения эквидистантных функций, по которым раскладывается сигнал (он же является интервалом дискретизации) выбирается исходя из заданной величины среднего квадрата ошибки (2) аппроксимации  $f(t)$  рядом.

Кроме того, интервал смещения эквидистантных функций можно выбрать с учетом периодичности спектра дискретного сигнала. Период спектра связан с верхней учитываемой частотой спектра сигнала, т.е. с верхней учитываемой частотой среза фильтра, импульсные характеристики которого рассматриваются [10,11,12].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для того, чтобы приближенно восстановить сигнал по его отсчетам необходимо отсчеты подавать на два каскадно соединенных фильтра, один из которых имеет импульсную характеристику  $g(t)$ , а второй – согласован с этой импульсной характеристикой. Корреляционная функция импульсной характеристики должна иметь корреляционную функцию  $R_{2\varphi}(t)$ , такую, что  $R_{2\varphi}(0) \neq 0$  и  $R_{2\varphi}(n\alpha) = 0$ , если  $n\alpha \neq 0$ .

Поскольку на практике реализовать фильтры с подобными импульсными характеристиками невозможно, то восстановление сигнала будет происходить с некоторой погрешностью. Снизить уровень этой погрешности можно, выбрав соответствующий порядок восстанавливающего фильтра и интервал дискретизации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зюко АГ, Кловский ДД, Коржик ВИ, Назаров МВ. *Теория электрической связи*. М., Радио и связь, 1999, 432 с.
2. Кусайкин Д.В. Исследование методов восстановления дискретных сигналов с неравномерной частотой дискретизации в системах телекоммуникаций. *Сб. тезисов VII Всероссийской научно-практической конференции "Информационные технологии в мире коммуникаций"*. М., 2014, с. 153-159.
3. Кусайкин Д.В. Исследование методов восстановления частотно модулированных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке. *Сб. трудов международной научно-практической конференции "Общество, наука и инновации"*. Уфа, РИЦ БашГУ, 2013, ч. 2, с. 71-75.
4. El-Chammas M, Murmann BA. 12-GS/s 81-mW 5-bit time-interleaved flash ADC with background timing skew calibration. *Proc. Symposium on VLSI Circuits*, 2010, pp. 157-158.
5. Hormati A, Roy O, Lu YM, Vetterli M. Distributed sampling of correlated signals linked by sparse filtering: Theory and applications. *IEEE Trans. Signal Process*, 2010, 58(3):1095-1109.
6. Karthik M, Prabhu KM. On the Eigenvalues of Matrices for the Reconstruction of Missing Uniform Samples. *IEEE Transactions on signal Processing*, 2010, 58(5):2896-2900.
7. Leming Qu, Routh PS, Anno PD. Wavelet Reconstruction of Nonuniformly Sampled Signals. *IEEE signal processing letters*, 2009, 16(2):73-76.
8. Qu D, Ma B, Zhou J. Optimal Weighted Periodic Nonuniform Sampling Sequences for Digital Alias-free Signal Processing. *Proc. IEEE 10th International Conference "Signal Processing (ICSP)"*, 2010, pp. 147-150.
9. Saleem S, Vogel C. Adaptive Blind Background Calibration of Polynomial Represented Frequency Response Mismatches in a Two-Channel Time-Interleaved ADC. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2011, 58(6):1300-1310.
10. Senay S. Signal reconstruction from Nonuniform samples using prolate spheroidal wave functions: theory and application. *PhD thesis*. University of Pittsburgh, 2011, p. 117.
11. Senay S, Chaparro LF, Durak F. Reconstruction of nonuniformly sampled timelimited signals using prolate spheroidal wave functions. *Signal Processing*, 2009, 89(12):2585-2595.
12. Singh M, Lu C, Basu A, Mandal M. Choice of low resolution sample sets for efficient super-resolution signal reconstruction. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(1):194-207.
13. Поршнев СВ, Кусайкин ДВ. Методы повышения точности восстановления неравномерно дискретизированных сигналов при неизвестных значениях координат узлов

- временной сетки. *Вестник СибГУПИ*, 2014, 1:24-34.
14. Поршнева СВ, Кусайкин ДВ. О восстановлении неравномерно дискретизированных сигналов с неизвестными значениями координат узлов временной сетки. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2015, 6:3-35.
15. Поршнева СВ, Кусайкин ДВ. Оценка точности алгоритмов восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке с точно неизвестными значениями координат узлов. *Вестник СибГУПИ*, 2015, 1:97-108.

**Дегтярёв Андрей Николаевич**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет  
33, ул. Университетская, Севастополь 299053, Россия

E-mail: andegtyarev@mail.sevsu.ru

**Афонин Игорь Леонидович**

*д.т.н., профессор*

Севастопольский государственный университет  
33, ул. Университетская, Севастополь 299053, Россия

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru

**Поляков Александр Леонидович**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет  
33, ул. Университетская, Севастополь 299053, Россия

E-mail: alpolyakov@mail.sevsu.ru

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.011

## Вычислительные диэлектрические метаповерхности в фотонных топологических устройствах обработки многомерных сигналов

Потапов А.А.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

Джинанский университет, Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, <https://jnu.edu.cn/>

Гуанчжоу 510632, Китай

E-mail: [potapov@cplire.ru](mailto:potapov@cplire.ru)

Поступила 29.09.2023, рецензирована 02.10.2023, принята 09.10.2023, опубликована 15.03.2024.

**Аннотация:** Предложена однослойная вычислительная диэлектрическая широкополосная метаповерхность (МП) с кремниевыми нанодисками для реализации операций пространственного дифференцирования и распознавания контуров. Рассмотрено многообразие физических механизмов диэлектрических МП для выполнения аналогичных математических операций. Раскрывается необходимость таких вычислительных наноконструкций для совершенствования многочисленных методов топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей в современной радиофизике и радиоэлектронике.

**Ключевые слова:** фотоника, радиофотоника, нанотехнологии, радиофизика, радиолокация, радиотехника, текстура, фракталы, обработка многомерных сигналов, граничная оптика, вычислительная метаповерхность, оптическая передаточная функция, оптические аналоговые вычисления

УДК 519.24+ 537.86+621.396.96

**Благодарности:** Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИРЭ РАН, тема "Эфир-2". Автор выражает искреннюю благодарность китайским ученым, с которыми были совместно выполнены и опубликованы статьи по фотонике в ведущих международных научных журналах: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Wei Zhang.

**Для цитирования:** Потапов А.А. Вычислительные диэлектрические метаповерхности в фотонных топологических устройствах обработки многомерных сигналов. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):11-30. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.011.

## Computational Dielectric Metasurfaces in Photonic Topological Devices for Multidimensional Signal Processing

Alexander A. Potapov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>  
Moscow 125009, Russian Federation

Jinan University, JNU-IREE RAS Joint Laboratory of Information Technology and Fractal Processing of Signals, <https://jnu.edu.cn/>

Guangzhou 510632, China

E-mail: [potapov@cplire.ru](mailto:potapov@cplire.ru)

Received September 29, 2023, peer-reviewed October 02, 2023, accepted October 09, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** A single-layer computational dielectric broadband metasurface (MS) with silicon nanodiscs is proposed to implement spatial differentiation and contour recognition operations. The variety of physical mechanisms of dielectric MSs for performing similar mathematical operations is considered. The necessity of such computational nanostructures for improving the numerous

methods of topological texture-fractal processing of signals and fields in modern radio physics and radio electronics is revealed.

**Keywords:** photonics, radio photonics, nanotechnology, radiophysics, radar, radio engineering, texture, fractals, processing of multidimensional signals, frontier optics, computing metasurface, optical transfer function, optical analog computing

**Acknowledgments:** The research has been performed in the framework of the state task for IRE RAS, theme "Aether-2". The author expresses sincere gratitude to the Chinese scientists with whom articles on photonics were jointly completed and published in leading international scientific journals: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Wei Zhang.

**For citation:** Alexander A. Potapov. Computational Dielectric Metasurfaces in Photonic Topological Devices for Multidimensional Signal Processing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):11-30e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.011.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (12)
2. НЕСКОЛЬКО ОПРЕДЕЛЕНИЙ (13)
3. ФИЗИКА И ДИЗАЙН ОСНОВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП (14)
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП (18)
5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В КИТАЙСКО-РОССИЙСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ (22)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (28)

## ЛИТЕРАТУРА (28)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Существует два основных типа технологий обработки изображений – цифровая и оптическая. Оптическая обработка изображений – это технология, в которой используются оптические средства и устройства для выполнения аналоговой вычислительной обработки и передачи информации об изображении. Оптическая обработка изображений характеризуется возможностью обработки в реальном времени вплоть до скорости света. В то же время оптические аналоговые вычисления имеют естественные характеристики параллельной работы.

Цифровое изображение фактически использует набор цифровых матриц для объективного изображения объектов. Цифровая обработка изображений также называется компьютерной обработкой изображений, но

обычно она должна сочетаться с программными алгоритмами и аппаратной совместной обработкой. Однако у этой технологии есть недостатки: высокие требования к оборудованию и относительно низкая скорость. Кроме того, скорость и энергопотребление стандартных электронных компонентов трудно значительно улучшить. Таким образом, исследования новых фотонных устройств обеспечивают потенциальный способ преодоления этих ограничений.

Быстрое развитие нанотехнологий способствовало научным исследованиям и промышленному применению микро-наноструктур. Оптические свойства микро-наноструктур стали одной из горячих точек исследований в области граничной оптики (frontier optics), которая привела к возникновению новых дисциплин, таких как нанофотоника, оптика поверхностных плазмонов, метаповерхность, оптика метаматериалов, трансформационная оптика, топологическая фотоника, неэрмитова оптика и т.д.

Данное введение необходимо для того, чтобы показать, что непрерывное совершенствование впервые предложенных автором в ИРЭ АН СССР, начиная с 80-х годов XX века, многочисленных методов топологической текстурно-фрактальной обработки (ГТФО) сигналов и полей в современной радиофизике и радиоэлектронике [1-9] подразумевает естественную необходимость улучшения скорости обработки информации и поиск новых физических принципов для ее осуществления. Здесь, несомненно, будущее принадлежит рассматриваемым ниже наиболее



характерным фотонным и радиотонным технологиям. По сравнению с традиционными громоздкими оптическими аналоговыми дифференциаторами пространственные дифференциаторы на основе метаповерхностей (МП) имеют то преимущество, что они проще и компактнее. Таким образом, современные оптические аналоговые вычисления могут способствовать развитию технологии обработки изображений совместно с электронными платформами.

В статье также представлены избранные результаты в области фотоники, радиотоники и оптических 2D метаматериалов (ММ), которые были получены автором с китайскими учеными в совместной лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов в Китае [10-17] за период 2019-2021 гг.

## 2. НЕСКОЛЬКО ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Напомним несколько необходимых по тексту определений. *Фотоника* (photonics) - дисциплина, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе различных устройств; или еще так: фотоника – раздел науки, изучающий системы, в которых носителями информации являются фотоны. *Нанопотоника* (nanophotonics) – раздел фотоники, рассматривающий сложные взаимодействия между светом и веществом в субволновом масштабе. Фотонные системы (в сравнении с “электронными”) не подвержены внешним электромагнитным полям, более устойчивы к помехам, обладают также более высоким быстродействием и шириной полосы пропускания сигнала. *Радиотоника* (microwave photonics) – комплекс областей науки и техники, связанных с передачей, приемом и преобразованием сигнала с помощью электромагнитных волн СВЧ диапазона и фотонных приборов и систем. Радиотонные методы улучшают функциональное построение аппаратуры нового поколения, снимут многие проблемы электромагнитной совместимости, в тысячу и более раз поднимут скорость и объем передачи информации, на порядок снизят вес, габариты и энергопотребление.

Метаматериалы (от греч. *meta* – за пределами, *сверх*) – искусственно структурированные (рукотворные) материалы с необычными свойствами, которые отсутствуют у природных материалов [18]. Метаматериалы (ММ) и метаповерхности (МП) или 2D метаматериалы открыли широкие возможности для реализации новых электромагнитных свойств и функциональных возможностей за счет создания субволновых структур и интеграции функциональных материалов.

Все МП можно подразделить на два типа: рассеивающий тип на основе металлических наноматериалов и пропускающий тип на основе наноструктур диэлектрических материалов. Определим вычислительные метаповерхности (computing metasurface) как двумерные искусственные наноструктуры, которые способны выполнять математические операции над входным электромагнитным полем, включая его амплитудные, фазовые, поляризованные и частотные распределения [15,19]. Вычислительные МП продемонстрировали замечательные способности в оптических дифференциальных операциях и периферийной улучшенной визуализации. Наиболее распространенными являются ММ, в которых структура элементов (метаатомы размером в несколько нанометров), размер и расстояние между элементами значительно меньше по сравнению с длиной волны возбуждающего поля. В этом случае результат взаимодействия отдельных элементов приводит к тому, что свойства ММ обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой. МП в качестве типичного прототипа устройства состоят из искусственных субволновых структур над плоскими поверхностями диэлектрического материала, которые облегчают гибкое управление амплитудой, фазой и поляризацией электромагнитных волн. Можно сказать, что в МП – корень многих увлекательных топологических явлений в физике и экзотических манипуляций с волнами.

Отметим [20], что в Китае действует специальная государственная программа и в 2015 году Китай стал мировым лидером по объему производства устройств фотоники.

### 3. ФИЗИКА И ДИЗАЙН ОСНОВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП

Структуры, вдохновленные ММ, продолжают бросать вызов нашему воображению и нашим физическим и инженерным основам. Они влияют на взаимодействие волны и материи на многих частотах и даже в различных областях науки и техники.

Концепция вычислительных ММ (computational metamaterials) была впервые введена в 2014 г. в [21]: вычислительные ММ – это метаматериалы, которые могут выполнять желаемые математические операции над сигналами произвольной волны по мере их распространения через него.

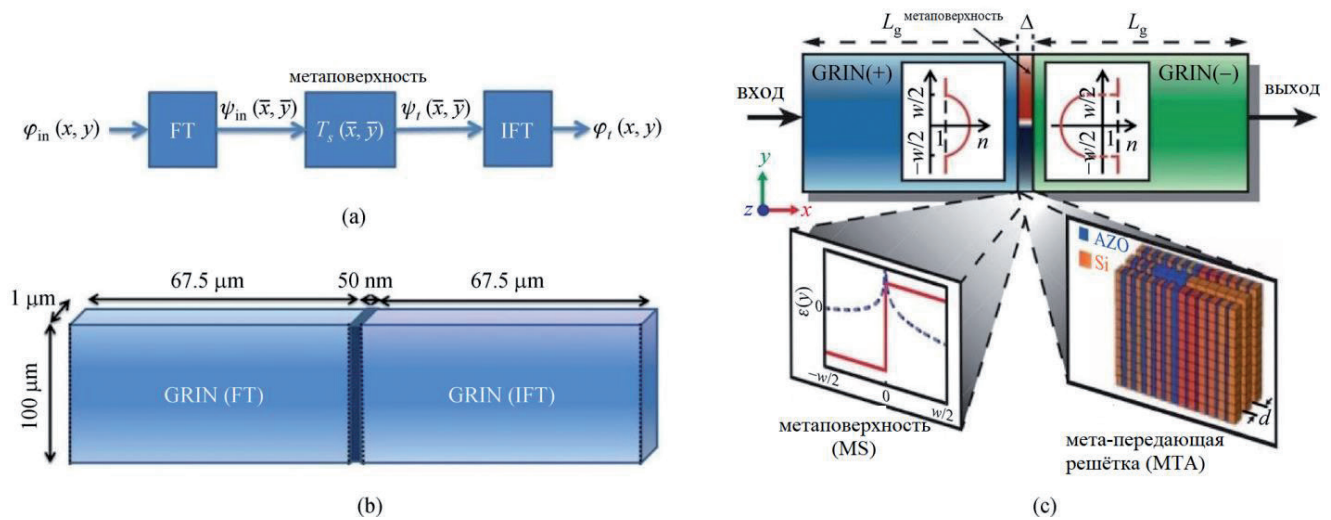
Здесь мы ограничимся физикой и элементарной математикой исключительно вычислительных МП. Путем проектирования геометрии диэлектрических МП могут быть получены оптические аналоговые вычислительные устройства с различными функциями, такие как пространственные дифференциаторы [11,12,15,16,19,21-24], интеграторы [25] и решатели уравнений [26,27]. Введение диэлектрических МП упрощает процесс производства и увеличивает гибкость конструкции оптических аналоговых вычислительных устройств по сравнению с традиционными многослойными пленочными структурами [24]. Несмотря на огромный интерес к МП и наличие большого количества англоязычных обзоров, в русскоязычной литературе этот вопрос за редким исключением практически не освещен [28,29]. Эта работа с последующим изложением собственных результатов частично восполняет этот пробел.

Основными параметрами МП, по которому их сравнивают между собой и с другими оптическими устройствами, являются эффективность и рабочая длина волны (см. например [28]). Электромагнитная волна, попадая на МП, частично поглощается и рассеивается в разных направлениях, и только часть этой волны рассеивается в нужном направлении. Отношение интенсивности электромагнитной волны, которая распространяется в нужном направлении после прохождения через МП, к интенсивности падающей волны называется эффективностью МП. Рабочая длина волны МП по мере развития

технологий уменьшается, и в настоящее время она находится в видимом диапазоне. Так как резонансы в метаатомах являются достаточно узкими, МП работают в небольшом интервале частот, который стараются увеличивать.

Хорошо известна классическая обработка оптических сигналов, так называемая Фурье-оптика (или радиооптика) с использованием обычных линз и пространственных фильтров [30-32]. Этот вид обработки широко применялся автором еще в 80-90-е гг. XX века совместно с учеными из ВГУ для исследования всех ансамблей текстурных признаков оптических и первых радиолокационных (в миллиметровом диапазоне радиоволн) изображений земных покровов с объектами [33-36].

Обычно модулированный световой луч ориентируется на оптическую линзу, которая может выполнять преобразование Фурье (FT); таким образом, спектр Фурье может быть получен в задней фокальной плоскости. Поскольку информация о краях представлена компонентами Фурье высокого порядка, которые обычно находятся вне области шаблона Фурье, тщательным выбором этих компонентов высокого порядка можно извлечь информацию о контурах. Наконец, реальные изображения, содержащие профиль контура, могут быть получены с помощью обратного преобразования Фурье (IFT) с помощью другой оптической линзы. Поскольку все операции выполняются по мере распространения света, процессы оптических аналоговых вычислений намного быстрее и потребляют гораздо меньше энергии, чем электронный метод. Хотя вышеупомянутые оптические аналоговые вычисления пространственного дифференцирования и обнаружения контуров просты и понятны, большой размер линзы является критической проблемой для интеграции устройства. В оптических линзах необходимый волновой фронт формируется при прохождении излучения через вещество с определенным коэффициентом преломления. Прохождение лучей через линзу приводит к сдвигу фазы, и вследствие непрерывного изменения толщины линзы фаза приобретает градиент. По принципу Ферма градиент фазы приводит к изменению волнового фронта.



**Рис. 1.** Основной принцип пространственного дифференцирования и распознавания контуров ММ и МП. (а) Информация о Фурье-спектре входного сигнала может быть получена блоком с функцией преобразования Фурье (FT). После прохождения через МП выходной сигнал может быть получен с помощью операции обратного преобразования Фурье (IFT). (б) ММ с градиентным индексом (GRIN) могут быть использованы для реализации FT и IFT [37]. (в) Практическая реализация конфигурации [21].

Использование рассеивающих и пропускающих ММ для оптических аналоговых вычислений прокладывает путь к реализации полностью интегрированных устройств пространственной фильтрации. Базовая конфигурация представлена на **Рис. 1** [15,21]. В этом процессе диэлектрическая пластина с двумерным градиентным индексом (GRIN) использовалась для выполнения FT и вывода спектра Фурье. Требуемая информация была отселектирована соответствующим образом спроектированной МП в качестве пространственного фильтра, а IFT был реализован с помощью другого ММ с градиентным индексом. В качестве первого блока рассматриваем диэлектрическую пластину GRIN(+) с двумерным градиентным индексом, магнитной проницаемостью  $\mu = \mu_0$  и параболическим изменением диэлектрической проницаемости  $\epsilon(y) = \epsilon_0[1 - (\pi/2L_g)^2 y^2]$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость в центральной плоскости GRIN, а  $L_g$  – характерная длина.

На Рис. 1с GRIN(+) обозначает обычный GRIN, где знак (+) относится к положительным значениям диэлектрической проницаемости. В параксиальном приближении пластина ГРИН(+) работает как преобразователь Фурье на "фокусном" расстоянии  $L_g$  вдоль направления распространения. Для обратного преобразования Фурье, т.е. блок GRIN(-),

используется идеальная структура GRIN с отрицательными параметрами: проницаемостью  $\mu = -\mu_0$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = -\epsilon(y)$ . Следуя концепции дополнительных материалов, GRIN(-) имеет обратную функциональность по сравнению с GRIN(+); т.е. он действует как обратный преобразователь Фурье. Тонкий, правильно спроектированный метаструктурный экран толщиной  $\Delta = \lambda_0/3$  и шириной  $W = 10\lambda_0$ , размещенный между двумя GRIN-структурами с положительными и отрицательными параметрами, может выполнять математические операции в области Фурье. GRIN(+) и GRIN(-), каждая длиной  $L_g \approx 12\lambda_0$ , действуют как преобразователи Фурье и обратные преобразователи Фурье. Предлагаются две конструкции ММ: тонкая МП, образованная одним слоем с заданными диэлектрической и магнитной проницаемостями [врезка слева, с реальной (красной) и мнимой (синяя) частями параметров материала] и реалистичная метAPERодующая решетка (МТА), образованная тремя слоями из двух чередующихся материалов (кремний Si и легированный алюминий оксид цинка AlZnO) с правильно заданным неоднородным распределением их объемных долей наполнения и с необходимыми потерями для придания нужного затухания (правая вставка). Эта система образует вычислительную единицу ММ, которая может выполнять математические



операции по выбору над входной функцией, когда волна распространяется через данную систему. В работе [21] рассмотрены подходы к моделированию операций дифференцирования и свертки.

Другим методом пространственного дифференцирования и обнаружения контуров является метод функции Грина (GF) [15,21]. При использовании этого метода не требуется преобразований Фурье, что дополнительно минимизирует размер всей системы. Критическим моментом при использовании метода GF является достижение определенной оптической передаточной функции (ОПФ)  $T(k_x, k_y)$  с правильно спроектированными МП. Обычно, когда падающее модулированное световое поле  $E_{in}(x, y)$  попадает на планарную структуру, как отражение, так и пропускание проявляют поляризационную зависимость. Следовательно, ОПФ МП можно выразить с помощью матрицы  $2 \times 2$ , которая связывает поля входа и вывода следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}^{(s)}(k_x, k_y) \\ \tilde{E}^{(p)}(k_x, k_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{ss}(k_x, k_y) & T_{sp}(k_x, k_y) \\ T_{ps}(k_x, k_y) & T_{pp}(k_x, k_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{in}^{(s)}(k_x, k_y) \\ \tilde{E}_{in}^{(p)}(k_x, k_y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

В выражении (1)  $k_x$  и  $k_y$  – компоненты волнового вектора  $\vec{k}$ , рассмотрены две поляризации  $s$ - и  $p$ -волн и учитывается преобразование поляризации с недиагональными членами ОПФ-матрицы. Следовательно, разумно настраивая МП, мы можем получить надлежащую ОПФ, которая может реализовать желаемую обработку или операцию с входной информацией для конкретных приложений. Фактически, дифракция света более значительна на краях мишени, что приводит к увеличению волновых чисел в плоскости. Это означает, что если мы сможем достичь ОПФ для передачи этих компонентов с большим волновым числом при блокировании компонентов с меньшим волновым числом, тогда мы сможем иметь только информацию о краях на выходе, что приведет к реализации пространственного дифференцирования и обнаружения контура. Заметим, что в оптике и электродинамике  $s$ -поляризованная волна (нем. senkrecht – перпендикулярный) имеет вектор электрического поля  $E$ , перпендикулярный

плоскости падения.  $s$ -поляризованную волну также называют  $\sigma$ -поляризованной, сагиттально поляризованной, волной  $E$ -типа,  $TE$ -волной (Transverse Electric).  $p$ -поляризованная волна (лат. parallel – параллельный) имеет вектор электрического поля  $E$ , параллельный плоскости падения.  $p$ -поляризованную волну также называют  $\pi$ -поляризованной, поляризованной в плоскости падения, волной  $H$ -типа,  $TM$ -волной (Transverse Magnetic).

Ключевым моментом метода GF является разработка конкретных ОПФ МП, чтобы входное световое поле могло обрабатываться подходящим образом. Для пространственного дифференцирования первого порядка мы считаем, что падающее световое поле включает плоский волновой вектор вдоль направления  $x$ . Связь между полями вывода и ввода можно выразить как [38]:

$$\tilde{E}(k_x) = \frac{d}{dx} \tilde{E}_{in}(k_x) = ik_x \tilde{E}_{in}(k_x), \quad (2)$$

где падающее световое поле предполагается равным  $\tilde{E}_{in}(k_x) = E_0 e^{ik_x x}$ . Следовательно, ОПФ должна быть линейной функцией плоскостного волнового числа. Для пространственного дифференцирования второго порядка можно получить ОПФ аналогичным образом:

$$\tilde{E}(k_x) = \frac{d^2}{dx^2} \tilde{E}_{in}(k_x) = -k_x^2 \tilde{E}_{in}(k_x). \quad (3)$$

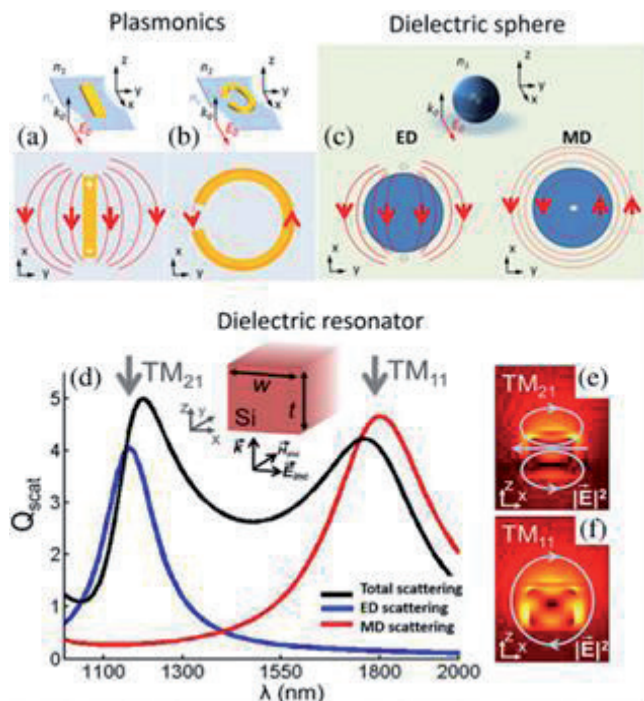
Это указывает на то, что ОПФ должна вести себя как парабола. Заметим, что в обоих случаях интенсивность выходного светового поля тесно связана с волновым числом. Обе ОПФ должны пропускать падающие световые поля с большими волновыми числами, подавляя поля с меньшими волновыми числами, тем самым обеспечивая обнаружение контуров изображения.

Для разработки правильного ОПФ для пространственного дифференцирования и обнаружения контуров изображений, адаптация нелокальных эффектов МП является многообещающим способом. В нелокальном эффекте реакции МП на падающее световое поле не только связаны с нормальной составляющей падающей волны, но также зависят от тангенциальных составляющих. Это означает, что пропускание, отражение и ОПФ



МП зависят от угла падения светового поля. Такая зависимость ОПФ от угла падения обычно создается путем настройки резонансов МП, которые обычно включают в себя резонанс с управляемыми модами (GMR), резонанс Фано, мультипольный резонанс (электрический или магнитный диполь) и т.д. GMR – это уникальный вид резонанса, который может быть сильно ограничен в структурах, но при этом имеет слабую связь с внешним излучением [39]. По сравнению с традиционной волной в волноводе GMR обычно сопровождается ограниченным, но высоким коэффициентом качества. Более того, его резонансная частота и добротность существенно зависят от плоскостного волнового вектора. Как еще один важный вид резонанса, резонансы Фано были продемонстрированы на различных платформах [40]. Резонансы Фано возникают из-за интерференции двух волновых каналов, которые обычно имеют узкую и широкую полосу пропускания. В частности, резонанс с узкой полосой пропускания, который определяется структурами, обеспечивает универсальную степень свободы настройки для резонансов Фано.

В дополнение к двум видам резонансов, описанных выше, мультипольные резонансы диэлектрических наночастиц также предоставляют многообещающий путь для настройки ОПФ МП [11,41]. По сравнению с плазмонными структурами диэлектрические наноструктуры могут не только решить проблему потерь и повысить эффективность работы МП, но также облегчить управление рассеянием и распространением света (Рис. 2). Электрический и магнитный дипольные резонансы наноструктур предлагают множество степеней свободы для настройки ОПФ МП. Такие виды диэлектрических МП характеризуются большой пространственной полосой пропускания, а также было успешно продемонстрировано двумерное обнаружение края изображений для произвольной поляризации. Учитывая эти преимущества, можно полагать, что диэлектрические МП могут играть важную роль в других математических операциях и оптических аналоговых вычислениях. Помимо резонансных схем для реализации пространственного дифференцирования и обнаружения контуров



**Рис. 2.** Схематические изображения электрических полей в (a, b) плазмонных резонаторах и в (c) диэлектрической сфере. Плазмонные стержневые антенны поддерживают только электрические резонансы с незначительным магнитным вкладом. Сильный магнитный дипольный резонанс может быть достигнут в плазмонных частицах путем формирования металлического стержня в виде расщепленного кольцевого резонатора [42,44]. d) прямоугольные диэлектрические наночастицы также обладают электрической и магнитной поляризуемостью. Показаны электрические дипольные (ЭД), магнитные дипольные (МД) и полные поперечные сечения рассеяния (произвольные единицы), связанные с соответствующими режимами, приведенными на (e) и (f) [43,44].

изображений, нерезонансные схемы, такие как спин-орбитальное взаимодействие в фазовых МП Панчаратнама-Берри, также были исследованы для достижения обнаружения контуров изображений [45,46].

Использование диэлектрических ММ вместо классических плазмонных структур уменьшает омические (тепловые) потери, и позволяет реализовать управление не только электрической, но и магнитной компонентой световой волны. Иначе говоря, из-за свободного проникновения электромагнитного поля внутрь диэлектриков такие наноструктуры обладают как электрическим, так и магнитным резонансом Ми.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МП

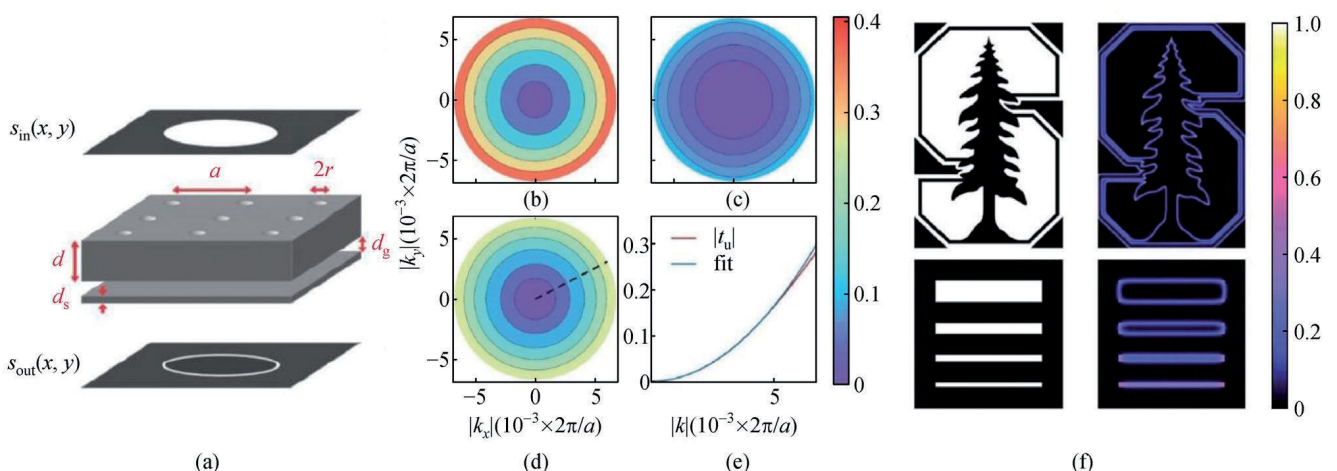
В этом разделе мы в основном сосредоточимся на характеристическом анализе и сравнении встроенных пространственных дифференциаторов, реализованных с помощью GMR, резонанса Фано и мультипольного резонанса [15]. Начнем с того, что с двумерным массивом отверстий в диэлектрической пластине фотонные кристаллы могут обеспечить почти изотропное дифференцирование второго порядка или математическую операцию Лапласа [15,47,48]. На **Рис. 3а** представлена структура устройства оптического пространственного дифференциатора на основе фотонного кристалла, состоящего из фотонно-кристаллической пластины и отдельной диэлектрической пластины. Резонанс Фано может быть построен путем вмешательства в GMR структурированной пластины с падающей волной, что позволяет установить правильную ОТФ для расчета Лапласа в режиме передачи. Фактически свойства отражения и пропускания МП зависят от поляризации. Поэтому необходимо учитывать влияние поляризации на оптические аналоговые вычисления. Для линейно поляризованной волны ОПФ пространственного дифференциатора на основе диэлектрических МП обычно различаются между  $s$ - и  $p$ -волнами. Как показано на **Рис. 3б** и **3в**, пропускание

$p$ -волны намного ниже, чем пропускание  $s$ -волны. В зависимости от частоты света и выбора режима пропускания или отражения устройство реализует изотропную фильтрацию высоких частот, нижних частот и полосовых частот в волновекторном пространстве. Эти функции фильтра важны для различных задач обработки изображений, включая обнаружение краев, сглаживание, подавление белого шума и подавление или извлечение периодических шумов.

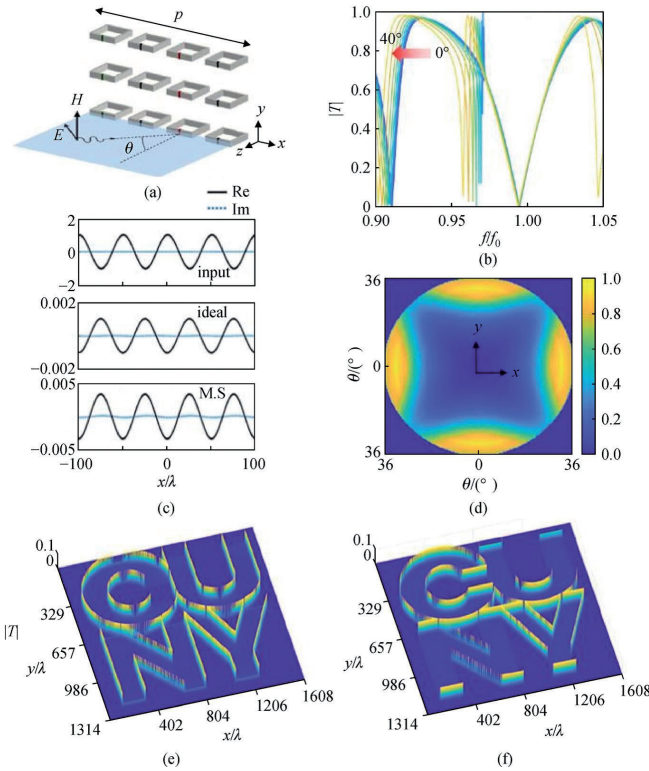
Однако пространственный дифференциатор на основе фотонного кристалла имеет небольшую пространственную полосу пропускания (менее  $1^\circ$ ) из-за большой добротности. В отличие от вышеупомянутой двухслойной структуры, однослойная диэлектрическая МП с резонансами Фано для пространственных дифференциаторов первого и второго порядка позволила расширить диапазон до  $17^\circ$  [49].

Пространственная полоса пропускания может быть расширена разработкой нелокального отклика МП. Дифференциатор второго порядка с полосой около  $40^\circ$  на основе нелокальной МП с разъемными кольцами представлен в [25] – **Рис. 4**.

На пропускающие свойства МП влияло рассеяние между элементарными ячейками, приводящее к разным кривым пропускания при разных углах падения – см. **Рис. 4б**.

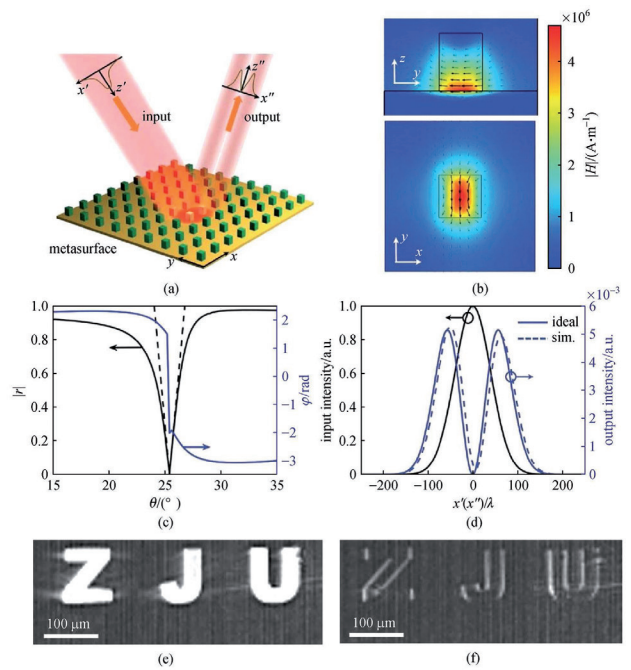


**Рис. 3.** Схема изотропного пространственного дифференциатора второго порядка, реализованного в виде пластины фотонного кристалла и отдельной диэлектрической пластины. (b) ОПФ устройства для  $s$ -волны, (c)  $p$ -волны и (d) неполяризованного света. (e) Одномерная ОПФ как функция волнового вектора и соответствующая квадратичная аппроксимация. (f) Морфология рисунков эмблемы Стэнфорда и прорезей (левый столбец) и соответствующих изображений краев (правый столбец) [47].



**Рис. 4.** (a) Схема пространственного дифференциатора второго порядка на основе нелокальных МП, состоящих из разомкнутых кольцевых резонаторов. (b) Эволюция кривых пропускания пространственного дифференциатора на основе МП при увеличении угла падения от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . (c) Результаты идеальной операции  $d^2/dx^2$  для синусоиды. (d) 2D ОПФ дифференциатора как функция угла падения. (e) Результаты обнаружения контура при  $x$ -поляризованной волне и (f)  $y$ -поляризованной волне [25].

Реализации операции дифференцирования второго порядка способствовал резонанс Фано МП. Однако отсутствующая информация о краях вдоль некоторых направлений дополнительно иллюстрирует свойства анизотропной оптической передачи пространственного дифференциатора. Что касается морфологии устройств, то трехмерные симметричные или антисимметричные решетки резонаторов с разъемным кольцом повысили сложность изготовления. Хотя предложенные нелокальные МП, основанные на решетке резонаторов с разъемным кольцом, значительно улучшили характеристики пространственного дифференциатора, реализация конфигурации устройства должна



**Рис. 5.** Схема пространственного дифференциатора первого порядка на основе отражающей диэлектрической МП. (b) Профили магнитного поля в плоскостях  $x$ - $z$  и  $x$ - $y$ . (c) 1D ОПФ пространственного дифференциатора, соответствующего изменениям амплитуды и фазы отражения при падении света с поперечно-магнитной (ТМ) поляризацией. (d) Кривая выходной интенсивности МП и теоретически рассчитанные результаты для входной гауссоиды. (e) Входное изображение — буквы "ZJU". (f) Выходное изображение отраженной волны [50].

быть тщательно рассмотрена в практических приложениях.

Помимо режима передачи, пространственный дифференциатор на основе диэлектрической МП может также работать в режиме отражения. В 2020 году в [50] предложен пространственный дифференциатор первого порядка, использующий диэлектрическую МП, которая состояла из массива кремниевых квадратных фрагментов на золотой пластине, как показано на **Рис. 5**.

Было достигнуто резкое изменение отражения, сопровождаемое изменением фазы на  $\pi$  вблизи угла падения  $25.4^\circ$  на длине волны  $1565$  нм, что привело к ОПФ для пространственного дифференцирования первого порядка. В принципе, реализация операции дифференцирования первого порядка выиграла от гибридизации моды локализованного магнитного резонанса с



классической модулированной решеткой, ограниченной поверхностной модой. Однако потеря информации в горизонтальном направлении повлияла на обнаружение контура из-за поляризационной зависимости.

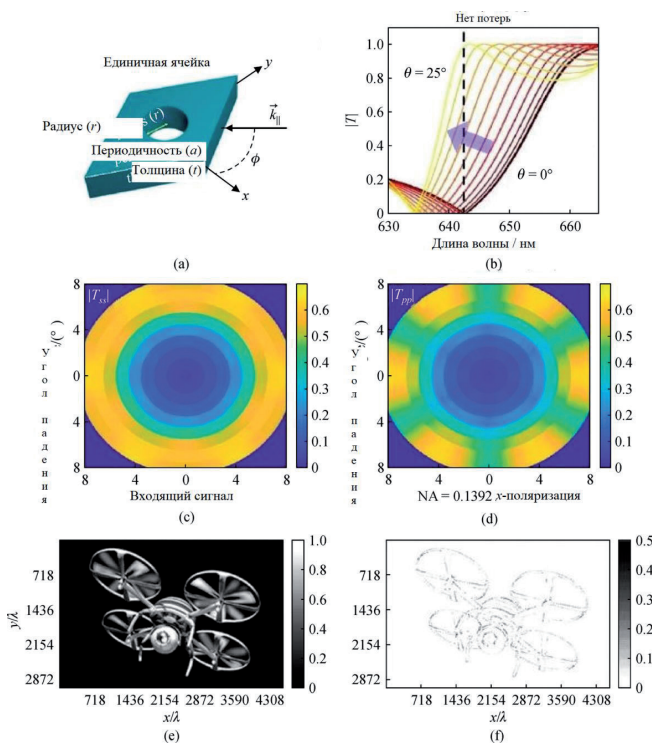
Чтобы уменьшить ограничения поляризационной зависимости, в [51] представлена модель поляризационно-независимых МП на основе резонансов Фано (Рис. 6).

Как показано на Рис. 6, МП образована однослойной треугольной решеткой отверстий в кремниевой мембране, которая индуцирует сильный нелокальный отклик в поперечном пространственном частотном спектре. Генерация резонанса Фано возникла из-за связи между вытекающей волной и продольным резонансом Фабри-Перо в структуре МП без потерь. Путем

оптимизации геометрии элементарной ячейки в диэлектрических МП были достигнуты 2D ОПФ, приближающиеся к изотропному пропусканию для  $s$ - и  $p$ -поляризованного пучка в пределах угла  $8^\circ$  – Рис. 6с и 6d. В дополнение к реализации дифференцирования четного порядка, изотропный отклик нечетного порядка был также получен путем изменения элементарной ячейки МП, чтобы нарушить как поперечную, так и продольную зеркальную симметрию.

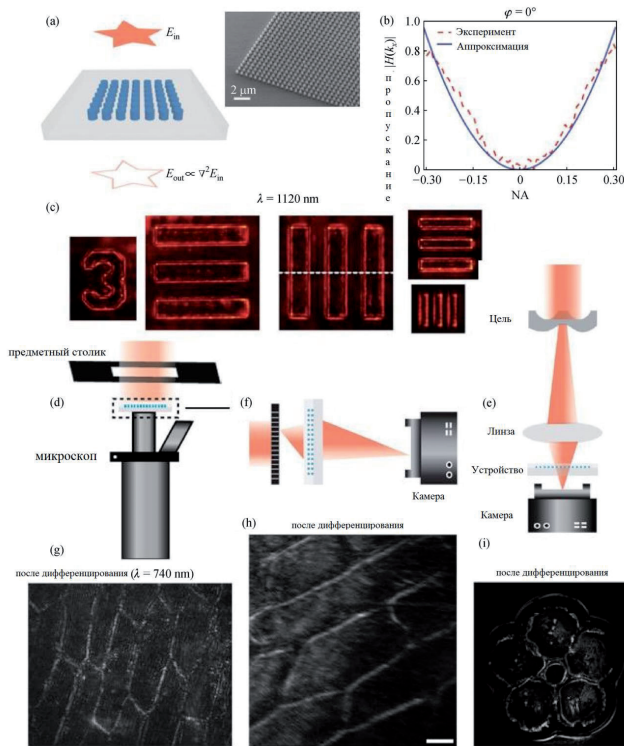
Как упоминалось ранее, пространственное дифференцирование и распознавание границ могут работать как в режимах передачи, так и в режимах отражения. Фактически, режим передачи предпочтительнее в традиционных оптических системах, поскольку установка обычно более удобна, чем в режиме отражения. Поэтому желательно перенести традиционные оптические конфигурации на платформу ММ и МП, работающие в режиме передачи. Кроме того, модуль передаточного типа удобнее интегрировать с другими модулями, особенно в оптических системах формирования изображений.

В работе [52] продемонстрирована применимость пространственных дифференциаторов на основе диэлектрических МП в реальной оптической системе визуализации. Для реализации требуемой передаточной функции использовался двумерный фотонный кристалл, состоящий из цилиндрических наностержней кремния, встроенных в полиметилметакрилат (ПММА) на подложке из диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) (Рис. 7а,б). Там же представлена схема двумерной МП и ее соответствующее изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Кремниевые наностержни имеют высоту 440 нм, диаметр 280 нм и период 600 нм. В этой структуре была теоретически рассчитана амплитуда коэффициента пропускания как функция частоты и угла падения вдоль направления  $\Gamma$ -X ( $\varphi = 0$ , где  $\varphi$  – азимутальный угол в горизонтальной плоскости) для  $s$ - и  $p$ -поляризации. Следует отметить, что для проходящего света не происходит преобразования поляризации.



**Рис. 6.** (а) Элементарная ячейка пространственного дифференциатора второго порядка на основе дырочной диэлектрической МП. (б) Кривые пропускания Фано дифференциатора в зависимости от угла падения от  $0$  до  $25^\circ$ . 2D ОПФ устройства, соответствующие падению  $s$ -поляризованной волны (с) и  $p$ -поляризованной волны (d). (f) Выходной результат обнаружения краев (е) сложного входного 2D-изображения при освещении  $x$ -поляризованным светом [51].





**Рис. 7.** (а) Схема пространственного дифференциатора второго порядка, состоящего из массива кремниевых наностержней, и соответствующее изображение, полученное с помощью СЭМ. (б) Результаты измерений и подобранная параболическая кривая 1D ОПФ как функция числовой апертуры (NA). (с) Изображения распознавания контуров с использованием тестовой таблицы с дифференциатором при освещении неполяризованным светом 1120 нм. Конфигурации оптических путей, соответствующие дифференциаторам, интегрированным в передней части (d) линзы объектива, в передней части (e) коммерческой камеры устройства с зарядовой связью и в задней части (f) металлической линзы. Целевые краевые изображения (g), (h) биологической клетки и (i) пластиковой цветочной формы с двумерным пространственным дифференциатором, соответствующим трем типам конфигураций оптических путей [52].

При нормальном падении наблюдаются два широких провала пропускания на частотах 244 и 268 ТГц, что указывает на наличие двух резонансов Ми с низкой добротностью. Учитывая зеркальную симметрию и взаимность 2D-пластины фотонного кристалла в направлении, перпендикулярном МП, выходной сигнал для  $s$ -поляризованного освещения отсутствовал. Однако резонанс Фано, образованный квазиуправляемой модой,

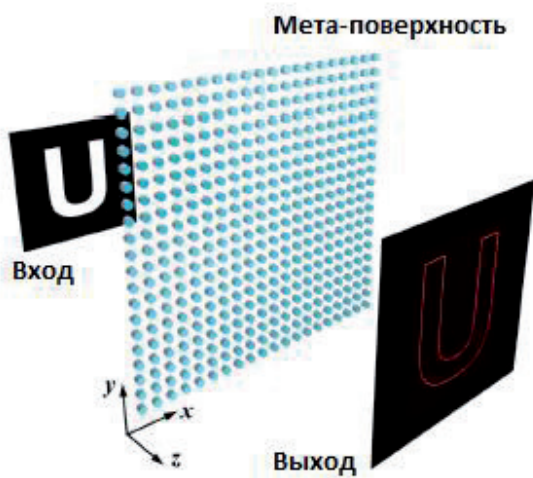
привел к резкому изменению пропускания с увеличением угла падения для освещения  $p$ -поляризованным светом. Одномерная ОПФ  $H(k_x)$  была измерена вдоль азимутальной плоскости  $\varphi = 0$  и аппроксимирована с использованием параболической кривой в диапазоне числовой апертуры (NA)  $nk_x = 0.3$ , как показано на Рис. 7b. Здесь  $n$  означает показатель преломления диэлектрика. МП была экспериментально проверена с использованием тестовой таблицы разрешения при освещении неполяризованным и коллимированным светом на длине волны 1120 нм ( $f = 268$  ТГц).

Результаты, показанные на Рис. 7c, представляют результат обнаружения краев, когда модулированный свет проходил через МП из кремниевых наностержней, что иллюстрирует, что пространственное разрешение обнаружения было менее  $4 \mu\text{m}$ .

В сочетании с пространственным дифференциатором на основе МП и практической системой оптической визуализации были созданы три типа конфигураций оптических путей на основе коммерческого микроскопа и элементов устройства с зарядовой связью (ПЗС) для получения форм и границ различных биологических клеток и пластиковых цветочных форм, как показано на Рис. 7d, 7e и 7f. За счет интеграции дифференциатора на поверхности линзы объектива и ПЗС-камеры были четко видны изображения краев цели, чтобы продемонстрировать возможность создания компактной оптической системы обработки изображений, основанной на полностью диэлектрических МП – Рис. 7g, Рис. 7h и 7i. Реализация монолитного оптического пространственного дифференциатора на основе двумерных кремниевых МП и его интеграционные применения для систем обработки изображений могут проложить путь к разработке встроенных оптических аналоговых вычислительных устройств в области биологической визуализации. Кроме того, в [52] продемонстрировано, как полная система обработки изображений может быть выполнена с использованием монолитной плоской оптики.

## 5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В КИТАЙСКО-РОССИЙСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

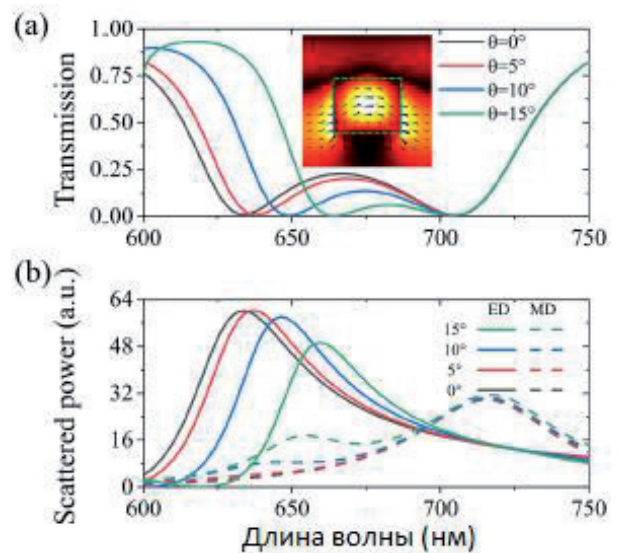
Оптические аналоговые вычисления с использованием метаповерхностей являются предметом многочисленных исследований, направленных на реализацию высокоэффективной и сверхбыстрой обработки изображений в компактном устройстве. Предложенные на сегодняшний день подходы показали ограничения с точки зрения пространственного разрешения, общей эффективности, поляризации и азимутальной угловой зависимости. Здесь мы представляем дизайн нечувствительной к поляризации метаповерхности. В наших работах представлен путь к реализации высокоэффективных оптических МП, выполняющих изотропное и нечувствительное к поляризации обнаружение краев на произвольном 2D-изображении [11,12,15,16].



**Рис. 8.** Схема оптических аналоговых вычислений для пространственного 2D дифференцирования и обнаружения контура с помощью МП. 2D-изображение символа U является входной информацией, а падающий свет вдоль направления  $z$  будет модулироваться таким образом, чтобы он проходил через белую область, пока он заблокирован черной областью. При прохождении модулированного светового поля через МП, профиль контура символа U будет показан на выходном изображении [11].

Базовая конфигурация для оптических аналоговых вычислений пространственного дифференцирования с диэлектрической МП схематически показана на **Рис. 8**. Информация о границе между однородными областями с высокой контрастностью будет учитываться компонентами волнового вектора, отклоняющимися от нормального направления  $z$  вследствие дифракции. Если пространственная дисперсия МП должным образом спроектирована, такие компоненты волнового вектора могут проходить через МП с высокой эффективностью, в то время как при малых углах падения, учитывающих однородные области модулированного света, будут блокироваться МП, что приводит к реализации пространственного дифференцирования, а затем обнаружения края объекта.

В качестве примера рассмотрим МП, состоящую из кремниевых нанодисков с радиусом и высотой 92 нм и 150 нм соответственно. Такие нанодиски расположены в квадратной решетке

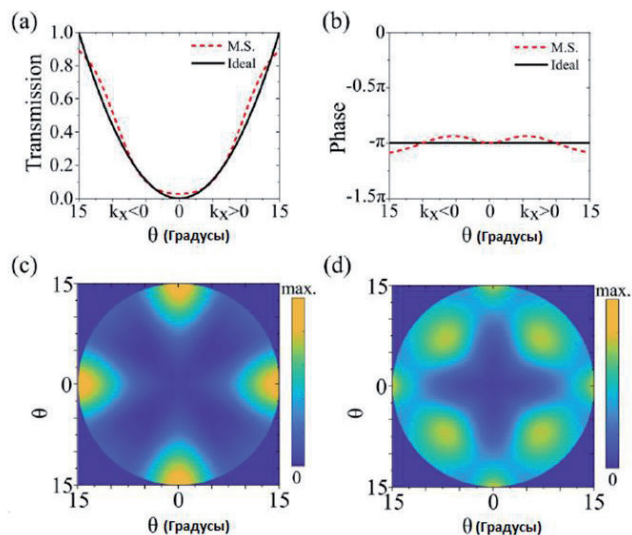


**Рис. 9.** (a) Спектр пропускания МП для  $s$ -волны и разных углов падения  $\theta$ . Вставка: величина электрического поля на 630 нм для нормального падения. Стрелки обозначают направление поля. (b) Результаты мультипольного разложения, показывающие, что резонансы на более коротких волнах соответствуют резонансам электрического диполя (ED) (сплошные линии), в то время как более длинные волны соответствуют резонансам магнитного диполя (MD) (пунктирные линии). По оси ординат — рассеянная мощность [11].

с периодом 350 нм и внедрены в однородную среду с показателем преломления 1.45. Спектр пропускания нормально падающей плоской волны рассчитывается методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics 5.3a) и показан на Рис. 9a. Видны два резонанса, соответствующих двум провалам пропускания около  $\lambda = 630$  нм и  $\lambda = 710$  нм соответственно.

Чтобы выяснить природу резонансов, мы используем для анализа технологию мультипольного разложения. Результаты представлены на Рис. 9b и показывают, что два резонанса являются электрическим дипольным резонансом на более короткой длине волны и магнитным дипольным резонансом на большей длине волны, соответственно. Чтобы исследовать пространственную дисперсию двух резонансов, мы рассчитали спектры пропускания для  $s$ -волны под разными углами падения вдоль направления  $x$ , которые также показаны на Рис. 9a. При увеличении угла падения провал на  $\lambda = 630$  нм смещается в сторону большей длины волны, а на  $\lambda = 710$  нм он практически не изменяется. Такие свойства также могут быть определены с помощью результатов мультипольного анализа – Рис. 9b.

Фактически, сдвиг электрического дипольного резонанса с увеличением угла падения  $\theta$  обеспечивает основной механизм пространственного дифференцирования и обнаружения краев. Например, предполагая, что длина волны модулированного светового поля составляет 630 нм, более высокая пропускная способность может быть получена для большего угла падения, который содержит информацию о пространственных изменениях, которая может быть собрана после прохождения света через МП. Чтобы явным образом представить свойства, мы показали на Рис. 10a пропускание в зависимости от угла падения, а именно ОПФ  $H(k_x)$  на длине волны 630 нм. Можно заметить, что это похоже на параболическую форму линии. Следует отметить, что угол падения может составлять до  $15^\circ$ , а соответствующая числовая апертура составляет около 0.37, что указывает на большую пространственную пропускную полосу по сравнению с большинством предыдущих работ. Такая полоса пропускания может обеспечить пространственное разрешение  $1.93\lambda$ . Между тем, максимальное пропускание составляет около



**Рис. 10.** (a) ОПФ вдоль направления  $x$  как для МП (красная пунктирная линия, M.S.), так и для идеального (черная сплошная линия) случая на длине волны 630 нм. (b) Соответствующие фазы ОПФ. Плоскость отсчета намеренно выбрана так, чтобы фаза передачи составляла  $-\pi$  при нормальном падении. (c) и (d) 2D ОПФ для волн  $s$  и  $p$  соответственно [11].

90% на  $\theta = 15^\circ$ , что может обеспечить хорошее соотношение сигнал/шум на выходе.

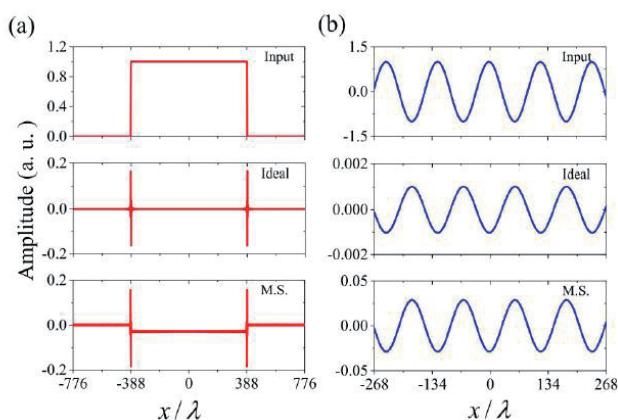
Для удобства сравнения мы также представили результаты для идеальной передаточной функции дифференцирования второго порядка (3)  $H_0(k_x) = -\alpha k_x^2 / 2$ , где  $\alpha$  – константа, гарантирующая, что передача равна единице при  $\theta = 15^\circ$ . Можно обнаружить, что оба результата находятся в хорошем согласии друг с другом. Кроме того, мы показали соответствующие фазы передачи на Рис. 10b, и есть только небольшие отклонения между ними. Следовательно, такая МП может обеспечить оптические аналоговые вычисления для производной второго порядка и обнаружения краев. Поскольку решетка обладает симметрией вращения четвертого порядка, ОПФ вдоль направления  $y$  такая же. Это означает, что возможно двумерное взятие производной второго порядка. Мы рассчитали двухмерную ОПФ  $H(k_x, k_y)$  МП для волн  $s$  и  $p$ , которые показаны на Рис. 10c и 10d. Можно обнаружить, что передачи для меньших углов падения близки к нулю, а для больших углов падения приближаются к единице для большинства волновых векторов. Хотя ОПФ МП не является идеально изотропной в плоскости  $xu$ , что обеспечило бы существование дифференциального оператора Лапласа,



она все же может практически выполнять обнаружение контура для 2D-изображений. Кроме того, поскольку ОПФ для волн  $s$  и  $p$  имеют одинаковую параболическую форму вдоль направлений с высокой симметрией, пространственное дифференцирование может быть выполнено как для поляризованных, так и для неполяризованных световых полей, что указывает на большой потенциал в практике.

Чтобы явно продемонстрировать функциональность пространственного дифференцирования с помощью разработанной МП, мы сначала исследуем применение смоделированных на Рис. 10а и 10б результатов для одномерных пространственных функций. Два случая, типичных для логической функции и синусоиды, показанные в верхнем ряду Рис. 11а и 11б, были изучены, соответственно. Сначала мы рассчитали частотные спектры  $\tilde{S}(k_x)$  пространственных функций с помощью ФТ. Затем мы умножили его на ОПФ  $H(k_x)$  и результаты были возвращены в пространственную область обратным ФТ.

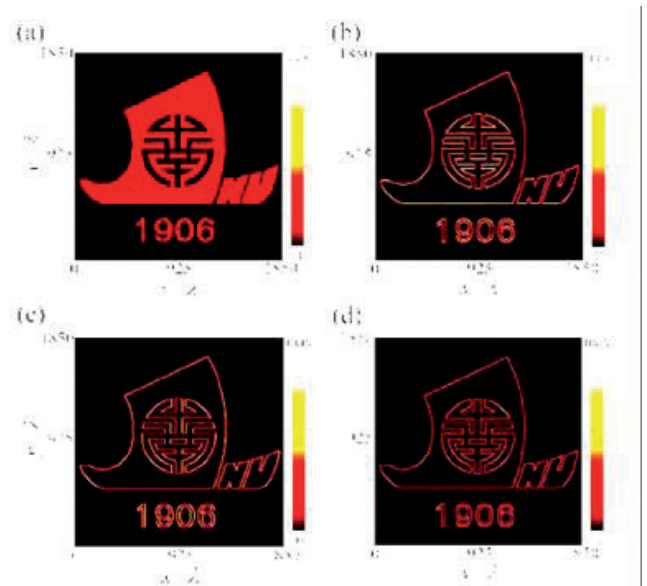
В качестве стандартных выходных данных мы представили результаты, обработанные с помощью идеальной производной второго порядка – средний ряд Рис. 11а и 11б. Нет сомнений в том, что отчетливые выходные данные появляются только в местах с



**Рис. 11.** (а) Результаты нахождения производной второго порядка 1D пространственной логической функции. Входные и выходные данные для идеального случая и предложенной МП показаны в верхнем, среднем и нижнем рядах соответственно. (б) Соответствующие результаты для одномерной синусоидальной пространственной функции. В обоих случаях размер пикселя на входе составляет  $1.94\lambda$  [11].

быстрыми изменениями логической функции. Для синусоидальной функции выходной сигнал также является синусоидальным, но с противоположным знаком. Для случая предлагаемой нами МП мы показываем результаты на нижних рядах Рис. 11а и 11б. В случае логической функции выходные данные от МП также показывают очевидные сигналы в позициях изменения, хотя есть очень слабый сигнал вокруг центральной области из-за исчезающей передачи для малых углов падения, которая должна быть оптимизирована для приближения к идеальным результатам и увеличения пропускной способности. Для синусоидальной функции выходной сигнал с МП обеспечивает превосходное соответствие профиля идеальному случаю. Следовательно, МП действительно может выполнять функциональные возможности взятия производной второго порядка для одномерных пространственных функций.

Как уже упоминалось выше, предлагаемая нами МП может проводить пространственное дифференцирование и обнаружение границ для 2D-изображений. Далее мы рассмотрим его с помощью входного изображения, состоящего из



**Рис. 12.** (а) Двумерное изображение с логотипом лодки университета Цзинань. Размеры пикселей в направлениях  $x$  и  $y$  установлены равными  $1.94\lambda$ . (б) Выходное изображение с МП для модулированного светового поля с поляризацией  $x$ . (с) Выходное изображение для случая  $y$  поляризации. (д) Выходное изображение для случая неполяризованного света [11].



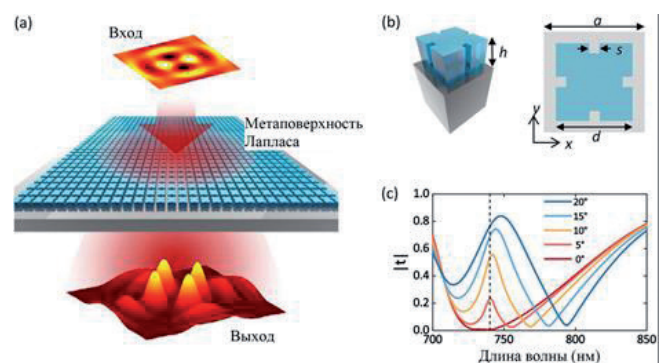
логотипа лодки университета Цзинань, который показан на Рис. 12а. Это изображение должно быть хорошим образцом для тестирования, поскольку оно содержит края линий, дуг и окружностей.

Чтобы получить выходные данные, мы проецируем поля ввода с линейной поляризацией на поляризациях  $s$  и  $p$ , а затем применяем соответствующие ОПФ. Усреднением отдельных выходов  $s$  и  $p$  поляризаций, получим результаты для неполяризованного случая. Во-первых, мы предположим, что изображение модулирует  $x$ -поляризованную плоскую волну. В этом случае выходное изображение после того, как свет пройдет через МП, показано на Рис. 12b. Можно видеть, что края всех элементов были успешно извлечены, и такие эффекты не ограничиваются конкретными направлениями. Это связано с тем, что ОПФ предложенной МП имеет параболическую форму вдоль большинства направлений на плоскости  $xy$ . Кроме того, ОПФ для  $s$ - и  $p$ -волн дополняют друг друга в разных плоскостных направлениях – см. Рис. 10c и 10d. Далее мы изучили случай для светового поля с поляризацией вдоль направления  $y$  – Рис. 12c. В этом случае выходное изображение также показывает четко определенный профиль края, который очень похож на случай  $x$ -поляризации.

Наконец, результат для неполяризованного света показан на Рис. 12d. Поскольку края всех элементов в изображении могут быть хорошо обнаружены для обоих линейно поляризованных световых полей, они также могут быть обнаружены и для случая неполяризованного света. Как обсуждалось выше, ОПФ предложенной МП не может рассматриваться как идеальный оператор Лапласа. Тем не менее, данная МП может по-прежнему предлагать приемлемые результаты для обнаружения контуров, хотя выходные значения не совсем одинаковы для разных поляризаций. Кроме того, такая МП включает в себя только один слой кремниевых нанодисковых резонаторов, что может значительно упростить настройку параметров и изготовление ее для практических приложений.

Реализация операции Лапласа в виде оптических аналоговых вычислений недавно

привлекла внимание, и компактное устройство с высоким пространственным разрешением все еще не изобретено. В [16] мы предложили метаповерхность Лапласа, которая может выполнять почти идеально операцию Лапласа для разных конфигураций падающего светового поля. Наиболее важно то, что максимальный угол падения  $\theta$  был значительно расширен, и числовая апертура может приближаться к 0.14, что улучшает практическую установку и приводит к пространственному разрешению, примерно в 4 раза превышающему рабочую длину волны. Предлагаемая МП Лапласа основана на возбуждении связанного состояния в континууме, которое продемонстрировало экзотические оптические свойства. Высоко симметричный профиль режима обеспечивает почти изотропную ОПФ операции Лапласа. Мы продемонстрировали, что такая ОПФ может не только выполнять дифференцирование второго порядка для одномерной пространственной функции Гаусса, но также выводит правильные результаты для двумерной функции Бесселя. Кроме того, мы также показали, что МП Лапласа может использоваться для реализации



**Рис. 13.** (a) Диэлектрическая МП, преобразующая входную двумерную пространственную функцию в другую функцию как оператор Лапласа; (b) Элементарная ячейка диэлектрической МП. Слева, трехмерный вид элементарной ячейки. Она состоит из кремниевого кирпичика (голубой цвет) толщиной  $h = 163$  нм и стеклянной подложки (серый цвет). Справа, вид сверху на элементарную ячейку. Период составляет  $a = 331$  нм, а ширина кремниевого кирпича  $d = 251$  нм. В центре всех краев расположены четыре квадратные пустоты шириной 33 нм. (c) Спектры коэффициента пропускания МП Лапласа при различных углах падения вдоль направления  $x$  для  $p$ -волны [16].

обнаружения краев интересующих объектов на изображении. Предлагаемая МП Лапласа может быть настроена для работы на разных длинах волн в режиме передачи, что дает преимущества для приложений оптических вычислений, медицинской диагностики, машинного зрения и т.д.

Чтобы удовлетворить требованиям по ОПФ и свойствам передачи, мы разработали новую МП Лапласа, которая показана на Рис. 13а. При прохождении через МП Лапласа входное световое поле будет автоматически обрабатываться, и результаты операции Лапласа могут быть получены просто путем простой и мгновенной записи выходного светового поля.

МП Лапласа состоит из квадратной решетки модифицированного кремниевого кирпичика на стеклянной подложке, который показан на Рис. 13б. Высокая симметрия квадратной решетки и дефекты на четырех сторонах кремниевого кирпичика обеспечивают изотропную ОПФ для направлений в плоскости. Мы рассчитали спектры пропускания МП Лапласа при различных углах падения и привели их на Рис. 13с. Можно обнаружить, что резонанс проявляется на длине волны  $\lambda \approx 740$  нм, когда световое поле падает под углом. Коэффициент пропускания увеличивается с увеличением угла падения  $\theta$ . В результате обеспечиваются необходимые условия для реализации операции Лапласа. Чтобы объяснить зависимость пропускания от угла  $\theta$  для МП Лапласа, мы вычислили дисперсионные полосы около 740 нм предлагаемой диэлектрической МП (кремний без потерь с показателем преломления 3.73). Все расчеты подробно приведены в [16].

Для проверки правильности выполнения операции Лапласа вначале использовалась одномерная пространственная функция – Рис. 14а. Эта функция состоит из трех гауссовых огибающих и может рассматриваться как профиль электрического поля входящего светового луча. Выходные сигналы показаны на Рис. 14б и 14с. Крошечная разница между результатами идеального случая и МП может быть объяснена небольшим отклонением ОПФ МП Лапласа от идеального. Мы установили пространственное разрешение  $3.6\lambda$  для входной функции, что

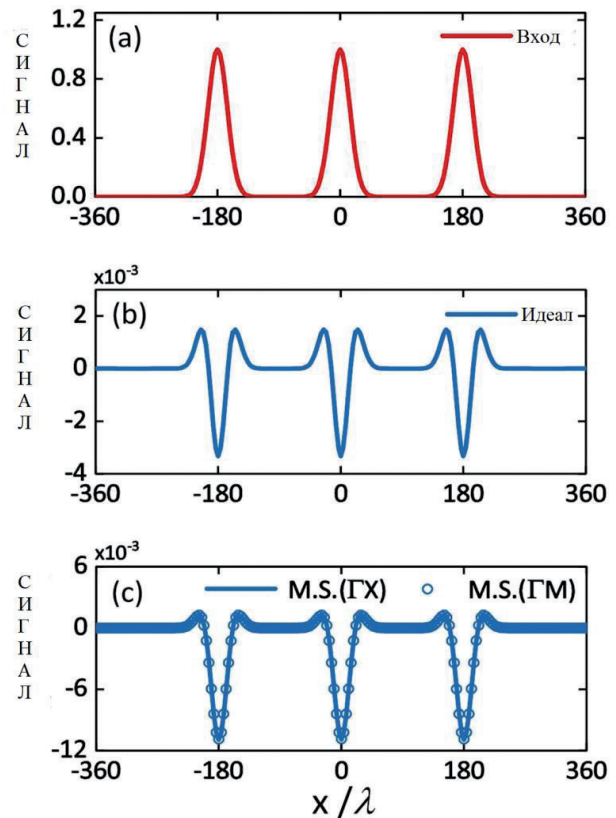
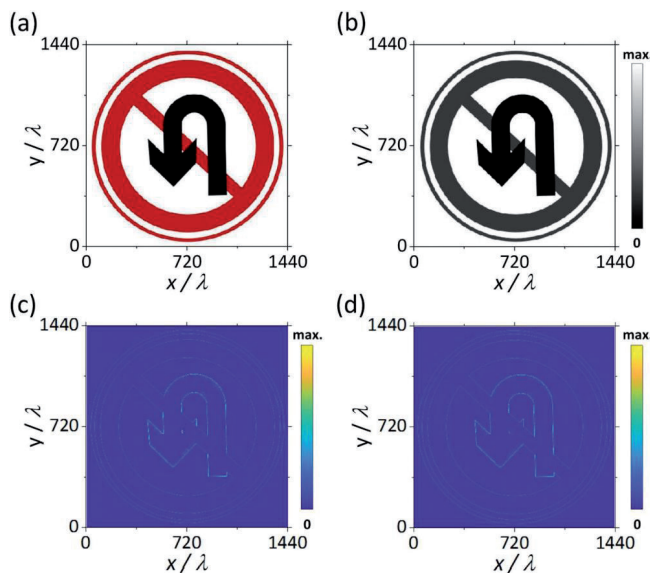


Рис. 14. Одномерная пространственная функция с тремя гауссовыми огибающими в качестве входного светового поля; (b) Результат после операции идеального дифференцирования второго порядка; (c) Результат от МП Лапласа. Рассмотрены как ОПФ по направлениям ГХ (сплошная линия), так и ГМ (символы). Размер входного пикселя составляет  $3.6\lambda$  [16].

близко к максимальному пространственному разрешению данной МП.

Одно из применений операции Лапласа – обнаружение краев проблемных целей на изображении. Мы также продемонстрировали, что предлагаемую МП Лапласа можно использовать для распознавания дорожных знаков, что имеет решающее значение для автоматизированного вождения. Был выбран дорожный знак, который показан на Рис. 15а.

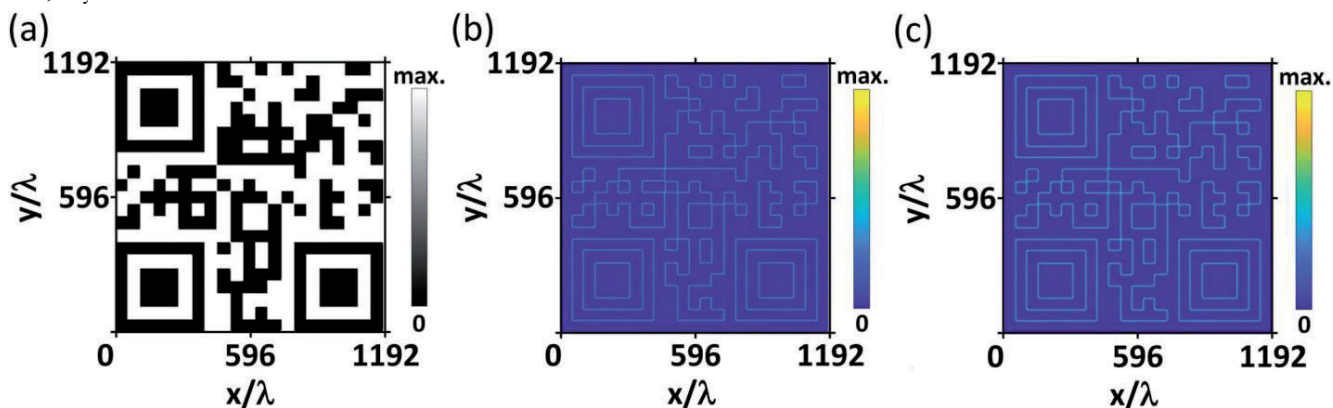
Полутоновое изображение на Рис. 15б можно рассматривать как неполяризованное световое поле с модуляцией интенсивности, которое падает на МП Лапласа. Из результатов после идеальной операции Лапласа, которые показаны на Рис. 15с, можно заметить, что края как внешних кругов, так и стрелки могут быть четко идентифицированы. Следовательно, необходимая информация может быть безопасно сохранена, в то время как избыточная будет отброшена, что ускоряет обработку



**Рис. 15.** (a) Цветное изображение дорожного знака. (b) Соответствующее изображение в градациях серого в качестве входных данных. (c) и (d) Выходное изображение из идеального оператора Лапласа и МП Лапласа для (b) соответственно [16].

информации на первом этапе. Мы показали выходные результаты МП Лапласа на Рис. 15d, где можно обнаружить, что подобное обнаружение краев также может быть успешно реализовано.

МП Лапласа может быть переведена для работы на других длинах волн путем регулировки размера структуры. Чтобы продемонстрировать это, аналогичным образом была разработана другая МП Лапласа, работающая на длине волны 1550 нм (окно прозрачности оптического волокна). Форма структуры такая же, как на Рис. 13b, но с другими параметрами:  $a = 743$  нм,  $d = 560$  нм,  $s = 69$  нм и  $b = 360$  нм, соответственно. При этом коэффициент пропускания мог достигать 0.9, а угол падения  $10^\circ$ .



**Рис. 16.** (a) Входное изображение, состоящее из QR-кода; (b) выходное изображение идеальной операции Лапласа; (c) выход из МП Лапласа. Все изображения представляют собой профиль интенсивности света; размеры пикселей установлены как  $2.88\lambda$  [16].

Мы использовали типичный QR-код в качестве входного 2D изображения, поскольку QR-коды теперь важны в нашей повседневной жизни, и обнаружение краев для них играет решающую роль в обнаружении области QR-кода. Выбранный нами QR-код показан на Рис. 16a, который несет информацию о китайском иероглифе, означающем "Свет". Посредством процедуры обработки, обсуждаемой в данном контексте, мы можем получить результаты от идеальной операции Лапласа и от МП Лапласа, которые показаны на Рис. 16b и 16c.

Из данных Рис. 16 видно, что края всех элементов были успешно обнаружены. Кроме того, интенсивность света на выходе из МП очень похожа на идеальную, что подразумевает высокое качество обнаружения границ для изображений с МП Лапласа.

Ввиду ограниченного объема статьи автор лишь конспективно перечислит другие направления фотоники, которые также исследуются в наших работах [10-17] и подробно там представлены. Это: управление рассеянием света наночастицами с помощью магнито-электрической связи и нулевое обратное рассеяние (теория рассеяния света наночастицами и электромагнитные мультиполи, численное моделирование, проверочные эксперименты в области частот от 4 до 7.5 ГГц) [10,13,14]; сильная оптомеханическая связь в цепочечных волноводах из наночастиц кремния с квазисвязанными состояниями в континууме (фотон-фононное взаимодействие с микроструктурами) [17] и т.п. Эти направления, несомненно, могут стать темами будущих докладов на конференциях "Радиолокация, навигация, связь - RLNC" в ВГУ.



## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метаповерхности – это очень широкая область исследований в фотонике, ее развитие только начинается, при этом, исследование диэлектрических МП вызывает большой интерес. МП имеют преимущество в том, что занимают меньше физического пространства, чем трехмерные ММ; следовательно, МП предлагают возможность конструирования структур с меньшими потерями. В частности, отметим, что использование диэлектрических МП вместо плазмонных структур наряду с уменьшением омических потерь помогает реализовать управление не только электрической, но и магнитной компонентой световой волны, что повышает эффективность управления светом в наноразмерных структурах.

К настоящему времени встроенные оптические пространственные дифференциаторы были продемонстрированы с использованием различных искусственных МП [15,18,19]. По сравнению с конфигурациями пространственных дифференциаторов на основе металлических МП, полностью диэлектрические операционные устройства на основе МП в последнее время стали популярной темой исследований из-за их превосходной совместимости и интеграции с реальными системами визуализации. Для дальнейшего удовлетворения требований обнаружения границ в практических приложениях предпочтение будет отдано высокопроизводительным пространственным дифференциаторам с высокой эффективностью и разрешением. Построение пространственных дифференциаторов с высокой передачей энергии, большой пространственной полосой пропускания и независимостью от поляризации в настоящее время является доминирующей задачей. В сочетании с коммерческой кремниевой фотонной платформой и передовыми технологиями нанопроизводства будут проводиться экспериментальные демонстрации математических операций и обнаружения границ в многочисленных сценах обработки изображений, чтобы раскрыть гораздо больший потенциал применения. Более того, интеграция на кристалле операционных устройств с другими планарными оптическими элементами, основанными на диэлектрических метаповерхностных

платформах, таких как металинза, также будет ценным направлением в будущем.

Итак, в статье были достаточно подробно рассмотрены вычислительные диэлектрические МП, реализующие математические операции пространственного дифференцирования и распознавания контуров в фотонных топологических устройствах обработки сигналов и полей. Такие МП имеют широкий спектр потенциальных приложений в электромагнетизме.

Их применение в целом выводит на новый уровень все функциональные характеристики предложенной автором в конце XX века топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей при решении классических задач обнаружения, измерения, распознавания и классификации интеллектуальными радиотехническими системами и устройствами. Такая задача пока не ставилась в научном мире. Автором движет уверенность, что наши текущие и будущие исследования окажутся чрезвычайно полезными для будущих устройств обработки потоков информации, и не только в радиолокации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации*. М., Логос, 2002, 664 с. Потапов А.А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Университетская книга, 2005, 848 с.
2. Профессор Александр Алексеевич Потапов. *Фракталы в действии: Библиографический указатель*. Под ред. академика Ю.В. Гуляева. М., ЦИУ “Радуга”, 2019, 256 с.
3. Potapov Alexander A, Wu Hao, Xiong Shan. *Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control*. Guangzhou, South China University of Technology Press (First edition: Nov. 2020), 2020, 280 pp.
4. Кузнецов В.А., Потапов А.А., Аликулов Е.А. *Патент RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09)*. Способ фрактального комплексирования многочастотных радиолокационных изображений. Приоритет изобретения 05.09.2020 г., дата государственной регистрации 06.04.2021 г. Бюл. № 10.
5. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными



- станциями с синтезированной апертурой. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, 2021, 24(3):6-21.
6. Потапов АА, Кузнецов ВА, Потоцкий АН. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений. *Радиотехника и электроника*, 2021, 66(5):457-467.
  7. Потапов АА. Математические основы фрактально-скейлингового метода в статистической радиофизике и приложениях. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(3):245-296. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.245.
  8. Beliaeva VS, Klyuev DS, Neshcheret A M, Potapov AA, Sokolova YV. Fractal Antenna Systems with Chiral Metamaterials Substrates for MIMO Systems. In: Hu Z, Petoukhov S, He M (eds). *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education V*. (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, v. 107). Cham, Springer, 2022, pp. 329-345.
  9. Потапов АА, Кузнецов ВА, Аликулов ЕА. Структурно-параметрический синтез систем оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных радиолокационных изображений. *Радиотехника и электроника*, 2022, 67(1):51-67.
  10. Danping Pan, Tianhua Feng, Wei Zhang, and Alexander A. Potapov. Unidirectional light scattering by electric dipoles induced in plasmonic nanoparticles. *Optics Letters*, 2019, 44(11):2943-2946.
  11. Wan Lei, Pan Danping, Yang Shuaifeng, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Wu Xia, Liu Weiping, Feng Tianhua, and Li Zhaohui. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces. *Optics Letters*, 2020, 45(7):2070-2073.
  12. Pan Danping, Wan Lei, Potapov Alexander A., Feng Tianhua. Performing Spatial Differentiation and Edge Detection with Dielectric metasurfaces. *QELS Fundamental Science "OSA Technical Digest Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (San Jose, California, USA, 10-15 May 2020)"*. – Washington, Optical Society of America, 2020. Paper FW4B.2.pdf. 2 pp. (From the session "Inverse Design and Computation (FW4B)").
  13. Feng Tianhua, Potapov Alexander A., Liang Zixian, Xu Yi. Huygens Metasurfaces Based on Congener Dipole Excitations. *Physical Review Applied*, 2020, 13, Article No. 021002, 6 pp.
  14. Feng Tianhua, Yang Shuaifeng, Lai Ning, Chen Weilian, Pan Danping, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Liang Zixian, Xu Yi. Manipulating light scattering by nanoparticles with magnetoelectric coupling. *Physical Review B*, 2020, V 102, Article No. 205428, 7 pp.
  15. Wan Lei, Pan Danping, Feng Tianhua, Liu Weiping, Potapov A.A. A review of dielectric optical metasurfaces for spatial differentiation and edge detection. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(2):187-200.
  16. Wan Lei, Pan Danping, Ouyang Min, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Liu Weiping, Liang Zixian, Feng Tianhua, Li Zhaohui. Laplace metasurfaces for optical analog computing based on quasi-bound states in the continuum. *Photonics Research*, 2021, 9(9):1758-1766.
  17. Yang Shuaifeng, Wan Lei, Wang Fugen, Potapov Alexander A., Feng Tianhua. Strong optomechanical coupling in chain-like waveguides of silicon nanoparticles with quasi-bound states in the continuum. *Optics Letters*, 2021, 46(18):4466-4469.
  18. Ziolkowski RW, Engheta N. Metamaterials: Two Decades Past and Into Their Electromagnetics Future and Beyond. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2020, AP-68(3):1232-1237; doi: 10.1109/TAP.2019.2938674.
  19. He Shanshan, Wang Ruisi, Luo Hailu. Computing metasurfaces for all-optical image processing: a brief review. *Nanophotonics*, 2022, 26 p.; doi: 10.1515/nanoph-2021-0823.
  20. Гуляев Ю.В. Интервью. *Интеллект & Технологии*, 2017, 4(19):6-11.
  21. Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N. Performing mathematical operations with metamaterials. *Science*, 2014, 343(6167):160-163.
  22. Pors A, Nielsen MG, Bozhevolnyi SI. Analog computing using reflective plasmonic metasurfaces. *Nano Letters*, 2015, 15(1):791-797.
  23. Chen H, An D, Li Z, Zhao X. Performing differential operation with a silver dendritic metasurface at visible wavelengths. *Optics Express*, 2017, 25(22):26417-26426.
  24. Wu W, Jiang W, Yang J, Gong S, Ma Y. Multilayered analog optical differentiating device: performance analysis on structural parameters. *Optics Letters*, 2017, 42(24):5270-5273.
  25. Kwon H, Sounas D, Cordero A, Polman A, Alù A. Nonlocal metasurfaces for optical signal

- processing. *Physical Review Letters*, 2018, 121(17). Article No. 173004.
26. Zhang W, Qu C, Zhang X. Solving constant-coefficient differential equations with dielectric metamaterials. *Journal of Optics*, 2016, 18(7). Article No. 075102.
  27. Abdollahramezani S, Chizari A, Dorche AE, Jamali MV, Salehi JA. Dielectric metasurfaces solve differential and integro-differential equations. *Optics Letters*, 2017, 42(7):1197-1200.
  28. Ремнев МА, Климов ВВ. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом. *Успехи физ. наук*, 2018, 188(2):169-205.
  29. Рыбин МВ, Лимонов МФ. Резонансные эффекты в фотонных кристаллах и метаматериалах. *Успехи физ. наук*, 2019, 189(8):881-898.
  30. Гудмен Дж. *Введение в Фурье-оптику*. М., Мир, 1970, 364 с.
  31. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике*. М., Мир, 1971, 495 с.
  32. Зверев ВА. *Радиооптика*. М., Советское радио, 1975, 304 с.
  33. Потапов АА. Статистический подход к описанию изображений текстур земной поверхности в оптическом и радиодиапазоне. *Тез. докл. Всесоюз. конф. "Математические методы распознавания образов – ММРО-IV"*, Рига, Изд-во МИПКРРиС при СМ Латв. ССР, 1989, Часть 4, с. 3-5.
  34. Потапов АА, Колесников АИ. Корреляционные характеристики изображений земной поверхности. *Радиотехника и электроника*, 1993, 38(7):1270-1279.
  35. Потапов АА, Колесников АИ. Спектральные характеристики изображений земной поверхности. *Радиотехника и электроника*, 1993, 38(10):1851-1862.
  36. Потапов АА. Синтез изображений земных покровов в оптическом и миллиметровом диапазонах волн. *Автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук*, М., ИРЭ РАН, 1994, 44 с.
  37. Farmahini-Farahani M, Cheng J, Mosallaei H. Metasurfaces nanoantennas for light processing. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(9):2365-2370.
  38. Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S. Plasmonic computing of spatial differentiation. *Nature Communications*, 2017, 8(1). Article No. 15391.
  39. Fan S, Joannopoulos JD. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs. *Physical Review B*, 2002, 65(3). Article No. 235112.
  40. Limonov MF, Rybin MV, Poddubny AN, Kivshar YS. Fano resonances in photonics. *Nature Photonics*, 2017, 11(9):543-554.
  41. Kuznetsov AI, Miroshnichenko AE, Brongersma ML, Kivshar YS, Luk'yanchuk B. Optically resonant dielectric nanostructures. *Science*, 2016, 354(6314). Article No. aag2472.
  42. Whitehead LA, Hardy WN. Split-ring resonator for use in magnetic resonance from 200-2000 MHz. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, 52:213-216.
  43. Aieta F, Kats MA, Genevet P, Capasso F. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation. *Science*, 2015, 347:1342-1345.
  44. Genevet Patrice, Capasso Federico, Aieta Francesco, Khorasaninejad Mohammadreza, Devlin Robert. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces. *Optica*, 2017, 4(1):139-152.
  45. Zhou J, Qian H, Chen CF, Zhao J, Li G, Wu Q, Luo H, Wen S, Liu Z. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface. *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(23):11137-11140.
  46. He S, Zhou J, Chen S, Shu W, Luo H, Wen S. Wavelength-independent optical fully differential operation based on the spin-orbit interaction of light. *APL Photonics*, 2020, 5(3). Article No. 036105.
  47. Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S. Photonic crystal slab Laplace operator for image differentiation. *Optica*, 2018, 5(3):251-256.
  48. Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S. Isotropic wavevector domain image filters by a photonic crystal slab device. *Journal of the Optical Society of America*, 2018, A35(10):1685-1691.
  49. Cordaro A, Kwon H, Sounas D, Koenderink AF, Alù A, Polman A. High-index dielectric metasurfaces performing mathematical operations. *Nano Letters*, 2019, 19(12):8418-8423.
  50. Zhou Y, Wu W, Chen R, Chen W, Chen R, Ma Y. Analog optical spatial differentiators based on dielectric metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4). Article No. 1901523.
  51. Kwon H, Cordaro A, Sounas D, Polman A, Alù A. Dual-polarization analog 2D image processing with nonlocal metasurfaces. *ACS Photonics*, 2020, 7(7):1799-1805.
  52. Zhou Y, Zheng H, Kravchenko II, Valentine J. Flat optics for image differentiation. *Nature Photonics*, 2020, 14(5):316-323.

**Потапов Александр Алексеевич**

*д.ф.-м.н.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.031

## Практические аспекты построения систем беспроводной подводной оптической связи для телекоммуникационных приложений

Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П.

Севастопольский государственный университет, <http://www.sevsu.ru/>

Севастополь 299053, Российская Федерация

E-mail: [sbirokov@ieee.org](mailto:sbirokov@ieee.org), [vygolovin@mail.sevsu.ru](mailto:vygolovin@mail.sevsu.ru), [earedkina@mail.sevsu.ru](mailto:earedkina@mail.sevsu.ru), [ivserdyuk@mail.sevsu.ru](mailto:ivserdyuk@mail.sevsu.ru), [ppovcharov@mail.sevsu.ru](mailto:ppovcharov@mail.sevsu.ru)

Поступила 18.09.2023, рецензирована 25.09.2023, принята 02.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** В статье представлен обзор принципов организации подводной беспроводной оптической связи. Рассмотрены базовые особенности построения оптических систем связи в видимом диапазоне с применением лазерных и светодиодных излучателей, различных видов модуляции. Представлен сравнительный обзор разработок подводных беспроводных оптических систем связи на расстояниях до ста метров и со скоростями передачи данных до десятков Гбит/с. Представлен сравнительный обзор разработок подводных оптических модемов. Показано, что дальнейшей перспективой их развития является комбинирование различных методов подводной беспроводной связи и применения технологии ММО.

**Ключевые слова:** подводная оптическая связь, оптическая связь в видимом диапазоне, оптический модем для подводной связи, подводная система связи

УДК 654.026

*Для цитирования:* Широков И.Б., Головин В.В., Редькина Е.А., Сердюк И.В., Овчаров П.П. Практические аспекты построения систем беспроводной подводной оптической связи для телекоммуникационных приложений. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):31-42. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.031.

## Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications

Igor B. Shirokov, Vladislav V. Golovin, Elena A. Redkina, Igor V. Serdyuk, Pavel P. Ovcharov

Sevastopol State University, <http://www.sevsu.ru/>

Sevastopol 299053, Russian Federation

E-mail: [sbirokov@ieee.org](mailto:sbirokov@ieee.org), [vygolovin@mail.sevsu.ru](mailto:vygolovin@mail.sevsu.ru), [earedkina@mail.sevsu.ru](mailto:earedkina@mail.sevsu.ru), [ivserdyuk@mail.sevsu.ru](mailto:ivserdyuk@mail.sevsu.ru), [ppovcharov@mail.sevsu.ru](mailto:ppovcharov@mail.sevsu.ru)

Received September 18, 2023, peer-reviewed September 25, 2023, accepted October 02, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** The overview of the principles of organizing underwater wireless optical communication is presented in the paper. The basic features of the optical communication system design with the usage of laser and LED emitters working in the visible range, as well as using various types of modulation, are considered. A comparative review of the developments of underwater wireless optical communication systems, operating at distances up to one hundred meters and with data transfer rates up to tens of Gbit/s, is presented. In addition, a comparative review of design of underwater optical modems is considered. It is shown, that the further prospect of their development is the combination of various methods of underwater wireless communication, including the use of MIMO technology.



**Keywords:** underwater optical communication, optical communication in the visible range, optical modem for underwater communication, underwater communication system

**UDC 654.026**

*For citation:* Igor B. Shirokov, Vladislav V. Golovin, Elena A. Redkina, Igor V. Serdyuk, Pavel P. Ovcharov. Practical aspects of design of the wireless underwater optical communication system for telecommunication applications. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):31-42e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.031.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (32)
2. ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПОДВОДНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (33)
3. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ VLC СИСТЕМ (35)
4. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ (37)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (38)

## ЛИТЕРАТУРА (38)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современных телекоммуникационных системах для организации беспроводной подводной связи применяют следующие несколько подходов.

*Акустическая подводная связь (UAWC)*, которая считается самым популярным методом подводной беспроводной связи, так как затухание под водой акустических волн составляет 0.1-4 дБ/км. К недостаткам относятся низкая скорость распространения акустических волн (1500 м/с) и ограниченная полоса пропускания UAWC (кГц), что приводит к явлению многолучевости, большой временной задержке и громоздким акустическим антеннам [1]. Например, в [2] рассматривается система UAWC со скоростью передачи данных 60 Кбит/с, использующая 32 QAM, которая может поддерживать связь на глубине 100 м и на расстоянии 3 км по горизонтали. Чтобы достичь больших скоростей передачи данных без необходимости сложных вычислений, многие исследователи широко использовали мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM) в подводной акустической связи [3].

*Подводная радиосвязь (URWC)* позволяет организовать высокоскоростную передачу данных на небольших расстояниях. На электромагнитные волны влияют температура, соленость и глубина, что приводит к сильному ослаблению электромагнитных волн и

ограничивает дальность распространения сигнала в воде. Благодаря высокой электропроводности воды на СВЧ трудно реализовать URWC на трассах протяженностью более 10 м [4] в диапазонах метровых и более коротких волн (в диапазоне 2.4 ГГц затухания радиоволн в соленой воде составляют около 169 дБ/м), при этом требуется большая мощность передатчиков (более 100 Вт) [5]. В диапазонах ДВ (30-300 КГц) и СДВ (3-30 КГц) ослабление электромагнитной волны может рассматриваться как достаточно низкое, чтобы обеспечить надежную связь на расстоянии многих километров. URWC диапазона ДВ применяются в подводных военных системах или при создании линий связи между наземными и подводными объектами [6]. К основным недостаткам таких систем относятся сложные требования к конструкции очень больших антенн и низкие скорости передачи данных.

*Подводная связь с помощью магнитной индукции (UWMIС)*, как многообещающая замена традиционных акустических систем и радиосвязи привлекла значительное внимание [7]. Это объясняется присущими ей качественной амплитудно-частотной характеристикой канала, малой задержкой распространения и относительно небольшим потреблением энергии [8]. Предполагает переход от традиционных однонаправленных антенн к разнонаправленным MI-антеннам. Существует также большой исследовательский интерес к имеющимся в настоящее время подходам к расширению или повторному использованию доступных полос частот для увеличения пропускной способности подводного канала MI [7].

*Подводная оптическая связь (UOWC)* основана на использовании видимого участка оптического спектра. UOWC характеризуется большой доступной полосой



пропускания, что позволяет реализовать высокие скорости передачи данных, обладает преимуществами низкого энергопотребления, низкой стоимости и компактных размеров. Сложная подводная среда оказывает серьезное влияние на распространение света под водой. Поглощение, рассеяние и турбулентность являются доминирующими вредными эффектами, которые ухудшают характеристики оптической передачи при низких температурах. Подводная передача оптических волн в полосе 450-500 нм (синий и зеленый) имеет наименьшее затухание для чистой морской воды или прозрачного океана (0.4 дБ/м) по сравнению с другими полосами, в этой полосе ограничен эффект ослабления, вызванный взаимодействием фотонов с молекулами воды и другими частицами. Полоса 520-570 нм (желто-зеленая) подходит для прибрежных океанских или мутных портовых вод (11 дБ/м).

В подводной среде такие вещества, как хлорофилл, поглощают синий и красный свет. Эти и другие окрашенные растворенные органические вещества (CDOM) усиливают мутность воды и уменьшают расстояние распространения света. Концентрация CDOM изменяется в зависимости от глубины водной среды, тем самым изменяются соответствующие коэффициенты ослабления света. Суммарное поглощение в морской воде может быть определено с учетом комплекса факторов по формуле [9]

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_f c_f \exp(-k_f \lambda) + a_h c_h \exp(-k_h \lambda) + a_c (c_c)^{0.622},$$

где  $a_w(\lambda)$  – коэффициент поглощения в чистой воде;  $a_f$  – частные коэффициенты поглощения

фульвовых кислот;  $c_f$  – концентрация фульвовых кислот;  $k_f$  – экспоненциальный коэффициент фульвовых кислот;  $a_h$  – коэффициент поглощения гумусовой кислоты;  $c_h$  – концентрация гумусовой кислоты;  $k_h$  – экспоненциальный коэффициент гумусовой кислоты;  $a_c$  – коэффициент поглощения хлорофилла;  $c_c$  – концентрация хлорофилла.

Из-за сложности водной среды внедрение систем UOWC требует надежных подводных устройств. На производительность и срок службы устройств UOWC в значительной степени оказывают влияние течение, температурное давление и соленость морской воды, а энергопотребление передатчика системы с учетом емкости аккумуляторов определяет время автономной работы.

Основным недостатком оптической связи является то, что дальность действия ограничена дистанцией около 1-100 метров. Это ограничение определяется параметрами воды и взвешенными частицами в воде, где свет либо ослабляется, либо рассеивается. Другим недостатком является то, что оптическая связь обычно требует прямой видимости от передатчика к приемнику.

На **Рис. 1** показано обобщенное сравнение доступных технологий беспроводной подводной связи [10].

Поэтому большой практический интерес представляет обобщение результатов разработок UOWC для систем связи и передачи информации.

## 2. ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ПОДВОДНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На практике для организации беспроводной подводной оптической связи широкое

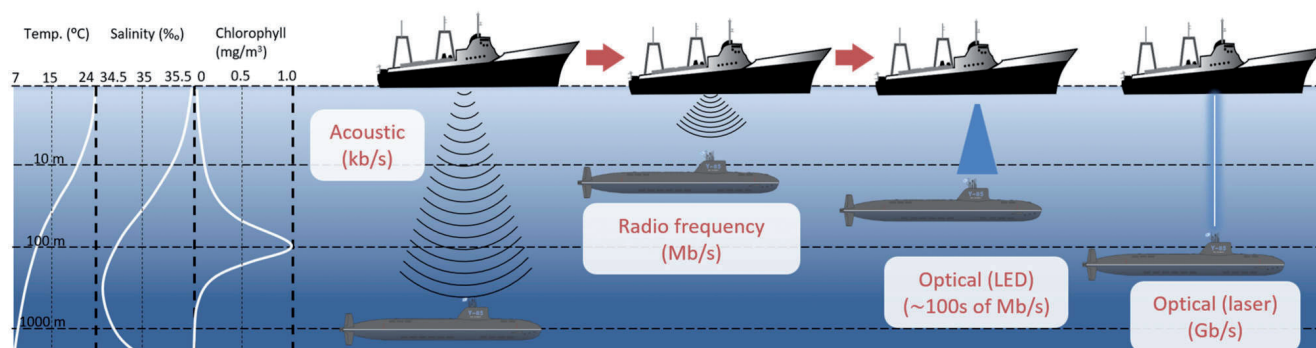


Рис. 1. Сравнение доступных технологий беспроводной подводной связи.

применение находит технология "оптической связи в видимом диапазоне" (VLC), как наиболее перспективная. В связи с быстрым развитием светодиодного освещения стоимость компонентов снижается; однако ниже перечислены некоторые из проблем, которые необходимо решить:

- интеграция системы VLC с существующими стандартами связи;
- проблема с помехами от источника окружающего света;
- VLC должен корректно поддерживать передачу обслуживания в зонах покрытия (handover);
- применение методов исправления ошибок для повышения производительности системы связи.

По мере увеличения числа устройств VLC будут возникать помехи между различными устройствами VLC. Ассоциация индустрии электронных информационных технологий разработала стандарт 802.15.7, который является стандартом, установленным IEEE для физического уровня и уровня MAC [11]. Целями настоящего стандарта являются:

- обеспечение доступа к сотням терагерцевых диапазонов частот;
- обеспечение защиты от электромагнитных помех;
- предоставление дополнительных услуг, дополняющих существующее оборудование видимого света;
- VLC-связь, которая предписывает схему прямой коррекции ошибок (FEC), форму модуляции и скорость передачи данных;
- механизм доступа к каналу, поскольку поддержка дальности видимости также описывает доступ к каналу, а также период времени, когда разрешена конкуренция за сетевую среду (contention access period, CAP) и период времени, свободный от конкуренции (CFP);
- технические характеристики физического уровня: оптическая проекция, время цикла TX-RX, RX-TX, мерцание и уменьшение яркости.

Тремя различными типами устройств, используемых VLC, являются подвижные объекты, мобильное оборудование и

инфраструктура [12]. VLC применяются внутри помещений [13,14], в системах идентификации и определения местоположения [15], в системах связи в транспорте [16] и для организации беспроводных каналов подводной связи [17].

VLC система в основном состоит из двух компонентов: оптического передатчика (Tx) и оптического приемника (Rx). После предварительной обработки и кодирования поток двоичных битов напрямую моделирует излучение источника света. Для увеличения скорости передачи и эффективности спектра используются методы кодирующей модуляции высокого порядка.

Реализация протяженных и высокоскоростных подводных трасс с применением в качестве источника оптического излучения лазерных диодов (LD) рассматривалась в ряде работ [18,19]. Однако вследствие узкой диаграммы направленности LD в подводной среде возникают проблемы с позиционированием приемного и передающего тракта. При этом применяется дополнительное расширение луча или другие решения для сохранения требуемых технических характеристик UOWC.

Поэтому наиболее распространенным вариантом источников излучения в структуре UOWC являются светоизлучающие диоды (LED) [20], которые обеспечивают множество преимуществ: безопасность для глаз, длительный срок службы, низкое энергопотребление, возможность одновременного освещения и связи. Так как LED характеризуются широкой диаграммой направленности, то решают проблему позиционирования, что позволяет использовать более простые и компактные системы UOWC. Большие углы расхождения и относительно малая частотная полоса модуляции LED ограничивает их применение по дальности и скорости передачи данных: например, для связи между подводными аппаратами и узлами подводных беспроводных сенсорных сетей и т.п.

Сравнение характеристик LD и LED, используемых в VLC, представлено в **Таблице 1**.

Таблица 1

Сравнение характеристик LD и LED, используемых в VLC

Источник света	Поперечные размеры, мм <sup>2</sup>	Полоса модуляции	Мощность, Вт
LED	0.1-1	~ 10 МГц	> 1
LD	< 0.2	10-20 ГГц	> 1

Для повышения эффективности использования полосы модуляции LED принято исследовать методы цифровой компрессии спектра сигнала, например за счет квадратурной амплитудной модуляции (QAM) и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) [21]. Также применяются следующие виды модуляции:

– многоуровневая амплитудно-импульсная модуляция (PAM), которая отличается более простой структурой, более гибкой реализацией и меньшей вычислительной сложностью [22];

– амплитудная манипуляция без возвращения к нулю (NRZ-OOK) – наиболее интуитивно понятная и простая схема модуляции, подходящей для световой связи;

– фазово-импульсная модуляция (PPM);

– частотная манипуляция (FSK);

– цифровая интервальная модуляция импульсов (digital pulse interval modulation, DPIM) – это метод изохронной импульсно-временной модуляции, при котором данные кодируются в виде ряда дискретных временных интервалов, или интервалов времени между соседними импульсами. Длина символа является переменной и определяется информационным содержанием символа. Чтобы избежать символов, в которых время между соседними импульсами равно нулю, к каждому символу, непосредственно следующему за импульсом, может быть добавлен дополнительный защитный интервал.

При модификации модуляций применяется дискретная многотоновая передача (Discrete multitone transmission, DMT) [23].

Ключевым элементом приемного тракта VLC системы является фотодетектор, преобразующий энергию принятого оптического излучения в фототок. В приемниках VLC используются различные типы фотодиодов:

– полупроводниковый pin-фотодиод (PIN PD): быстродействующие контактные фотодиоды обладают быстрым временем реакции, низкой стоимостью, единичным коэффициентом усиления и высокой устойчивостью к окружающему свету; основной тип шума – тепловой;

– лавинный фотодиод (APD): обладает высоким собственным коэффициентом усиления по току и высокой квантовой эффективностью (70-90%); основной тип шума – дробовый; требует высокого напряжения смещения, сложных схем управления; квантовая эффективность APD зависит от толщины материала, например, в диапазоне 400-500 нм кремний обладает очень низкой чувствительностью, поэтому контактный фотодиод представляется более перспективной технологией на более коротких длинах волн, чем APD для системы UOWC [12];

– фотоумножитель (PMT) – это тип вакуумной лампы, которая очень чувствительна к свету, обладает большим усилением фототока, низким уровнем шума, высокочастотной характеристикой и большими габаритными размерами по сравнению с фотодиодами; требуют высокого напряжения питания (порядка 100 В) и имеют высокую стоимость, также имеют хрупкую конструкцию.

Основные требования, предъявляемые к фотоприемникам в системе VLC:

- высокая квантовая эффективность; при определенной падающей оптической мощности выходной фототок может быть настолько большим, насколько это возможно;
- достаточно высокая скорость отклика для использования в высокоскоростной широкополосной системе;
- уровень шума должен быть как можно ниже;
- низкий уровень нелинейных искажений;
- небольшой размер и длительный срок службы.

### 3. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ VLC СИСТЕМ

Проведем сравнительный анализ характеристик различных вариантов построения VLC систем, предназначенных для организации UOWC.

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован



Таблица 2

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе лазерных диодов

Источник	Фото-детектор	Модуляция	Дистанция, м	Скорость передачи данных, Гбит/с	Ссылка
Лазерный диод (LD)	Лавинный фотодиод	NRZ-OOK	7	2.3	[24]
		PSK/QAM	64	5	[25]
			8	1	
		QAM-OFDM	5.4	4.8	[26]
		OAM-OOK	2.96	3	[27]
		OOK	20	1.5	[28]
		OFDM	1.7	14.8	[29]
		NRZ-OOK	34.5	2.7	[30]
	OFDM	21	5.5	[31]	
	NRZ-OOK	34.5	2.7	[32]	
PIN-фотодиод	16-QAM	3	0.05	[33]	
	OOK	1.6	0.1	[34]	

на основе лазерных диодов, показано в Таблице 2.

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе светоизлучающих диодов, показано в Таблице 3.

Анализ последних публикаций показывает, что сегодня все чаще при построении передающих модулей UOWC применяют решетки LED [50]. Светодиодные решетки с увеличенной оптической мощностью могут обеспечить достаточно большую дальность передачи данных под водой. Кроме того, светодиодные решетки с относительно большим световым пятном в плоскости приема позволяют уменьшать влияние турбулентностей и неоднородностей в канале UOWC.

Характерный пример структурной схемы приемно-передающего модуля VLC системы UOWC [50] показан на Рис. 2.

В зависимости от количества LED в решетке, их соединяют последовательно, параллельно или комбинированным способом. В последовательной линейке обычно включают не более 10 LED.

Сегодня для повышения надежности систем UOWC все более широко применяется технология multiple-input multiple-output (MIMO) [51]. Системные характеристики беспроводной оптической связи MIMO с

Таблица 3

Сравнение характеристик VLC систем, передающий тракт которых реализован на основе светоизлучающих диодов

Тип передатчика	Тип приемника	Модуляция	Дистанция, м	Скорость передачи данных, Гбит/с	Ссылка
521 нм LED	2 PIN PD	64-QAM-DMT	1.2	2,175 Гбит/с	[35]
470 нм LEDarray	PMT	OOK	8	19 Гбит/с	[36]
RGBYC LED	PIN PD	64QAM-DMT bit-loading-DMT	1.2	14.81-15.17 Гбит/с	[37]
Blue LED	PIN PD	64 QAM DMT	1.2	3.075 Гбит/с	[38]
Blue LED	MPPC	PPM	46	~ МГц	[39]
458 нм LED	PIN PD array (2x2)	32 QAM DMT	1.2	20.09 Гбит/с	[40]
LED (4x4) array	PIN PD	P S - b i t loading DMT	1.2	20.09 Гбит/с	[41]
450 нм LED	PIN PD	16 Q A M OFDM	3	50 Мбит/с	[42]
450 нм LED array	APD	Видеотрансляция	10	1 Мбит/с	[43]
450 нм LED	APD	PAM4	5	1.25 Гбит/с	[44]
450 нм LED	APD	GS-8QAM OFDM	3.6	2,2 Гбит/с	[45]
448 нм LED	APD	OOK	118	25 Мбит/с	[46]
480 нм LED	APD	DPIM	30	1,2 Мбит/с	[47]
470 нм LED	APD	DPIM	50	2,28 Мбит/с	[48]
Blue LED	APD	NRZ-OOK	11.5	235 Мбит/с	[49]
445 нм LED	APD	2FSK	14.5	1 Мбит/с	[50]

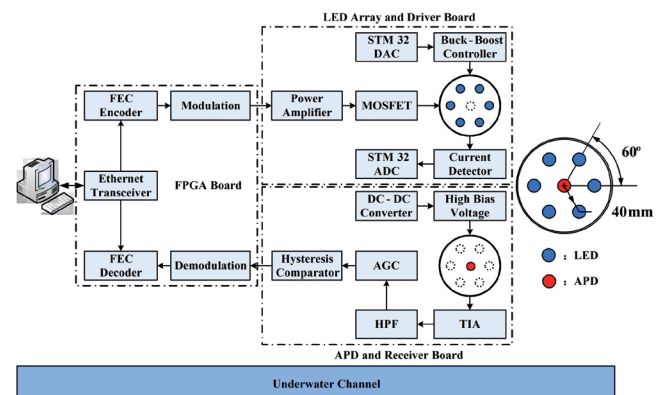


Рис. 2. Структурная схема приемно-передающего модуля VLC системы UOWC.

использованием пространственной модуляции (SM-OMIMO) в OWC свободного пространства [52] и беспроводной среде внутри помещений [53] уже были изучены. Было показано, что SM достигает улучшенной спектральной эффективности и более устойчива к высокой корреляции каналов по сравнению с обычным MIMO, использующим код с повторениями [51]. Кроме того, SM обладает преимуществом реализации, поскольку для него требуется только алгоритм обнаружения низкой сложности [54].

Однако для UOWC все еще не ясно, в какой степени методы SM-OMIMO могут обеспечить выигрыш, это связано с тем, что затухание канала будет более серьезным в подводной среде.

Используя типовой алгоритм распределения равной мощности (РАА) [55], приемники могут только определять интенсивность сигналов, но не могут определить положение активированного передатчика. Чтобы свести на нет ограничения, связанные с высокими корреляциями каналов, недавно была введена технология дисбаланса мощности (PI) на передатчиках. В [56] предложено оптимальное распределение мощности для пространственно модулированной системы VLC с OFDM для случая простой структуры MIMO с двумя передатчиками. В [57] получены выражения для коэффициента распределения мощности для четырех передатчиков. В большинстве последних литературных источников, относящихся к системе SM, используется простая схема амплитудно-импульсной модуляции, включающая ООК [55] и амплитудно-импульсную модуляцию (PAM) [57]. В [58] рассмотрена UOWC MIMO, использующая пространственную модуляцию (SM-UOMIMO) и флаговую двухамплитудную импульсную позиционную модуляцию (FDAPM) [59].

#### 4. ОБЗОР РАЗРАБОТОК ПОДВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ

Практическое воплощение различных подходов построения приемо-передающего оборудования UOWC с учетом существующих

протоколов передачи данных представлено на рынке подводных оптических модемов. Сравнительные характеристики разработок подводных оптических модемов представлены в **Таблице 4**.

Перспектива развития модемов подводной связи связана с комбинированием двух или более различных методов подводной связи. Этот подход часто используется для океанской швартовки с датчиками на якорном тресе и беспроводной сотовой связью. Гибридные системы могут использовать преимущества каждого метода и, следовательно, повышать надежность системы. Сегодня одной из наиболее важных задач, стоящих перед гибридными системами, является адаптивный и плавный переход от одной среды связи к другой, что делает систему более сложной и требует протоколы и алгоритмы для понимания окружающей среды в гибридной системе [71]. Многие подводные транспортные средства использовали гибридные системы связи, которые включали как акустические, так и оптические системы [72]. Выбирая соответствующие каналы связи в ответ на изменяющуюся транспортную нагрузку и погодные условия, в [73] представлена гибридная оптико-акустическая подводная система беспроводной связи, которая

**Таблица 4**  
Сравнительные характеристики разработок  
подводных оптических модемов

Организация	Источник света	Скорость передачи данных	Дистанция, м	Ссылка
WHOI (2005)	LEDs	10 Мбит/с	100	[60]
Laurentian Univ. (2009)	LED	1 Гбит/с	20	[61]
MIT (2010)	LEDs	2.28 Гбит/с	50	[62]
Maritime Technology and Research (2017)	LD	100 Мбит/с	2	[63]
Dalian Univ. Of Technology (2018)	LD	100 Мбит/с	4.8	[64]
Tsinghua Univ. (2018)	LED	235 Мбит/с	11.5	[49]
MIT Lincoln Lab. (2019)	LED	1 Гбит/с	20	[65]
Sonardyne (2019)	LEDs	10 Мбит/с	150	[66]
Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications (2020)	LEDs	1 Мбит/с	10	[67]
KAUST (2020)	LD	1.2 Мбит/с	2	[68]
KAUST (2021)	LED	1.5 Мбит/с	0.6	[69]
KAUST (2022)	LED	2.5 Мбит/с	5	[70]

минимизирует энергопотребление сети и обеспечивает высокую скорость передачи данных в подводных приложениях. По сравнению с обычными оптико-акустическими методами предлагаемый подход позволяет экономить до 35% электроэнергии.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для организации подводных беспроводных телекоммуникационных систем широко применяются оптические технологии VLC, которые предоставляют уникальные возможности высокоскоростной связи, в том числе для организации работы перспективных подводных сетей Интернета вещей. Развитая компонентная оптическая база (лазеры, светодиоды и различные типы фотодиодов) хорошо адаптирована для решения задач построения UOWC с применением VLC технологий и позволяет найти наиболее эффективные комбинации для реализации различных технических задач. Разнообразные виды цифровой модуляции, помехозащищенное кодирование и технологии MIMO позволяют значительно повысить эффективность использования полосы частот каналов связи, надежность передачи данных на больших расстояниях при различных состояниях канала связи по прозрачности, неоднородности, содержанию различных органических веществ и т.п. Современные UOWC позволяют получить скорости передачи данных от единиц Мбит/с до десятков Гбит/с на расстояниях от нескольких до сотен метров. Многочисленные исследования в области разработки VLC для различных UOWC определили производство и активное совершенствование подводных оптических модемов со скоростями передачи данных от 1 Мбит/с до 2 Гбит/с на расстояниях до 150 м. Дальнейшее развитие подводных модемов связано с комбинированным применением различных методов подводной связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zeng Z, Fu S, Zhang H, Dong Y, Cheng J. A survey of underwater optical wireless communications. *IEEE Commun. Surv. and Tutorials*, 2017, 19(1):204-238.
2. Song HC, Hodgkiss WS. Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication. *Acoust. Soc. Am.*, 2013, 134: 905-908. DOI: 10.1121/1.4812762.
3. Frassati F, Lafon C, Laurent P-A, Passerieux J-M. Experimental assessment of OFDM and DSSS modulations for use in littoral waters underwater acoustic communications. *Proc. Europe Oceans Conference*, 2005: 826-831. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1513163.
4. Gussen CM, Diniz PSR, Campos MLR, Martins WA, Costa FM, Gois JN, Commun J. A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies. *Inf. Sys.*, 2016, 31:242-255. DOI: 10.14209/jcis.2016.22.
5. Al-Shamma'a AI, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater. *IEEE T. Antennas Propag.*, 2004, 52:2843-2849. DOI: 10.1109/TAP.2004.834449.
6. Clam L. Extremely Low Frequency Transmitter Site Clam Lake. The United State Navy. *Navy fact file. Tech. Rep.*, Wisconsin, 2001. [Online] Available: [https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs\\_clam\\_lake\\_elf2003.pdf](https://nuke.fas.org/guide/usa/c3i/fs_clam_lake_elf2003.pdf), access data 09.08.2023.
7. Li Y, Wang S, Jin C, Zhang Y, Jiang T. A Survey of Underwater Magnetic Induction Communications: Fundamental Issues, Recent Advances, and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2019, 21:2466-2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
8. Arunkumar K, Murthy CR. Soft Symbol Decoding in Sweep-Spread-Carrier Underwater Acoustic Communications: A Novel Variational Bayesian Algorithm and Its Analysis. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2020, 68:2435-2448. DOI: 10.1109/TSP.2020.2983830.
9. Shherbakov AV, Petruhin GD, Miroshnikova NE, Titovets PA. Estimation of underwater optical communication link operating distance. *Communications*, 2020, 14(3):53-60. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-54-60.
10. Guo Y, Kong M, Alkhazragi O, Sait MA, Kang CH, Ashry I, Yang Q, Ng TK, Ooi BS. Current Trend in Optical Internet of Underwater Things. *IEEE Photonics J.*, 2022, 14(5):1-14. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3195700.
11. IEEE Approved Draft Standard for Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible



- Light. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6016193>, access data 09.08.2023.
12. Dimitrakopoulos G, Demestichas P. Intelligent transportation systems. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2010, 5:77-84.
  13. Vuc'ic J, Kottke C, Nerreter S, Langer K-D, Walewski JW. 513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED. *J. Lightwave Technol.*, 2010, 28:3512-3518.
  14. Chang C-H, Li C-Y, Lu H-H, Lin C-Y, Chen J-H, Wan Z-W, Cheng C-J. A 100-Gb/s Multiple-Input Multiple-Output Visible Laser Light Communication System. *J. Lightwave Technol.*, 2014, 32:4121-4127.
  15. Do T-H, Yoo M. An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems. *Sensors*, 2016, 16(5):40. DOI: 10.3390/s16050678.
  16. Căilean A, Dimian M. Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2017, 19:2681-2703.
  17. Kaushal H, Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 2016, 4:1518-1547.
  18. Al-Halafi A, Oubei HM, Ooi BS, Shihada B. Real-time video transmission over different underwater wireless optical channels using a directly modulated 520 nm laser diode. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2017, 9(10):826-832.
  19. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu ZJ, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Express*, 2017, 25(22):27937-27947.
  20. Xu J, Kong M, Lin A, Song Y, Yu X, Qu F, Han J, Deng N. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED. *Opt. Commun.*, 2016, 369:100-105.
  21. Xu J, Song Y, Yu X, Lin A, Kong M, Han J, Deng N. Underwater wireless transmission of high-speed QAM-OFDM signals using a compact red-light laser. *Opt. Exp.*, 2016, 24(8):8097-8109.
  22. Szczerba K, Westbergh P, Karout J, Gustavsson J, Haglund Å, Karlsson M, Andrekson P, Agrell E, Larsson A. 30 Gbps 4-PAM transmission over 200 m of MMF using an 850 nm VCSEL. *Opt. Exp.*, 2011, 19(26):B203-B208.
  23. Hoehner PA. *Visible Light Communications. Theoretical and Practical Foundations*. Munich, Hanser Publishers, 2019: 95-100.
  24. Oubei HM, Li C, Park KH, Ng TK, Alouini MS, Ooi BS. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode. *Opt. Exp.*, 2015, 23(16):20743-20748.
  25. Nakamura K, Mizukoshi I, Hanawa M. Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel. *Opt. Exp.*, 2015, 23(2):1558-1566.
  26. Oubei et al. HM. 4.8Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication. *Opt. Exp.*, 2015, 23(18):23302-23309.
  27. Baghdady J, Miller K, Morgan K, Byrd M, Osler S, Ragusa R, Li W, Cochenour BM, Johnson EG. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing. *Opt. Exp.*, 2016, 24(9):9794.
  28. Shen C, Guo Y, Oubei HM, Ng TK, Liu G, Park K-H, Ho K-T, Alouini M-S, Ooi BS. 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate. *Opt. Exp.*, 2016, 24(22):25502.
  29. Huang Y-F, Tsai C-T, Chi Y-C, Huang D-W, Lin G-R. Filtered Multicarrier OFDM Encoding on Blue Laser Diode for 14.8-Gbps Seawater Transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9):1739-1745.
  30. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu Z-J, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Exp.*, 2017, 25:27937-27947.
  31. Chen Y, Kong M, Ali T, Wang J, Sarwar R, Han J, Guo C, Sun B, Deng N, Xu J. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode. *Opt. Exp.*, 2017, 25:14760-14765.
  32. Liu X, Yi S, Zhou X, Fang Z, Qiu ZJ, Hu L, Cong C, Zheng L, Liu R, Tian P. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70

- Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation. *Opt. Exp.*, 2017, 25(22):27937-27947.
33. Wang J, Tian C, Yang X, Shi W, Niu Q, Gulliver TA. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA. *Applied Opt.*, 2019, 58(16):4553-4559.
34. Li Y, Yin H, Ji X., Wu B. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light. *Proc. Int. Conf. Commun. Softw. Netw.*, 2018, Chengdu, China: 99-103.
35. Wang F, Liu Y, Jiang F, Chi N. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception. *Opt. Commun.*, 2018, 425:106-112. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.04.073.
36. Han B, Zhao W, Zheng Y, Meng J, Wang T, Han Y, Wang W, Su Y, Duan T, Xie X. Experimental demonstration of quasi-omni-directional transmitter for underwater wireless optical communication based on blue LED array and freeform lens. *Opt. Commun.*, 2019, 434:184-190.
37. Zhou Y, Zhu X, Hu F, Shi J, Wang F, Zou P, Liu J, Jiang F, Chi N. Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication. *Photon. Res.*, 2019, 7(9):1019-1029. DOI: 10.1364/PRJ.7.001019.
38. Wang F, Liu Y, Shi M, Chen H, Chi N. 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points. *Opt. Eng.*, 2019, 58:056117. DOI: 10.1117/1.OE.58.5.056117.
39. Shen J, Wang J, Yu C, Chen X, Wu J, Zhao M, Qu F, Xu Z, Han J, Xu J. Single LED-based 46-m underwater wireless optical communication enabled by a multi-pixel photon counter with digital output. *Opt. Commun.*, 2019, 438:78-82. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.01.031.
40. Li J, Wang F, Zhao M, Jiang F, Chi N. Large-coverage underwater visible light communication system based on blue LED employing equal gain combining with integrated PIN array reception. *Appl. Opt.*, 2019, 58:383-388. DOI: 10.1364/AO.58.000383.
41. Hu F, Li G, Zou P, Hu J, Chen S, Liu Q, Zhang J, Jiang F, Wang S, Chi N. 20.09-Gbit/s Underwater WDM-VLC Transmission based on a single Si/GaAs-substrate Multichromatic LED array chip. *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 2020, San Diego, California.
42. Wang J, Tian C, Yang X, Shi W, Niu Q, Gulliver AT. Underwater wireless optical communication system using a 16-QAM modulated 450-nm laser diode based on an FPGA. *Appl. Opt.*, 2019, 58(16):4553-4559. DOI: 10.1364/AO.58.004553.
43. Sait M, Guo Y, Alkhazragi O, Kong M, Ng TK, Ooi BS. The impact of vertical salinity gradient on non-line-of-sight underwater optical wireless communication. *IEEE Photon. J.*, 2021, 13(6), Art. no. 7300609. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3121169.
44. Di Y, Shao Y, Chen L-K. Real-time wave mitigation for water-air OWC systems via beam tracking. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2022, 34(1):47-50.
45. Shao Y, Deng R, He J, Wu K, Chen L-K. Real-time 2.2-Gb/s water-air OFDM-OWC system with low-complexity transmitter-side DSP. *J. Lightw. Technol.*, 2020, 38(20):5668-5675.
46. Wang P, Li C, Xu Z. A cost-efficient real-time 25Mb/s system for LED-UOWC: Design, Channel Coding, FPGA implementation, and Characterization. *J. Lightw. Technol.*, 2018, 36(13):2627-26378.
47. Doniec M, Detweiler C, Vasilescu I, Chitre M, Hoffmann-Kuhnt M, Rus D. AquaOptical: a lightweight device for high-rate long-range under-water point-to-point communication. *Proc. OCEANS*, 2009, USA, Biloxi, MS:1-6.
48. Doniec MW, Rus D. Bidirectional optical communication with AquaOptical II. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst. (ICCS)*, 2010, Singapore, pp. 390-394.
49. Wei Z, Mu X, Fu H. Wearable full-duplex digital transceiver for underwater optical wireless communications. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2018, China, Hong Kong, 2018. DOI: 10.1364/CLEOPR.2018.W3A.153.
50. Li J, Yang B, Ye D, Wang L, Fu K, Piao J, Wang Y. A Real-time, Full-duplex System for Underwater Wireless Optical Communication: Hardware Structure and Optical Link Model. *IEEE Access*, 2017, 8:17.

51. Song Y, Lu W, Sun B, Hong Y, Qu F, Han J, Zhang W, Xu J. Experimental demonstration of MIMO-OFDM underwater wireless optical communication. *Opt. Commun.*, 2017, 403:205-210.
52. Renzo MD, Haas H, Ghayeb A, Sugiura S, Hanzo L. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation. *Proc. IEEE*, 2013, 102(1):56-103.
53. Popoola WO, Poves E, Haas H. Error performance of generalized space shift keying for indoor visible light communications. *Trans. Commun.*, 2013, 61(5):1968-1976.
54. Popoola WO. Merits and limitations of spatial modulation for optical wireless communications. *Proc. 2nd Int. Workshop Opt. Wireless Commun.*, 2014, pp. 152-156.
55. Dong Y, Liu J. On BER performance of underwater wireless optical MISO links under weak turbulence. *Proc. Oceans 2016-Shanghai*, 2016, pp. 1-4.
56. Zhang X, Dimitrov S, Sinanovic S, Haas H. Optimal power allocation in spatial modulation OFDM for visible light communications. *Proc. IEEE 75th Veh. Technol. Conf.*, 2012, pp. 1-5.
57. Fath T, Haas H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments. *IEEE Trans. Commun.*, 2013, 61(2):733-742.
58. Huang A, Tao L, Niu Y. Underwater wireless optical MIMO system with spatial modulation and adaptive power allocation. *Opt. Commun.*, 2018, 412:21-27.
59. Huang A, Fan Y. Flag dual amplitude pulse position modulation for atmospheric FSO communication. *Proc. ICSPCS*, 2013, pp. 1-5.
60. Farr N, Chave AD, Freitag L, Preisig J, White SN, Yoerger D, Sonnichsen F. Optical modem technology for seafloor observatories. *Proc. OCEANS MTS/IEEE*, 2005, pp. 928-934.
61. Baiden G, Bissiri Y, Masoti A. Paving the way for a future underwater omni-directional wireless optical communication systems. *Ocean Eng.*, 2009, 36(9):633-640.
62. Doniec M, Rus D. BiDirectional optical communication with AquaOptical II. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst.*, 2010, pp. 390-394. DOI: 10.1109/ICCS.2010.5686513.
63. Scholz T. Laser based underwater communication experiments in the baltic sea. *Proc. 4th Underwater Commun. Netw. Conf.*, 2018, pp. 1-3. DOI: 10.1109/UComms.2018.8493174.
64. Li Y, Yin H, Ji X, Wu B. Design and implementation of underwater wireless optical communication system with high-speed and full-duplex using blue/green light. *Proc. 10th Int. Conf. Commun. Softw. Netw.*, 2018, pp. 99-103. DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488232.
65. Hardy ND, Rao HG, Conrad SD, Howe TR, Scheinbart MS, Kaminsky RD, Hamilton SA. Demonstration of vehicle-to-vehicle optical pointing, acquisition, and tracking for undersea laser communications. *Proc. Free-Space Laser Communications XXXI (SPIE)*, 2019, v. 10910: 205-214. DOI: 10.1117/12.2511178.
66. BlueComm 200. *Underwater optical communications and data transfer modem* [Online]. Available: <https://www.sonardyne.com/products/bluecomm-200-wireless-underwater-link/>, access data 09.08.2023.
67. Li J, Yang B, Ye D, Wang L, Fu K, Piao J, Wang Y. Real-time, full-duplex system for underwater wireless optical communication: hardware structure and optical link model. *IEEE Access*, 2020, 8:109372–109387. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001213.
68. Kong M, Lin J, Guo Y, Sun X, Sait M, Alkhazragi O, Kang CH, Holguin-Lerma JA, Kheireddine M, Ouhssain M, Jones BH, Ng TK, Ooi BS. AquaE-lite hybrid-solar-cell receiver-modality for energy-autonomous terrestrial and underwater internet-of-things. *IEEE Photon. J.*, 2020, 12(4), Art. no. 7904713. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3013995.
69. Kong M, Guo Y, Sait M, Alkhazragi O, Kang CH, Ng TK, Ooi BS. Toward automatic subsea operations using real-time underwater optical wireless sensor networks. *IEEE Photon. J.*, 2021, 14(1), Art. no. 7308408. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3136922.
70. Kong M, Guo Y, Alkhazragi O, Sait M, Kang CH, Ng TK, Ooi BS. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring. *IEEE Photon. J.*, 2022, 14(2), Art. no. 7315609. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3147844.
71. Chowdhury MZ, Hasan MK, Shahjalal M, Hossain MT, Jang YM. Optical wireless hybrid



- networks: trends, opportunities, challenges, and research directions. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2020, 22:930-966. DOI: 10.1109/COMST.2020.2966855.
72. Dunbabin M, Corke P, Vasilescu I, Rus D. Data muling over underwater wireless sensor networks using an autonomous underwater vehicle. Proc. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006, pp, 2091-2098. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642013.
73. Islam KY, Ahmad I, Habibi D, Zahed MIA, Kamruzzaman J. Green Underwater Wireless Communications Using Hybrid Optical-Acoustic Technologies. *IEEE Access*, 2021, 9:85109-85123. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3088467.

**Широков Игорь Борисович**

*д.т.н., профессор*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: shirokov@ieee.org**

**Головин Владислав Викторович**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: VVGolovin@mail.sevsu.ru**

**Редькина Елена Александровна**

*к.т.н., доцент*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: EARedkina@email.sevsu.ru**

**Сердюк Игорь Владимирович**

*к.т.н.*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: IVSerdyuk@mail.sevsu.ru**

**Овчаров Павел Петрович**

*преподаватель*

Севастопольский государственный университет

**Севастополь 299053, Россия**

**E-mail: PPOvcharov@mail.sevsu.ru.**

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.043

## Исследование способа измерения артериального давления ёмкостным интегрированным датчиком

Мовчан А.К., Ломаков Е.В., Рогожников Е.В., Савенко К.В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, <https://tusur.ru/>  
Томск 634050, Российская Федерация

E-mail: [ltaak@tu.tusur.ru](mailto:ltaak@tu.tusur.ru), [evgenii.v.lomakov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.lomakov@tusur.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [kirill.savenko@tusur.ru](mailto:kirill.savenko@tusur.ru).

Поступила 19.10.2023, рецензирована 26.10.2023, принята 02.11.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Исследован способ беспроводного измерения параметров кровяного потока с помощью имплантируемого пассивного ёмкостного датчика и внешнего считывающего устройства. Данное устройство предназначено для измерения параметров кровяного потока в теле человека посредством установки пассивного ёмкостного датчика и индуктивной связи с внешним считывающим устройством. Способ беспроводного измерения основан на связи резонансных контуров на рабочей частоте 10 МГц. Представлен математический расчёт схемы устройства, результатом которого являлись зависимости выходного напряжения внешнего считывающего устройства от изменения ёмкости в имплантируемом пассивном датчике. Получены значения потенциальной чувствительности устройства. Представлен изготовленный макет устройства и его параметры. С помощью макета произведено исследование зависимости коэффициента связи контуров при использовании катушек внешнего считывающего устройства разных габаритов. Также произведено измерение выходного напряжения внешнего считывающего устройства от величины ёмкости пассивного датчика. Измерена величина реальной чувствительности макета устройства.

**Ключевые слова:** резонансный контур, пассивный датчик, кровяной поток, коэффициент связи, стент, ёмкостной датчик

УДК 621.31

*Для цитирования:* Мовчан А.К., Ломаков Е.В., Рогожников Е.В., Савенко К.В. Исследование способа измерения артериального давления ёмкостным интегрированным датчиком. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(1):43-52. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.043.

## Investigation a method for measuring blood pressure with a capacitive integrated sensor

Andrey K. Movchan, Eugeny V. Lomakov, Eugeny V. Rogozhnikov, Kirill V. Savenko

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, <https://tusur.ru/>

Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: [ltaak@tu.tusur.ru](mailto:ltaak@tu.tusur.ru), [evgenii.v.lomakov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.lomakov@tusur.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [kirill.savenko@tusur.ru](mailto:kirill.savenko@tusur.ru).

Received October 19, 2023, peer-reviewed October 26, 2023, accepted November 02, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** A method of wireless measurement of blood flow parameters is investigated using an implantable passive capacitive sensor and an external reader. This device is designed to measure the parameters of blood flow in the human body, through the installation of a passive capacitive sensor and inductive coupling with an external reader device. The method of wireless measurement is based on the connection of resonant circuits at an operating frequency of 10 MHz. The mathematical calculation of the device circuit is presented. The result of the calculation was the dependence of the output voltage of the external reader on the change of capacitance in the implanted passive sensor. The values of the potential sensitivity of the device are obtained. The manufactured layout of the device and its parameters are presented. The mock-up allowed to investigate the dependences

of the coupling factor of the circuits when using coils of an external reader of different sizes. Also the measurement of the output voltage of the external reader from the value of the passive sensor capacitance was made. The value of real sensitivity of the device layout was measured.

*Keywords:* resonant circuit, passive sensor, blood flow, coupling factor, stent, capacitive sensor

UDC 621.31

*For citation:* Andrey K. Movchan, Eugeny V. Lomakov, Eugeny V. Rogozhnikov, Kirill V. Savenko. Investigation a method for measuring blood pressure with a capacitive integrated sensor. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):43-52e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.043.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (44)
  2. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ (45)
  3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (46)
  4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ (49)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (51)
- ЛИТЕРАТУРА (52)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются ведущей формой смертности во всем мире, которые, возможно, затронут каждого третьего из нас. Атеросклероз – это прогрессирующая форма ССЗ, характеризующая незаметное развитие жировых бляшек, вызванных пролиферацией гладкомышечных клеток сосудов и притоком воспалительных клеток и белков [1]. Это приводит к сужению кровеносных сосудов и ограничению кровотока, что влечет за собой большинство сердечных приступов и инсультов. Несмотря на интенсивные исследования и многочисленные испытания лекарственных препаратов, проблема остается неразрешенной. Последствия сужения сосудов часто требует хирургического вмешательства, одним из которых является эндопротезирование аневризм артерий стент-графтом. Несмотря на успешное вскрытие сосудов и восстановление кровотока, может возникнуть рестеноз стента. Для ранней диагностики рестеноза и мониторинга кровотока в режиме реального времени стенты разрабатываются с интеграцией устройств, включающих различные датчики, а также систему беспроводной связи. Интегрируемые устройства могут подразделяться на активные и пассивные. Преимуществом активных устройств является высокий уровень функциональности, поскольку электронные схемы и устройства электропитания интегрированы вместе. Однако такие устройства имеют недостаток в встроенном устройстве

электропитания, которое имеет ограничение по сроку службы. Следовательно, такого рода устройства непригодны для имплантации в организм человека или в кровеносный сосуд. Также активные устройства могут иметь беспроводную связь, как описано в статье [2], но в данной работе описано моделирование с использованием оптимального источника тока, а также предполагается использование сложных схем, что повысит стоимость такого датчика. Пассивные же устройства не нуждаются в постоянном источнике питания, но имеют более низкую эффективность по сравнению с активными, а также имеют более низкую стоимость изготовления. Интегрируемое пассивное устройство, как правило, включает в себя конденсатор и катушку индуктивности, в роли которой может выступать обычная катушка индуктивности или артериальный стент [3].

Существуют различные варианты исполнения интегрируемых пассивных устройств. В одной из рассматриваемых статей описан вариант реализации, где внешний источник сигнала создает радиочастотное поле, которое воздействует на резонансный контур пассивного устройства. Пассивное устройство имеет резонансную частоту, обусловленную индуктивностью и ёмкостью. В процессе работы пассивного устройства в резонансном контуре формируются колебания на частоте внешнего источника. Затем внешнее устройство за счет индуктивной связи с пассивным датчиком получает параметр, связанный с колебаниями, для оценки характеристик потока жидкости через стент. Несмотря на объем данного исследования, рабочее расстояние датчика составляет несколько миллиметров, что недостаточно для работы датчика в теле человека [4].

Также в статьях [5,6] рассмотрены варианты исполнения встраиваемых антенн в пассивные



датчики, которые позволяют улучшить эффективность беспроводной передачи энергии и данных.

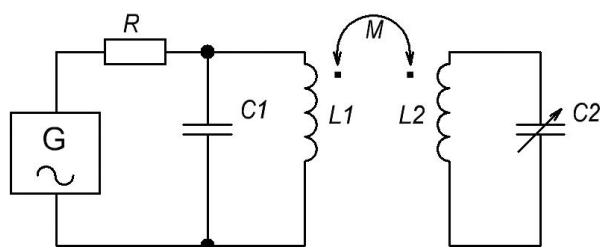
Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что активно ведутся разработки в области имплантируемых датчиков для мониторинга параметров кровяного потока. Было установлено, что методы раннего обнаружения рестеноза нуждаются в дальнейшем исследовании и развитии, включая интегрируемые датчики и внешние считывающие устройства.

В данной работе рассмотрена возможность реализации дистанционного измерения параметров кровяного потока за счет интегрируемого пассивного ёмкостного датчика, индуктивно связанного с внешним устройством считывания.

## 2. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ

Принцип измерения реализован следующим образом: внешнее устройство считывания и пассивный датчик представляют из себя первичный и вторичный резонансный контур, схематично представленный на **Рис. 1**. Первичный контур состоит из катушки индуктивности  $L_1$  и конденсатора  $C_1$ , образующие LC-колебательный контур. Также в схему включен генератор сигнала для формирования колебания с определенной частотой. Вторичный контур также включает в себя катушку индуктивности  $L_2$  и переменный конденсатор  $C_2$ , имитирующий ёмкостной датчик, образуя LC-колебательный контур.

Вторичный контур получает энергию от первичного контура за счет их индуктивной связи. При этом кровяной поток воздействует на ёмкостный датчик, тем самым воздействуя за счет индуктивной связи на параметры первичного контура.



**Рис. 1.** Упрощенная электрическая схема.

Резонансная частота пассивного устройства может быть выражена как его функция индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$ , как показано в уравнении (1):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

Величина индуктивности катушки пассивного устройства остается постоянной после изготовления, а ёмкость конденсатора изменяется при изменении параметров кровяного потока. Соответственно, резонансная частота пассивного устройства, согласно выражению (1), также будет зависеть от параметров кровяного потока. Дистанционное определение параметров внутреннего пассивного устройства реализуется за счет индуктивной связи внешнего и внутреннего устройств. В следствии чего, параметры интегрируемого датчика воздействуют на параметры считывающего устройства. Это позволяет на стороне внешнего устройства определить параметры кровяного потока.

Потери энергии при распространении радиочастотных сигналов могут зависеть от множества параметров, включая резонансные частоты двух катушек и их ориентацию. Потери энергии, связанные с распространением сигнала в биологической ткани, зависят от выбора частоты. Если толщина ткани между внешним и внутренним устройствами меньше одной десятой длины волны, то поглощение энергии пропорционально квадрату частоты сигнала. Поэтому рабочая частота сигнала не может быть слишком высокой. Другими словами, система с высокой резонансной частотой способна передавать большое количество энергии, но эта частота должна быть снижена из-за увеличения энергии, поглощаемой тканями организма. С другой стороны, высокие значения добротности трудно получить при низких резонансных частотах. Следовательно, резонансная частота должна быть выбрана в соответствии с факторами применения устройства. В данном исследовании рабочая частота была выбрана равной 10 МГц.

В беспроводных системах передачи энергии, где энергия передается с одной катушки на другую, важна высокая эффективность передачи энергии, за которую, в частности, отвечает высокая добротность, которая позволяет

колебательному контуру сохранять энергию на протяжении длительного времени. Высокая добротность позволяет уменьшить потери энергии и повысить эффективность передачи.

Добротность контура определяется отношением характеристического сопротивления  $\rho$  колебательного контура к внутреннему сопротивлению  $r$  этого контура:

$$Q = \frac{\rho}{r}. \quad (2)$$

Характеристическое сопротивление контура определяется формулой:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Внутреннее сопротивление внешнего контура выбрано  $r = 0.1$  Ом, а необходимая добротность не менее 500. Исходя из условия частоты колебаний контура, равной  $f = 10$  МГц, и формулы (4):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

параметры колебательного контура получаются равными  $L = 800$  нГн и  $C = 320$  пФ.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Идея бесконтактного пассивного датчика параметров кровяного потока, исследуемого в данной работе, основана на индуктивно связанных резонансных контурах, как показано на Рис. 2.

Резонансный контур интегрированной части датчика образован элементами  $L_2$ ,  $r_2$  и ёмкостным датчиком  $C_2$ , а внешний контур

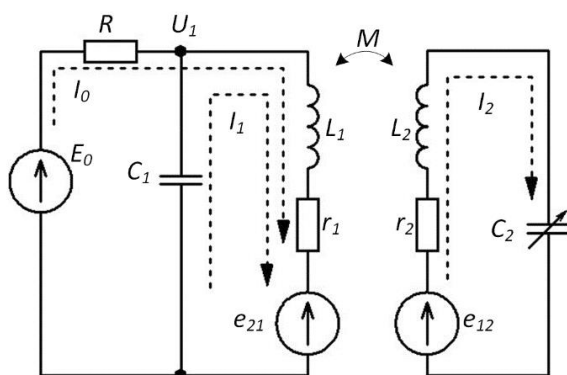


Рис. 2. Электрическая схема датчика.

считывающей части образован элементами  $L_1$ ,  $r_1$ ,  $C_1$ . Эквивалентные источники  $e_{21}$  и  $e_{12}$  отражают взаимную электродвижущую силу (ЭДС), которая наводится в каждый из контуров за счет действия индуктивной связи. Источник  $E_0$  является источником энергии в данной схеме и формирует гармоническую ЭДС с круговой частотой  $\omega$ .

Выходным параметром считывающей части датчика является напряжение  $U_1$  внешнего контура считывания, которое в данном случае определяется параметрами схемы и, в частности, ёмкостью ёмкостного датчика  $C_2$ , что и используется в устройстве для измерения параметров кровяного потока. Изменение выходного параметра  $U_1$  может быть определено с помощью линейного амплитудного детектора.

Для оценки потенциальной чувствительности датчика необходимо определить зависимость  $U_1(C_2)$ , отражающую связь между выходным напряжением  $U_1$  считывающей части и ёмкости ёмкостного датчика  $C_2$  интегрированной части устройства. Для определения  $U_1(C_2)$  применим метод контурных токов [7] к схеме, изображенной на Рис. 2. Система уравнений контурных токов для схемы, изображенной на Рис. 2, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (R + r_1 + j\omega L_1)I_0 + (r_1 + j\omega L_1)I_1 - e_{21} = E_0, \\ (r_1 + j\omega L_1)I_0 + (r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1})I_1 - e_{21} = 0, \\ (r_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2})I_2 - e_{12} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

ЭДС взаимной индукции  $e_{21}$  и  $e_{12}$  в соответствующих контурах определяются следующим образом:

$$e_{21} = j\omega M I_2, \quad (6)$$

$$e_{12} = j\omega M (I_0 + I_1), \quad (7)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность связанных контуров, определяемая как:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент связи связанных контуров, определяемый взаимной конфигурацией

обмоток индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  и расстоянием между ними.

Далее для упрощения представления результатов решения контурных уравнений (5) используются следующие сокращения:

сопротивление связи

$$X_M = \omega M, \quad (9)$$

последовательный импеданс контура считывания  $Z_1$

$$Z_1 = r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \quad (10)$$

импеданс  $L_{1r1}$  ветви контура считывания  $Z_{11}$

$$Z_{11} = r_1 + j\omega L_1, \quad (11)$$

последовательный импеданс интегрированного контура  $Z_2$

$$Z_2 = r_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}. \quad (12)$$

С учетом выше указанных сокращений система уравнений контурных токов для схемы, изображенной на Рис. 2, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} (R + Z_{11})I_0 + Z_{11}I_1 - jX_M I_2 = E_0, \\ Z_{11}I_0 + Z_1I_1 - jX_M I_2 = 0, \\ Z_2I_2 - jX_M(I_0 + I_1) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Решением системы уравнений (5) будут выражения для токов, соответствующих ветвей цепи, изображенной на Рис. 2. В частности, выражение для тока  $I_0$ , питающего считывающий контур, имеет следующий вид:

$$I_0 = \frac{E_0}{R + Z_{11} + \frac{X_M^2}{Z_2} - \frac{\left(Z_{11} + \frac{X_M^2}{Z_2}\right)^2}{Z_1 + \frac{X_M^2}{Z_2}}}. \quad (14)$$

В выражении (14) слагаемое  $X_M^2 / Z_2 = Z_{ins}$  является величиной вносимого сопротивления из интегрированного контура в контур считывания. Вносимое сопротивление  $Z_{ins}$  является следствием индуктивной связи контуров и определяется величиной коэффициента связи  $k$  и, что важно, параметрами интегрированного контура. С учетом введённого обозначения, вносимого сопротивление как  $Z_{ins}$  выражение для тока  $I_0$  принимает следующий вид:

$$I_0 = \frac{E_0}{R + Z_{11} + Z_{ins} - \frac{(Z_{11} + Z_{ins})^2}{Z_1 + Z_{ins}}}. \quad (15)$$

Из уравнений (13) так же можно определить значения остальных токов, используя ток  $I_0$ . Таким образом выражение для тока  $I_1$  контура считывания имеет следующий вид:

$$I_1 = \frac{Z_{11} + Z_{ins}}{Z_1 + Z_{ins}} I_0. \quad (16)$$

Выражение для тока  $I_2$  интегрированного контура:

$$I_2 = \frac{jX_M}{Z_2} (I_0 + I_1). \quad (17)$$

Напряжение  $U_1$  на контуре считывания может быть получено следующим образом:

$$U_1 = E_0 - RI_0. \quad (18)$$

Выражение (18) с учетом (15) приводит к следующему результату для  $U_1$ :

$$U_1 = E_0 \left[ 1 - \frac{R}{R + Z_{11} + Z_{ins} - \frac{(Z_{11} + Z_{ins})^2}{Z_1 + Z_{ins}}} \right]. \quad (19)$$

На Рис. 3 представлены зависимости абсолютного значения напряжения на контуре считывания от частоты  $U_1(f)$ . Зависимости построены для трех значений коэффициента связи  $k_1 = 0.05$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_3 = 0.005$  и диапазона частот  $f$  от 9.5 МГц до 10.5 МГц. Значения параметров элементов схемы (Рис. 2) следующие:  $E_0 = 10$  В,  $R = 1$  кОм,  $L_1 = L_2 = 800$  нГн,  $C_1 = C_2 = 320$  пФ,  $r_1 = 0.1$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом.

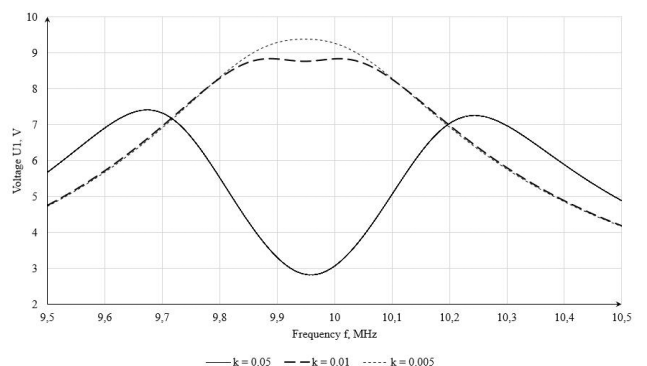


Рис. 3. Зависимости абсолютного значения напряжения на контуре считывания от частоты.



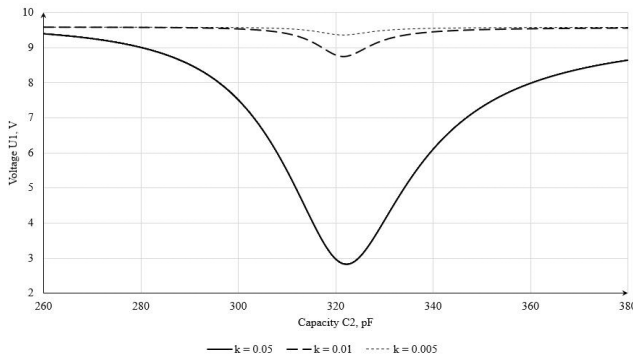


Рис. 4. Зависимости абсолютного значения напряжения на контуре считывания от ёмкости  $C_2$ .

Для оценки потенциальной чувствительности датчика необходимо определить напряжение  $U_1$  на контуре считывания и его зависимость от ёмкости ёмкостного датчика интегрированного контура.

На Рис. 4 представлены зависимости абсолютного значения напряжения на контуре считывания от величины ёмкости датчика интегрированного контура  $U_1(C_2)$ .

Зависимости построены для трех значений коэффициента связи  $k_1 = 0.05$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_3 = 0.005$  и диапазона изменения  $C_2$  от 260 пФ до 380 пФ. Значения параметров элементов схемы (Рис. 2) следующие:  $R = 1$  кОм,  $L_1 = L_2 = 800$  нГн,  $C_1 = 320$  пФ,  $r_1 = 0.1$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом,  $f = 10$  МГц.

В данном случае для определения потенциальной чувствительности датчика необходимо найти зависимость изменения  $\Delta U_1$  напряжения на контуре считывания при изменении ёмкости  $C_2$  в интегрируемом контуре на величину  $\Delta C$ . То есть необходимо найти дифференциал зависимости  $U_1(C_2)$ :

$$\Delta U_1(C_2) = \frac{\partial}{\partial C_2} U_1(C_2) \cdot \Delta C. \quad (20)$$

Произведено вычисление выражения (5) и построены зависимости  $\Delta U_1(C_2)$  для трех значений коэффициента связи  $k_1 = 0.05$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_3 = 0.005$ , частоты  $f = 10$  МГц, диапазона изменения ёмкости  $C_2$  от 260 пФ до 380 пФ и  $\Delta C = 1$  пФ. Остальные параметры элементов схемы (Рис. 2) следующие:  $R = 1$  кОм,  $L_1 = L_2 = 800$  нГн,  $C_1 = 320$  пФ,  $r_1 = 0.1$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом.

Исходя из графиков, представленных на Рис. 5, максимальные значения чувствительности  $\Delta U_1(C_2)$  при  $\Delta C = 1$  пФ для каждого из значений

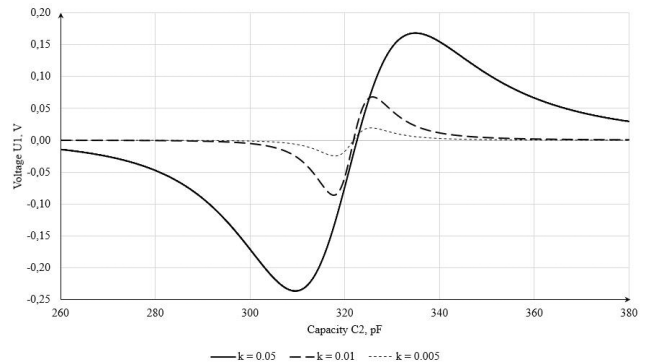


Рис. 5. Зависимости чувствительности датчика от ёмкости  $C_2$ .

коэффициента связи имеют следующие значения: для  $k_1 = 0.05$  максимальная чувствительность достигается при ёмкости ёмкостного датчика  $C_2 = 310$  пФ и составляет  $\Delta U_1(C_2) = -0.237$  В/пФ, для  $k_2 = 0.01$ , при  $C_2 = 317$  пФ,  $\Delta U_1(C_2) = -0.085$  В/пФ, а для  $k_3 = 0.005$ , при  $C_2 = 318$  пФ,  $\Delta U_1(C_2) = -0.024$  В/пФ. Знак минус в  $\Delta U_1(C_2)$  указывает на то, что при увеличении ёмкости  $C_2$  напряжение  $U_1$  уменьшается.

Полученные результаты показывают, что чувствительность данного измерителя зависит от коэффициента связи контуров  $k$ , то есть от взаимной конфигурации обмоток индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  и расстояния между ними.

Представляет собой интерес получение зависимости чувствительности датчика от активного сопротивления потерь  $r_2$  в интегрированном контуре, так как в виду малого габаритного размера катушки  $L_2$  сделать  $r_2$  малой величиной - весьма трудоёмкая задача.

На Рис. 6 представлены зависимости чувствительности датчика  $\Delta U_1(C_2)$  для фиксированного значения коэффициента связи

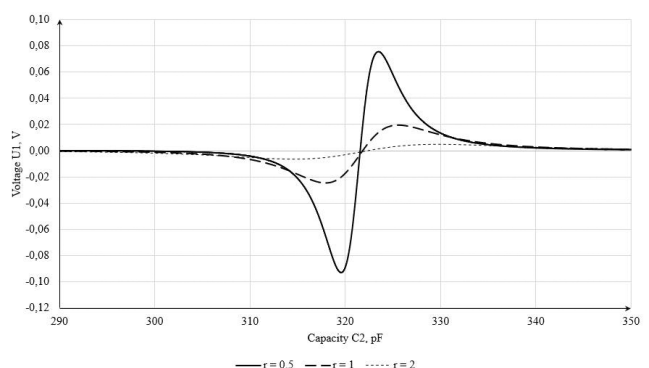


Рис. 6. Зависимости чувствительности датчика от ёмкости  $C_2$ .

$k = 0.005$  и трех значений сопротивления потерь  $r_2$  в интегрированном контуре:  $r_2 = 0.5$  Ом,  $r_2 = 1$  Ом и  $r_2 = 2$  Ом. Частота  $f = 10$  МГц, диапазон изменения ёмкости  $C_2$  от 290 пФ до 350 пФ и  $\Delta C = 1$  пФ. Остальные параметры элементов схемы (Рис. 2) следующие:  $R = 1$  кОм,  $L_1 = L_2 = 800$  нГн,  $C_1 = 320$  пФ,  $r_1 = 0.1$  Ом.

Исходя из графиков, представленных на Рис. 6 максимальные значения чувствительности  $\Delta U_1(C_2)$  при  $\Delta C = 1$  пФ для каждого из значений сопротивления потерь  $r_2$  имеют следующие значения: для  $r_2 = 0.5$  Ом максимальная чувствительность достигается при ёмкости ёмкостного датчика  $C_2 = 319$  пФ и составляет  $\Delta U_1(C_2) = -0.092$  В/пФ, для  $r_2 = 1$  Ом, при  $C_2 = 318$  пФ,  $\Delta U_1(C_2) = -0.02$  В/пФ, а для  $r_2 = 2$  Ом, при  $C_2 = 314$  пФ,  $\Delta U_1(C_2) = -0.006$  В/пФ.

Полученные результаты показывают, что чувствительность данного измерителя также существенно зависит от сопротивления потерь  $r_2$ . При этом для повышения чувствительности устройства необходимо стремиться уменьшать активное сопротивление потерь в катушке  $L_2$  интегрированного контура.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Исходя из вышеописанного был спроектирован и собран экспериментальный макет для исследования практической реализации описанного метода. В электрическую схему макета, представленную на Рис. 7, входят следующие компоненты: катушка индуктивности  $L_1 = L_2 = 800$  нГн, постоянная ёмкость  $C_1 = C_2 = 300$  пФ, переменная ёмкость  $C_{11} = C_{12} = 2-30$  пФ, резистор  $R_1 = 1$  кОм, генератор синусоидального сигнала с частотой  $G_1$  МГц, варикап  $VD_1 = VD_2 = KB121A$ , ограничивающий резистор  $R_2 = 152$  кОм, генератор линейно-нарастающего напряжения с частотой  $G_2 = 2$  Гц, диод  $VD_{ad} = 1N4148$ , постоянная ёмкость  $C_{ad} = 12$  нФ, резистор  $R_{ad} = 100$  кОм.

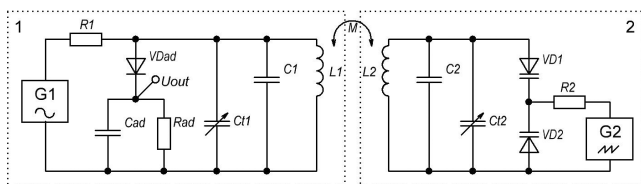


Рис. 7. Электрическая принципиальная схема макета.

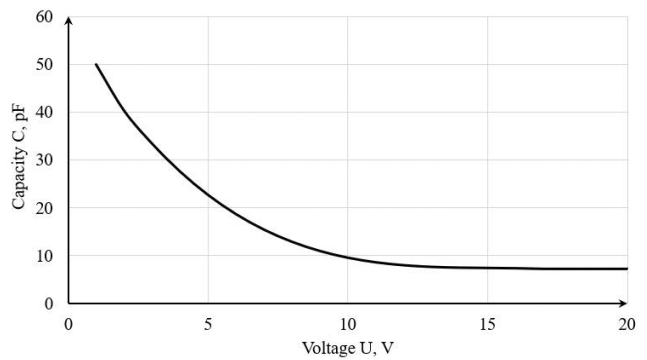


Рис. 8. Вольт-фарадная характеристика варикапа KB121A.

Компоненты  $L_1, C_1, C_{11}$  образуют первичный колебательный контур (контур считывания),  $L_2, C_2, C_{12}$  образуют вторичный колебательный контур (интегрированный контур),  $VD_{ad}, C_{ad}, R_{ad}$  образуют амплитудный детектор первичного контура,  $VD_1, VD_2$  образуют переменную ёмкость, управляемую напряжением для имитации работы ёмкостного датчика интегрированного контура.

Основной характеристикой переменной ёмкости, управляемой напряжением, для данного устройства является зависимость ёмкости от напряжения, представленная на Рис. 8.

Для выделения сигнала, имитирующего давление, необходимо его детектировать с помощью амплитудного детектора. Амплитудный детектор служит для выделения амплитудной огибающей высокочастотного радиосигнала. Расчет параметров амплитудного детектора исходил из условия формулы (17) и параметров экспериментального макета.

$$Xc = \frac{1}{2\pi f \cdot C}. \tag{21}$$

Макет представляет из себя две универсальные печатные платы с распаянной схемой, согласно Рис. 7. Одна из печатных плат закреплена неподвижно и представляет из себя первичный контур. Вторичный контур расположен на подвижной печатной плате, которая имеет возможность перемещения в продольной оси, тем самым дает возможность изменять расстояние между катушками первичного и вторичного контура. Собранный макет представлен на Рис. 9.

Первым этапом работы является исследование зависимости коэффициента связи от фактора катушек. Коэффициент связи катушек

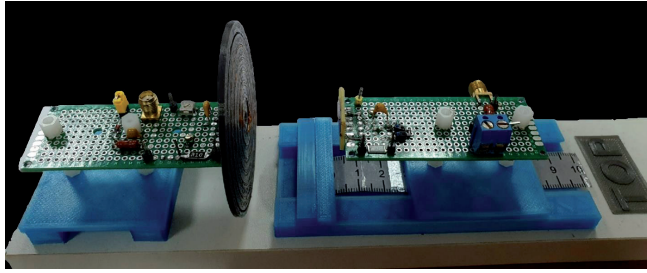


Рис. 9. Экспериментальный макет.

индуктивности определяет степень взаимной индуктивной связи между двумя катушками в электрической цепи. Он показывает, как изменение тока  $I_1$  в одной катушке влияет на индукцию напряжения  $U_2$  в другой катушке. Коэффициент связи зависит от геометрии катушек, расстояния между ними и иных факторов.

Предполагается что катушка индуктивности, входящая в состав пассивного устройства, имеет малые габаритные размеры из-за ограничения, вследствие того, что данная катушка интегрирована в артерию человека. Следовательно, необходимо изменять форм-фактор внешней считывающей катушки для достижения высокого коэффициента связи. В роли катушки индуктивности пассивного устройства была использована плоская спиральная катушка на печатной плате с следующими характеристиками: внешний диаметр  $D = 15$  мм, внутренний диаметр  $d = 2$  мм, ширина печатной дорожки  $W = 0.035$  мм, шаг намотки  $s = 0.6$  мм, толщина печатного проводника  $h = 0.035$  мм, число витков катушки  $N = 11$ , индуктивность  $L = 800$  нГн.

В качестве катушки индуктивности внешнего устройства были использованы следующие катушки, параметры которых представлены в Таблице 1. Катушки 1-3 имеют форму кольца, намотанную виток к витку, катушка 4 имеет форму плоской спирали.

Таблица 1

Параметры внешних катушек

Coil	D, mm	d, mm	N	L, nH
1	22	10	6.3	760
2	28	20	4.25	720
3	64	60	2.25	760
4	54	10	5	850

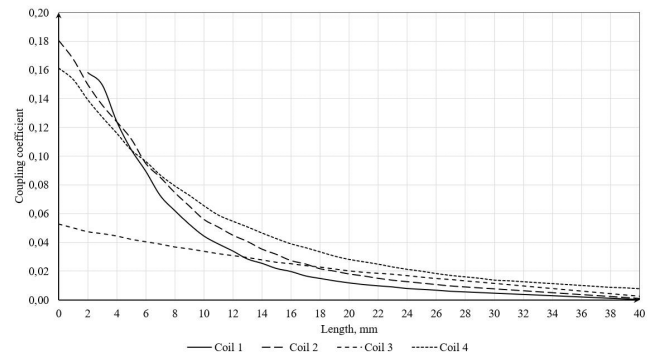


Рис. 10. Экспериментальные зависимости коэффициента связи от расстояния.

При измерении коэффициента связи из схемы, представленной на Рис. 7, были отключены все ёмкостные элементы, а также элементы амплитудного детектора. В результате исследования зависимости коэффициента связи от расстояния для различных внешних катушек индуктивности были получены графики, представленные на Рис. 10. Формула для расчета коэффициента связи (18).

$$k = \frac{U_2}{2\pi f I_1 \sqrt{L_1 L_2}}. \quad (22)$$

Исходя из данных на графике, представленных на Рис. 10, можно сделать вывод о том, что форм-фактор катушек влияет на коэффициент связи. Для дальнейших исследований во внешнем контуре считывания используется катушка 4, ввиду большего коэффициента связи на промежутке от 10 мм до 40 мм.

Следующим этапом работы является измерение вольт-фарадной характеристики датчика, в соответствии со схемой, представленной на Рис. 7. Для имитации изменения давления с генератора на варикап подавалось линейно-нарастающее напряжение. Величина амплитуды изменялась в диапазоне, согласно вольт-фарадной характеристики варикапа, представленной на Рис. 11.

Диапазон изменения ёмкости ограничен вольт-фарадной характеристикой варикапа, в связи с этим показана только часть зависимости выходного напряжения первичного контура от величины ёмкости ёмкостного датчика. Исходя из графика, представленного

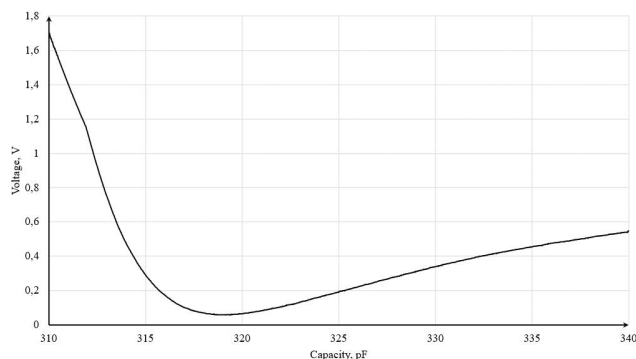


Рис. 11. Экспериментальная вольт-фарадная характеристика датчика.

на Рис. 11, кривая вольт-фарадной характеристики имеет несимметричный характер. Это вызвано различием параметров первичного и вторичного контура, а также нелинейной зависимостью ёмкости варикапа от приложенного напряжения. Максимальное значение реальной чувствительности  $\Delta U_1(C_2)$  составило 30 мВ/пФ.

Далее была произведена имитация изменения артериального давления с помощью генератора  $G_2$  подключенного к вторичному контуру. Генератором  $G_2$  был сформирован кардио-импульс, отсчеты которого представлены на Рис. 12. Данный сигнал, имеющий 438 отсчетов на импульс, с частотой 2 Гц был подан на варикапы (Рис.7), тем самым изменяя суммарную ёмкость вторичного контура.

На Рис. 13 представлена осциллограмма на выходе линейного амплитудного детектора устройства считывания.

Ввиду нелинейности варикапов, различия параметров обеих контуров, малого количества отсчетов на импульс, график выходного

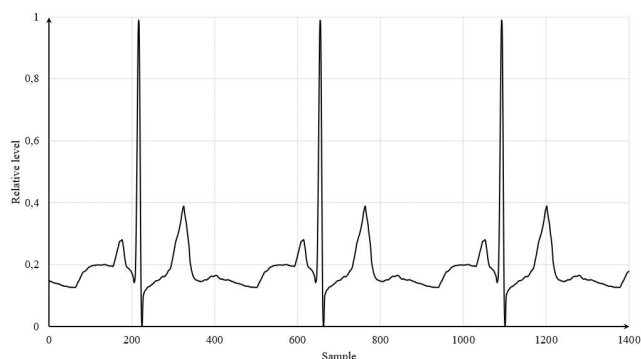


Рис. 12. Кардио-импульс.



Рис. 13. Выходной сигнал контура считывания.

сигнала контура считывания имеет некоторые отличия от сигнала, загружаемого в генератор  $G_2$ . Нелинейность датчика может быть компенсирована калибровкой устройства.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен способ беспроводного измерения параметров кровяного потока с помощью имплантируемого пассивного датчика и считывающего устройства. В ходе данного исследования был произведен математический расчет электрической цепи устройства измерения, в результате которого были получены зависимости выходного напряжения считывающего устройства от изменения ёмкости в имплантируемом датчике. На основе полученных зависимостей был произведен расчет потенциальной чувствительности устройства измерения при заданных параметрах, которая составила  $\Delta U_1(C_2) = -0.085$  В/пФ при коэффициенте связи контуров  $k = 0.01$ .

Далее был представлен изготовленный макет и приведены его параметры. На данном макете было произведено исследование зависимости коэффициента связи контуров при различных габаритах катушек первичного контура. Исходя из полученных результатов при использовании спиральной катушки диаметром 54 мм первичного контура и катушки вторичного контура диаметром 15 мм на расстоянии 40 мм коэффициент связи составил  $k = 0.008$ . Далее было произведено измерение зависимости выходного напряжения устройства считывания от изменения ёмкости вторичного контура. Изменение ёмкости вторичного контура



производилось путём линейного изменения напряжения на варикапе. Была оценена реальная чувствительность макета устройства измерения, которая составила 0.03 В/пФ при расстоянии между катушками 35 мм, что соответствует коэффициенту связи  $k \approx 0.011$ . Различие между потенциальной и реальной чувствительностью устройства измерения вызвано различием параметров первичного и вторичного контуров, а также нелинейной зависимостью ёмкости варикапа от напряжения.

Также был произведен эксперимент, в котором на варикапы было подано напряжение формой кардио-импульса. В результате на амплитудном детекторе внешнего считывающего устройства был получен искаженный по форме сигнал кардио-импульса, отражающий нелинейность устройства измерения.

Исследование показало сильную зависимость выходного параметра устройства от расстояния между внешним считывающим устройством и имплантируемым датчиком и размеров катушек контуров, а также от потерь в контуре имплантируемого датчика. Несмотря на это, представленный в работе способ измерения параметров кровяного потока может быть использован на практике при соответствующей калибровке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization: Cardiovascular Diseases (CVDs), June 11 2021, accessed: Oct. 1 2023, available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
2. Yakovlev A, Kim S, Poon A. Implantable biomedical devices: Wireless powering and communication. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(4):152-159.
3. Bussoo A, Neale S, Mercer JR. Future of smart cardiovascular implants. *Sensors*, 2018, 18(7):2008.
4. Park J, Kim JK, Patil SJ, Park JK, Park S, Lee DW. A Wireless Pressure Sensor Integrated with a Biodegradable Polymer Stent for Biomedical Applications. *Sensors*, 2016, 16:809.
5. Zhang J, Das R, Abbasi QN, Mirzai N, Mercer J, Heidari H. Dual-band Microstrip Patch Antenna for Fully-Wireless Smart Stent. *IEEE: International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, 2021, p. 1035-1036.
6. Chen SC, Zhang ZY, Liu CH. Stent-Based Antennas for Smart Stent Applications. *IEEE: International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2018, p. 1-2.
7. Yorke R. *Electric Circuit Theory: Applied Electricity and Electronics*. Oxford, Pergamon Press, 1981, 350 p.

### Мовчан Андрей Кириллович

к.т.н., доцент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

E-mail: [ltaak@tu.tusur.ru](mailto:ltaak@tu.tusur.ru)

### Ломаков Евгений Витальевич

техник II категории

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

E-mail: [evgenii.v.lomakov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.lomakov@tusur.ru)

### Рогожников Евгений Васильевич

к.т.н., доцент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

E-mail: [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru)

### Савенко Кирилл Валерьевич

ассистент

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Томск 634050, Россия

E-mail: [kirill.savenko@tusur.ru](mailto:kirill.savenko@tusur.ru)

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.053

## Классификация сигналов ЭКГ на основе цифровой обработки сигналов, технического выбора функций и радиочастотного классификатора

<sup>1</sup>Анас Фуад Ахмед, <sup>2</sup>Хадил Н. Абдуллах, <sup>1</sup>Бараа М. Албакер

<sup>1</sup>Иракский университет, факультет электротехники, <http://www.aliraqia.edu.iq/>  
Адхамия, Багдад 6029, Ирак

<sup>2</sup>Технологический университет, электротехнический факультет, <http://www.uotechnology.edu.iq/>  
Багдад 19006, Ирак

E-mail: [anasfuad33eng@yahoo.com](mailto:anasfuad33eng@yahoo.com), [30002@uotechnology.edu.iq](mailto:30002@uotechnology.edu.iq), [baraamalbakerymail.com](mailto:baraamalbakerymail.com)

Поступила 11.09.2023, рецензирована 18.09.2023, принята 25.09.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

**Аннотация:** Определение оптимальной интеграции между функциями и классификаторами оказывает существенное влияние на производительность автоматических систем диагностики сердечбиения. Актуальность этого проявляется при работе с критически важными приложениями, которые содержат устройства с ограниченными ресурсами и требуют точных и быстрых классификаторов сердечбиения, чтобы помочь врачу поставить точный и быстрый диагноз заболеваний сердца. С целью решения этой задачи в данной статье представлен новый подход к выбору оптимальных характеристик сигнала ЭКГ путем использования радиочастотного классификатора (RF), следуя методу разделения сигналов ЭКГ между пациентами и следуя инструкциям Ассоциации по развитию медицинского инструментария (The Association for the Advancement of Medical Instrumentation, AAMI). Характеристики были выбраны на основе концепции "взаимного информационного ранжирования (Mutual Information Ranking, MIR)". Представленная структура является комплексной с точки зрения эффективного выполнения всех необходимых процессов, начиная от обработки цифрового сигнала ЭКГ, сегментации, извлечения признаков, выбора признаков и заканчивая классификацией ЭКГ. Результаты экспериментов показывают, что признаки, соответствующие нормализованной ширине QRS и нормализованным интервалам RR, являются наиболее влиятельными признаками в классификации сердечного ритма. Все тесты проводились с использованием реальных сигналов ЭКГ, взятых из базы данных "MIT-BIH" (MIT-BIH-ARR-DB) по аритмиям. Предложенная схема достигла следующих показателей F1: 91.02%, 73.17% и 98.04% по классификации желудочковых эктопических комплексов (V или VEB), наджелудочковых эктопических комплексов (S или SVEB) и нормальных комплексов (N или NB), соответственно. Общая точность составила 96.26%. Несмотря на свою относительную простоту и использование небольшого количества функций, предлагаемый подход превосходит большинство известных современных решений.

**Ключевые слова:** взаимная информация; выбор функции; аритмия сердца; дискретное вейвлет-преобразование; классификация ЭКГ; радиочастотный классификатор

УДК 53.075.8:57.043

*Для цитирования:* Анас Фуад Ахмед, Хадил Н. Абдуллах, Бараа М. Албакер. Классификация сигналов ЭКГ на основе цифровой обработки сигналов, технического выбора функций и радиочастотного классификатора. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):53-66. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.053.

# A Robust and Efficient Scheme for ECG Signal Classification Based on Digital Signal Processing, Feature Engineering Selection, and Random Forest Classifier

Anas Fouad Ahmed, Baraa M. Albaker

Al-Iraqia University, College of Engineering, Electrical Engineering Department, <http://www.aliraqia.edu.iq/>  
Al Adhmia-Haiba Khaton, Baghdad 6029, Iraq

E-mail: [anasfuad33eng@yahoo.com](mailto:anasfuad33eng@yahoo.com), [baraamalbaker@gmail.com](mailto:baraamalbaker@gmail.com)

Hadeel N. Abdullah

University of Technology, Electrical Engineering Department, <http://www.uotechnology.edu.iq/>  
Al wehada-Neighborhood, Baghdad 19006, Iraq

E-mail: [30002@uotechnology.edu.iq](mailto:30002@uotechnology.edu.iq)

Received September 11, 2023, peer-reviewed September 18, 2023, accepted September 25, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** Determining the optimal integration between features and classifiers has a significant effect on the performance of automatic heartbeat diagnostic systems. This importance stands out when dealing with critical applications that contain limited resources devices and require accurate and fast heartbeat classifiers to help the doctor make an accurate and quick diagnosis of heart diseases. Aiming at this task, this paper introduces a novel approach for choosing the optimal features of the ECG signal to be used with the Random Forest (RF) classifier following the inter-patient method for ECG signals division and obeying the instructions of the "Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI)." The features were chosen based on the concept of "Mutual Information Ranking (MIR)." The presented framework is comprehensive in terms of performing all the necessary processes efficiently, starting from ECG digital signal processing, segmentation, feature extraction, feature selection, and ending with ECG classification. The results of the experiments demonstrate that features corresponding to the normalized QRS width and the normalized RR intervals are the most influential features in the heartbeat classification. All tests were conducted using real ECG signals taken from the "MIT-BIH" Arrhythmia Database (MIT-BIH-ARR-DB). The suggested scheme attained the following F1-scores: 91.02%, 73.17%, and 98.04% in the classification of the Ventricular Ectopic Beats (V or VEB), Supraventricular Ectopic Beats (S or SVEB), and Normal Beats (N or NB), respectively. The overall accuracy was 96.26%. Despite its relative simplicity and reliance on few features, the proposed approach outperforms most of the reported state-of-the-art.

**Keywords:** Mutual Information; Feature Selection; Cardiac Arrhythmia; Discrete Wavelet Transform (DWT); ECG classification; Random Forest (RF)

UDC 53.075.8:57.043

*For citation:* Anas Fouad Ahmed, Hadeel N. Abdullah, Baraa M. Albaker. A Robust and Efficient Scheme for ECG Signal Classification Based on Digital Signal Processing, Feature Engineering Selection, and Random Forest Classifier. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):53-66e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.053.

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. ВВЕДЕНИЕ (55)

### 2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА (56)

#### 2.1. СБОР СИГНАЛОВ ЭКГ (56)

#### 2.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЦИФРОВОГО СИГНАЛА (57)

#### 2.3. ОБНАРУЖЕНИЕ ПИКА R (58)

#### 2.4. ОТБОР СЕРДЦЕБИЕНИЙ (59)

### 2.5. ФУНКЦИИ ОПИСАНИЯ КОМПЛЕКСА QRS (59)

### 2.6. ВЫБОР ФУНКЦИЙ (60)

### 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕРДЦЕБИЕНИЙ (60)

### 2.8. ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ КЛАССИФИКАЦИИ (61)

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (61)

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (63)

### ЛИТЕРАТУРА (64)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) состоит из набора периодических сердечных сокращений, на базе которых формируются различные схемы классификации сердечных ритмов. Согласно информации ААМІ (The Association for the Advancement of Medical Instrumentation – Ассоциация развития медицинского оборудования) существующие подходы классифицируют сердечные ритмы, различая следующие их категории: слитные ритмы (F или FB), неклассифицируемые или стимулированные сокращения (Q или QB), VEB, SVEB и NB. Необходимо обнаружить и подсчитать количество ненормальных эктопических сокращений, чтобы избежать опасных заболеваний сердца. Например, повторение SVEB связано с опасным заболеванием "фибрилляция предсердий", также рецидив VEB является исключительно индикаторным, поскольку его можно использовать как предиктор опаснейшего заболевания "сердечная недостаточность", которое часто приводит к смерти [1-15].

В последние годы исследователи приложили немало усилий для решения проблемы автоматической диагностики или классификации сердечных сокращений, предложив различные методы выполнения этой задачи. Как правило, эти методы можно разделить на два подхода: первый основан на стратегии глубокого обучения, а другой – на разработке функций. Некоторые исследователи применили глубокие нейронные сети (DNN) для классификации сигналов ЭКГ [16-18], но DNN испытывает избыточность параметров и сложность вычислений. Здесь важно отметить, что аналитическая классификация, основанная на разработке признаков, может помочь кардиологам в точной диагностике и точном составлении подходящих графиков терапии, используя преимущества понятных извлеченных признаков. С другой стороны, алгоритмы глубокого обучения не могут предоставить кардиологам интерпретируемые функции и не могут анализировать влияние выбора функций на эффективность классификации ЭКГ, поскольку эти функции неявно фиксируются глубокими уровнями сети. Одно из наиболее важных исследований схем классификации

сердечных ритмов было представлено Luz et al. [19]. В настоящее время большой интерес вызывают методы машинного обучения (ML), и, пожалуй, самым известным из них является метод RF, в котором набор классификаторов создается в виде графа - "ансамбля" деревьев решений (DT) [20]. Вход классифицируется по ансамблю (лесу) по мажоритарному принципу [21]. Поэтому RF-классификатор считается чрезвычайно эффективным и рекомендован для устройств с ограниченными ресурсами, предназначенных для работы в режиме реального времени [22-25]. Emanit [26] применил DWT (дискретное вейвлет-преобразование) к сигналам ЭКГ и использовал полученные коэффициенты в качестве признаков для обучения радиочастотного классификатора. Ламедо и др. [27] представлен простой классификатор ЭКГ, который классифицирует SVEB и VEB на основе коэффициентов интервалов DWT и RR. Аликович и Субаси [28] предложили использовать распределение коэффициентов DWT для извлечения различных характеристик, которые вводятся в RF для целей классификации сердечных сокращений. Гутьеррес и др. [29] классифицировали сигналы ЭКГ с использованием квадратичного вейвлет-преобразования (QWT) и нейронных сетей. Ганеш и Кумарасвами [30] предложили метод классификации сигналов ЭКГ на основе интервалов RR и признаков, извлеченных с помощью дискретного косинусного преобразования (DCT) сигналов ЭКГ для обучения радиочастотного классификатора. Парк и др. [31] использовали коллекции различных функций во временной области с радиочастотным классификатором для классификации пульса. Аравинд и др. [32] предложили алгоритм классификации пульса с использованием сверточной нейронной сети (CNN) и непрерывного вейвлет-преобразования (CWT). Юаньлу и др. [3] классифицировали сигнал ЭКГ на основе глубокого остаточного CNN. Вышеупомянутые исследования достигли превосходной точности (ACC); однако существуют некоторые ограничения, например, некоторые из них: соблюдение рекомендаций ААМІ относительно типа сердечного ритма, которое необходимо обнаружить и классифицировать, предложена надежная модель, которая может быть применена непосредственно к



несбалансированным данным или сигналам и использованы другие показатели для оценки качества классификации, такой как показатель F1, помимо положительной прогнозируемости (PPr) и чувствительности (Sen), которые могут ухудшиться из-за доминирования класса большинства. Самое главное, что ранее (насколько известно авторам) не было исследований, посвященных использованию радиочастотного классификатора, подчиняющегося межпациентному режиму. В этом режиме сигналы разделяются на две группы: первая используется на этапе обучения, а вторая используется на этапе тестирования, при этом между двумя группами нет пересечения (нет сигналов, полученных от одного и того же пациента в обе группы), что приводит к более достоверной оценке работы классификатора. В этом исследовании мы использовали эффективный радиочастотный классификатор для классификации сигналов ЭКГ в соответствии с рекомендациями ААМІ и межпациентным режимом. Ниже приведены результаты этой работы:

- Мы представляем комплексную, надежную и эффективную основу для классификации сигналов ЭКГ на основе улучшенного радиочастотного классификатора, принимая во внимание всю необходимую цифровую обработку и анализ сигналов для собранных сигналов и придерживаясь инструкций ААМІ и межпациентного режима.
- Предложен простой и эффективный механизм обнаружения R-пикув на основе тригонометрии.
- Представлены новые соображения по оценке нормализованных признаков.
- Оптимизация производительности RF-классификатора без необходимости

сложных вычислений с помощью MIR для получения оптимальной и сокращенной группы функций из большого набора функций, содержащей наиболее важные функции, предложенные в предыдущих исследованиях.

- Успешное решение проблемы несбалансированных данных сигналов ЭКГ, когда аномальных сигналов намного меньше, чем нормальных сигналов. Это достигается за счет использования RF-классификатора, который фактически состоит из ансамбля нескольких DT, чувствительных к несбалансированным классам, и принимает унифицированную случайную выборку (URS) из данных сигнала ЭКГ со стратегией замены.
- Понятный анализ сигнала ЭКГ достигается за счет предоставления наборов функций из различных сигналов ЭКГ, которые необходимы для медицинских целей.

## 2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА

Полная блок-схема предлагаемой структуры показана на **Рис. 1**. Она состоит из следующих этапов: сбор сигналов ЭКГ, предварительная обработка цифровых сигналов, учет сердцебиений, извлечение признаков, выбор признаков, классификация сердцебиений и оценка классификатора. Каждый из этих этапов более подробно описан в последующих разделах.

### 2.1. СБОР СИГНАЛОВ ЭКГ

Сигналы ЭКГ были собраны из базы данных MIT-BIH-ARR-DB по аритмиям, которая доступна в [34]. Она хорошо известна и используется многими исследователями, что облегчает процесс сравнения предложенной схемы с предыдущими работами. В **Таблице 1** кратко описаны эти сигналы.

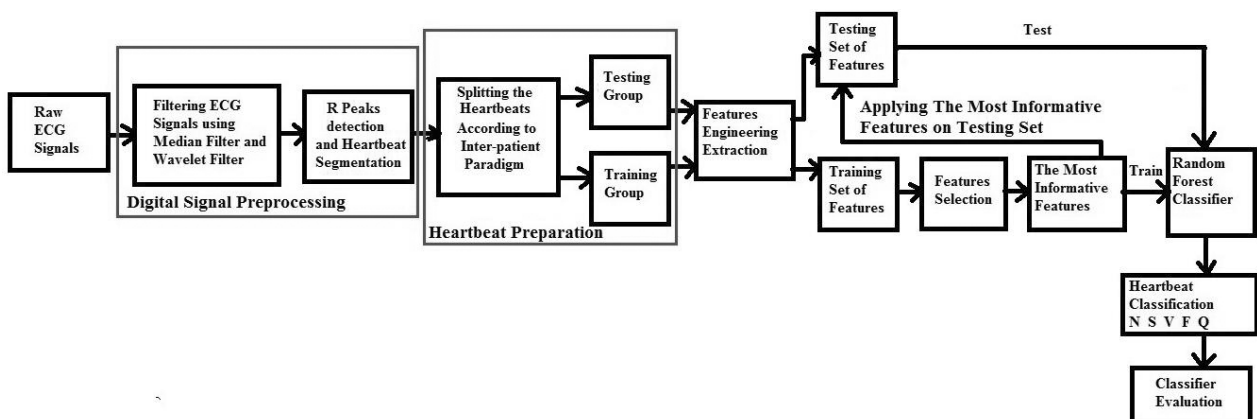


Рис. 1. Блок-схема предлагаемой структуры.

Таблица 1

Описание собранных сигналов ЭКГ

Параметр	Значение
Число записей	48
Продолжительность (мин.)	30
Частота дискретизации (Гц)	360
Проводники	Одиночный (MLII)
Число сердцебиений	109,494
Число типов сердцебиений	15
Пол участников (%)	53% мужчины, 47% женщины
Возрастной диапазон (лет)	23-89

Процесс перемаркировки собранных сигналов проводился для получения пяти классов сердцебиений в соответствии с инструкциями AAMI, как показано в Таблице 2.

2.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЦИФРОВОГО СИГНАЛА

На практике сигналы ЭКГ во время их получения или передачи обычно искажаются двумя основными типами шумов: "блужданием базовой линии" (BW) и белым гауссовским шумом (WGN) [35]. Эти шумы необходимо по возможности уменьшить, чтобы избежать их негативного влияния на качество сигналов и эффективность классификации. Рис. 2 демонстрирует пример сигнала ЭКГ, загрязненного BW и WGN.

Для получения сигналов ЭКГ, скорректированных по базовой линии, каждый сигнал проходил через два медианных фильтра (ширина первого составляет 200 мс, а ширина второго – 600 мс). Затем он вычитается из

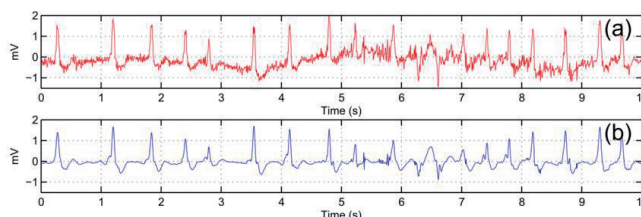


Рис. 2. Пример сигнала ЭКГ, искаженного BW и WGN.

необработанного сигнала ЭКГ. После этого для устранения WGN берется дискретное вейвлет-преобразование DWT сигнала, скорректированное по базовой линии, для разложения его на различные диапазоны частот. Вейвлет-фильтр Добеши-6 (DB6), четыре уровня декомпозиции, схема мягкой пороговой обработки (определенная в уравнении (1)) и универсальная стратегия определения порога (заданная в уравнении (2)) являются оптимальными для удаления WGN из сигнала ЭКГ.

$$S_{thresholding}(De) = \text{sign}(De)(|De| - t_{hr}) \quad (1)$$

for  $|De| > t_{hr}$ , and 0 for  $|De| \leq t_{hr}$ ,

где  $De$  – коэффициенты детализации;  $t_{hr}$  – пороговое значение.

$$t_{hr} = \text{SDN} \cdot \sqrt{2 \log(\text{No.Samples})} \quad (2)$$

$$\text{SDN} = \text{Median}(D) / 0.6745$$

где SDN – стандартное отклонение шума.

DB6 характеризуется следующими особенностями [35]:

- Его форма очень близка к сигналу ЭКГ, что важно для идеальной реконструкции.

Таблица 2

Перемаркировка MIT-BIH-ARR-DB согласно инструкциям AAMI

Классы AAMI с пояснениями		MIT-BIH ритмы с маркировками
Нормальные ритмы (N)	N	Нормальный ритм
	L	Блокада левой ножки пучка Гиса
	R	Блокада правой ножки пучка Гиса
	e	Ускользящий предсердный ритм
	j	Узловой (соединительный) выскальзывающий комплекс
Суправентрикулярный эктопический комплекс (SVEB)	A	Предсердная экстрасистолия
	a	Аберрированная предсердная экстрасистолия
	J	Узловая (соединительная) экстрасистолия
	S	Суправентрикулярная экстрасистолия
Желудочковая эктопия (VEB)	V	Преждевременное сокращение желудочков
	E	Ускользящий желудочковый ритм
Слияние ритмов (F)	F	Слияние желудочкового и нормального ритма
Неизвестные ритмы (Q)	I	Ритмичный ритм
	f	Совмещение ритмичного и нормального ритма
	Q	Неклассифицированный ритм



Рис. 3. Форма вейвлет-фильтра DB6.

- Подходит для нестационарных сигналов из-за коротких моментов исчезновения.
- Он имеет относительно низкую стоимость вычислений из-за своей ортогональности.

На Рис.3 показана форма вейвлет-фильтра DB6.

### 2.3. ОБНАРУЖЕНИЕ ПИКА R

Это исследование предлагает простую и эффективную стратегию обнаружения пика R путем оценки углов в градусах между последовательными выборками амплитуды сигнала с последующим применением динамического порога к этим углам и временному окну, как описано в уравнениях (3), (4), (5), (6) и (7) соответственно:

$$\theta(k) = \tan^{-1}\left(\frac{V}{W}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\beta \times |\delta(k) - \delta(k-1)|}{360 \times \text{Sampling frequency}}\right] \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} 500, & \text{initial value} \\ 1000, & \left(\frac{V}{W}\right) < 57.5 \text{ or } \theta(k) < 89^\circ \text{ during } 2s \text{ interval} \\ 500, & \left(\frac{V}{W}\right) < 117 \text{ or } \theta(k) > 89.5^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент увеличения,  $\delta(k)$  – k-я выборка амплитуды.

Необходимо отметить, что  $\beta$  в уравнении (4) настраивается таким образом, чтобы обеспечить обнаружение биений низкой амплитуды. Рис. 4 иллюстрирует эту концепцию: при частоте дискретизации = 360 Гц видно, что диапазон углов сохраняется между  $80^\circ$  и  $90^\circ$ . Динамическое пороговое значение в градусах  $D(k)$  варьируется в соответствии с уравнением (5), разобраться с изменениями сердечного ритма в зависимости от различных случаев заболевания пациентов и условий регистрации. Значения  $\theta(k)$  и  $D(k)$  сравниваются, затем временное окно  $G(k)$  используется для обнаружения пика R.

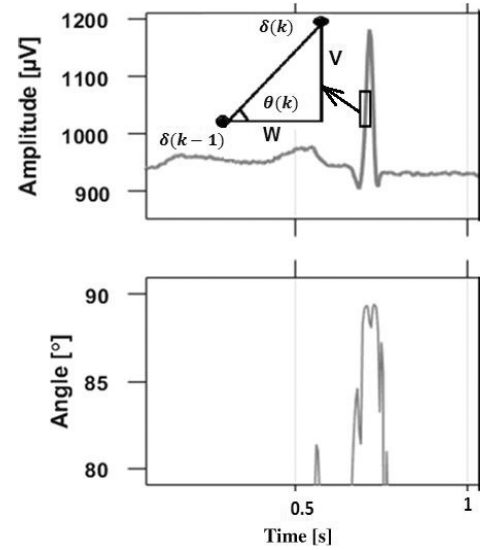


Рис. 4. Оценка углов сердцебиения на основе тригонометрии.

$$D(k+1) = \begin{cases} 0, & \text{initial value} \\ \theta(k) - Y_1, & \|\theta(k) > D(k) + Y_1 \\ D(k), & \|\theta(k) > \theta(k) \leq D(k) + Y_1, \beta t = 0 \\ D(k) - (Y_2 \times \beta t), & \|\theta(k) \leq D(k), \beta t = \beta t + 1 \\ 80, & |D(k)| \leq 80, \end{cases} \quad (5)$$

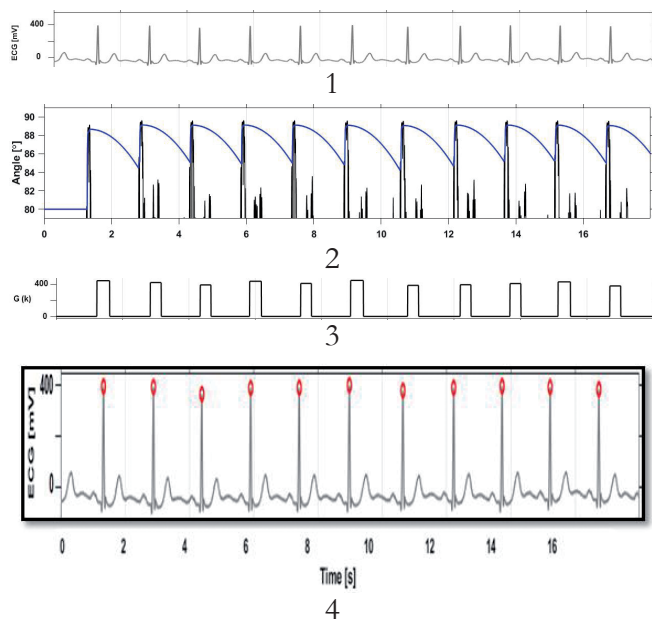
где  $Y_1$  и  $Y_2$  эмпирически установлены равными  $0.4^\circ$  и  $0.00012^\circ$ , последовательно, чтобы получить наименьшую ошибку обнаружения, как показано в Приложении А.

$$G(k) = \begin{cases} \text{Signal amplitude}, & 0 \leq \beta t \leq Y_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$Y_2 = \begin{cases} 0.25s, & \text{initial value} \\ 0.450s \times F_s, & \text{Mean of last 8 RR intervals} \geq 0.68s \\ 0.25s \times F_s, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

После оценки временного интервала  $G(k)$  проводится сравнение между |локальный максимум| и |локальный минимум| проводится амплитуда сигнала в пределах  $G(k)$ ; самый высокий из них указывается как точка пика R, как показано на Рис. 5. Сильные стороны предлагаемой стратегии можно резюмировать следующим образом. Уравнение (1) гарантирует, что связь между  $\theta(k)$  и  $|\delta(k) - \delta(k-1)|$  является нелинейной, а  $\theta(k)$  ограничен фиксированным диапазоном ( $0^\circ$  и  $90^\circ$ ). Другими словами,  $\theta(k)$  невосприимчив к различным изменениям комплекса QRS. Более того, член  $\tan^{-1}$  делает вычисление  $\theta(k)$  простым и быстрым.

После выполнения процесса фильтрации и обнаружения пика R выполняется процесс сегментации. Каждый сигнал ЭКГ сегментируется на несколько сердечных



**Рис. 5.** Наглядный пример предлагаемого подхода к обнаружению R-пиков. (1). Дешумированный сигнал, (2). Углы (черный) и динамическое определение порога (синий), (3). Временное окно  $G(k)$ , (4). Обнаружение и маркировка пиков R.

сокращений в зависимости от местоположения пиков R. Сердцебиение определяется путем указания 92 точек выборки перед пиком R и 146 точек выборки после пика R (т.е. длина каждого сердцебиения составляет 238 выборок).

**2.4. ОТБОР СЕРДЦЕБИЕНИЙ**

Сегментированные сердцебиения разделяются (согласно межпациентной схеме [36]) на две группы: обучающую группу, возникающую в результате фильтрации и сегментации сигналов набора 1, и тестирующую группу, возникающую в результате фильтрации; и сегментация сигналов набора 2. Пересечения между двумя наборами нет (они поступают от разных пациентов). Записи для набора 1 и набора 2 показаны в **Таблице 3**. Согласно стандартам AAMI [37], четыре записи, содержащие ритмические сокращения, удаляются.

**2.5. ФУНКЦИИ ОПИСАНИЯ КОМПЛЕКСА QRS**

В этой статье было рассмотрено большое количество функций, и они представляют собой наиболее примечательные восемьдесят

**Таблица 3**

Сигналы набора 1 и набора 2 с соответствующими записями

Сигналы	Записи из MIT-BIH-ARR-DB
Сигналы 1 набора	101,106,108,109,112,114,115,116,118,119,122,124,201,203,205,207,208,209,215,220,223,230
Сигналы 2 набора	100,103,105,111,113,117,121,123,200,202,210,212,213,214,219,221,222,228,231,232,233,234

пять функций, большинство из которых были рассмотрены в предыдущих работах [31,37-41], и они заключаются в следующем:

- **Коэффициенты DWT.** DWT способно извлекать подробную информацию как из частотной, так и из временной области, что делает его идеальным для представления ЭКГ. В этом исследовании материнский вейвлет Добеши первого порядка (DB1) с тремя уровнями разложения использовался для введения двадцати трех признаков.
- **Коэффициенты базисных функций Эрмита (HBF).** Коэффициенты HBF использовались в качестве характеристик, описывающих структуру сигнала ЭКГ. Точки выборки, расположенные за 250 мс до и после каждого пика R, представляют собой сегмент биения. Параметры оценки коэффициентов HBF описаны в [38]. Порядок HBF был зафиксирован равным двадцати, а переменная ширины оценивалась для уменьшения ошибки реконструкции (насколько это возможно) для каждого удара [37]. Для получения пятнадцати признаков использовались три, четыре и пять HBF.
- **Статистика высшего порядка (HOS).** Она позволяет фиксировать небольшие изменения сигналов ЭКГ [39]. Каждое сердцебиение было разбито на 5 интервалов в каждом; статистики третьего и четвертого порядка (асимметрия и эксцесс) были определены для создания десяти признаков. Диапазон переменных задержки, которые сосредоточены на пике R, составляет от -250 до 250 мс, как описано в [39].
- **Длительность комплексов QRS и их нормализация.** Они включают в себя следующие пять длительностей и их нормализаций (десять признаков): общая длительность QRS (QRS<sub>0</sub>), длительность QRS на среднем значении пика R (QRS<sub>m</sub>), длительность QRS на четверти значения пика R (QRS<sub>q</sub>), длительность между зубцами Q и S (dQS), длительность между зубцом P и начальной точкой комплекса QRS (dPQRS). Эти особенности продемонстрированы на **Рис. 6**. Нормализацию вышеупомянутых функций можно получить путем деления значения функции на среднее ее значение за последние тридцать два такта. Подробное объяснение механизма извлечения представлено в **Приложении В**.
- **Евклидовы расстояния.** Эти четыре характеристики зависят от евклидовых



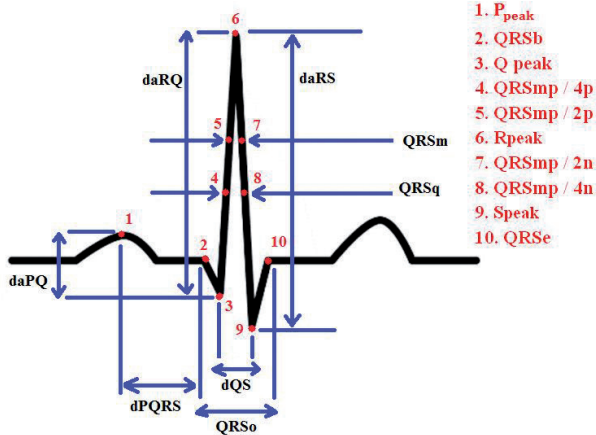


Рис. 6. Демонстрация особенностей длительности и различий амплитуд комплекса QRS.

расстояний между пиком R и четырьмя точками биения, которые представляют значения амплитуды в нескольких выборках (как предложено в [37]): максимальная амплитуда (удар [0, 40]), минимальная амплитуда (удар [75, 85]), минимальная амплитуда (удар [95, 105]) и максимальная амплитуда (удар [150, 180]).

- **Разница амплитуд и их нормализация.** Они состоят из следующих семи амплитуд и их нормировок (четырнадцати признаков): разница в амплитуде между зубцами R и Q ( $daRQ$ ), разница в амплитуде между зубцами P и Q ( $daPQ$ ), различия по амплитуде между зубцами R и S ( $daRS$ ) и пиковым значениям волн (S, R, P и Q). Все эти особенности проиллюстрированы на Рис. 6. Нормализацию вышеупомянутых признаков можно определить путем деления значения признака на среднее его значение за последние тридцать два такта. Подробное объяснение механизма извлечения представлено в **Приложении В**.
- **Интервалы RR и их нормализация.** Это наиболее часто используемые функции для целей классификации. Эти характеристики можно рассчитать по временному расстоянию между последовательными ударами. Если мы обозначим  $RR_p$  для текущего интервала RR, то  $RR_p - 1$  и  $RR_p + 1$  представляют собой интервалы до RR и после RR соответственно. Число интервалов RR, рассматриваемых в данной статье, равно трем. Следующие шесть особенностей представляют собой нормализованные интервалы RR:  
 Нормализованный  $RR_p = (RR_p) / \text{среднее значение последних тридцати двух интервалов RR}$ .

Нормализованный  $RR_p - 1 = (RR_p - 1) / \text{среднее значение последних тридцати двух интервалов RR}$ .

Нормализованный  $RR_p + 1 = (RR_p + 1) / \text{среднее значение последних тридцати двух интервалов RR}$ .

Нормализованный  $RR_{r1} = (RR_p - 1) / RR_p$ .

Нормализованный  $RR_{r2} = (RR_p + 1) / RR_p$ .

Нормализованный  $RR_{pt} = [RR_p - \text{среднее значение последних тридцати двух интервалов RR}] / \text{стандартное отклонение последних тридцати двух интервалов RR}$ .

## 2.6. ВЫБОР ФУНКЦИИ

Чтобы минимизировать вычислительные затраты введенной структуры без ущерба для производительности классификатора, количество функций для этапа обучения было доведено до десяти; это согласуется с выводами специалистов и предыдущими работами [27,41]. Принцип взаимного информационного ранжирования (Mutual Information Ranking, MIR) используется для выбора только наиболее значимых функций в соответствии с классом сердцебиений. С точки зрения выбора признаков, MIR признан впечатляющей стратегией, поскольку он может определять нелинейную релевантность между признаками данного вектора признаков или матрицы признаков. Оценки MIR (или значения MI), оцененные между метками классов и признаков, указывают на способность различать эти признаки:

$MI(\text{feature}, \text{class label}) = E(\text{feature}) - E(\text{class label} | \text{feature})$  (8)

где  $E$  (особенность) – энтропия функции;  $E(\text{метка класса} | \text{функции})$  – условная энтропия метки класса для данной функции, оценивающая неопределенность метки класса всякий раз, когда функция известна. В этом исследовании значения MI оцениваются на основе работы в [42] и [43] и с использованием функции Python под названием "mutual\_info\_classif".

## 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕРДЦЕБИЕНИЙ

В этом исследовании RF-классификатор используется для задачи классификации сердцебиений. Это ансамбль Z-деревьев  $R1(I), R2(I), \dots, RZ(I)$ , где  $I = i_1, i_2, \dots, i_j$  — вектор входных данных j-мерности, а полученная группа генерирует Z – выводит  $O1 = R1(I), O2 = R2(I), \dots, Oz = Rz(I)$ .  $Oz$  — значение прогноза, сделанное деревом номер z. Окончательный прогноз  $O$  определяется путем агрегирования результатов всех случайных деревьев (голосование большинства). RF производит Z-количество DT из L-обученных выборок. Новая обучающая группа создается путем

проведения бутстреп-выборки для всех деревьев в лесу индивидуально. Эта группа используется для разработки DT без обрезки. В каждом разделении узла DT случайным образом выбирается лишь небольшое количество  $j$  признаков, а не все из них. Чтобы построить случайно созданный граф, эта процедура повторялась для генерации  $J$  из DT.

Ниже приводится краткое описание процесса обучения случайно созданного графа:

**Этап первый:** Из обучающей группы выбрать произвольную выборку.

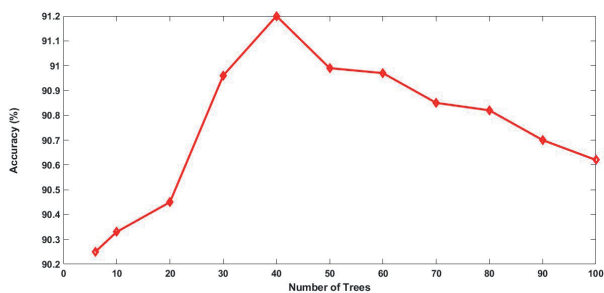
**Второй этап:** для каждой произвольной выборки создать дерево со следующим изменением: в каждом узле выбрать оптимальное разделение среди произвольно выбранной подгруппы входных параметров, которая является параметром настройки RF. Дерево создается полностью до тех пор, пока не останется потенциальных делений и оно не будет обрезано.

**Третий этап:** повторить первый и второй этапы, пока не будет создано  $Z$  таких деревьев.

Классификатор RF был создан с использованием библиотеки *Python Scikit-learn* [44]. Все переменные остались в конфигурации по умолчанию, кроме количества деревьев. Чтобы обнаружить наилучшее количество деревьев, обучение проводилось с увеличенным количеством деревьев с использованием десяти оптимальных функций и проверялось достижение ACC. На **Рис. 7** показаны результаты применения LOOCV на обучающем наборе. Понятно, что при числе деревьев, превышающем сорок, точность классификаторов не улучшается, а может даже ухудшаться.

### 2.8. ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ КЛАССИФИКАЦИИ

Измерение эффективности классификации и сравнение с современным уровнем техники проводилось путем определения следующих показателей: общая точность (ACC), показатель F1, положительная прогнозируемость (PPr) и чувствительность (Sen).



**Рис. 7.** Зависимость точности от количества деревьев, полученных из LOOCV на обучающем наборе для RF-классификаторов.

$$F1 - Score = \frac{2 \cdot PPr \cdot Sen}{PPr + Sen} \quad (8)$$

$$PPr = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

$$Sen = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (11)$$

где TP – истинно положительный результат, TN – истинно отрицательный результат, FP – ложный положительный результат и FN – ложный отрицательный результат.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В этой статье проводится исследование использования радиочастотного классификатора для классификации сигналов ЭКГ путем использования оптимального выбора для извлеченных функций временной области (TD) и соблюдения стандартов АAMI и подхода между пациентами. В ходе этого исследования были изучены различные восемьдесят пять особенностей. Были реализованы все функции, предложенные в [37], которые считаются важной исследовательской работой в этом направлении. Кроме того, было использовано большинство функций, предложенных или основанных на [41] и [38]. В этом исследовании нормализация была достигнута путем деления характеристик на среднее значение последних сердечных сокращений. Этот процесс можно более практично проводить с помощью носимых и портативных медицинских устройств мониторинга в режиме реального времени. Дальнейшую нормализацию  $RRp - 1$  и  $RRp + 1$  проводили путем деления их на интервал  $RRp$ ; это было представлено как попытка учесть временную значимость между последовательными пиками  $R$ , что также рассматривается в [45]. Нормализованный  $RRpt$  рассчитывался как количественная мера стандартных отклонений для определенного интервала от среднего значения. **Таблица 4** иллюстрирует десять наиболее важных характеристик, оцениваемых по принципу MIR. Поскольку высокая доля вышеуказанных нормировок представлена в таблице наиболее значимых особенностей (как указано в Таблице 4), наши результаты показывают, что нормализованные интервалы RR предоставляют дополнительную информацию и более эффективны для классификации сигналов ЭКГ, чем другие классические интервалы RR. В

Таблица 4

Десять наиболее значимых характеристик, полученных с помощью MIR, с их значениями MI

Позиция по версии MIR	Имя функции	Значение MI
1	Нормализованный QRSm	0.19037819
2	Нормализованный QRSq	0.17508354
3	Нормализованный PPr	0.16311836
4	Нормализованный PPr2	0.14615831
5	QRSm	0.14439339
6	Первый аппроксимирующий коэффициент четвертой степени HBF (HBF C1D4)	0.14157413
7	HBF C2D4	0.14001679
8	QRSq	0.13641600
9	HBF C0D4	0.13299729
10	Нормализованный RRr1	0.13147040

тестах была задействована только лучшая десятка с наиболее значимыми характеристиками. Результаты показывают, что шесть функций достаточны для достижения оптимальных результатов ( $ACC_o = 96.26\%$ ), как показано на **Рис. 8**. Это согласуется с полученными результатами в [38], которые показывают количество наиболее отличительных особенностей. Подмножество обычно невелико, и исключение менее значимых из них может эффективно повысить производительность классификатора. Помимо особенностей нормализованных интервалов RR, наибольшее количество из десяти наиболее значимых особенностей связано с длительностью комплекса QRS, рассчитанной при определенных величинах. Это указывает на то, что эти конкретные особенности являются более надежными идентификаторами формы QRS, чем контрольные точки, которые характеризуются вариациями небольшой амплитуды и которые часто нарушаются фоновым шумом. **Таблицы**

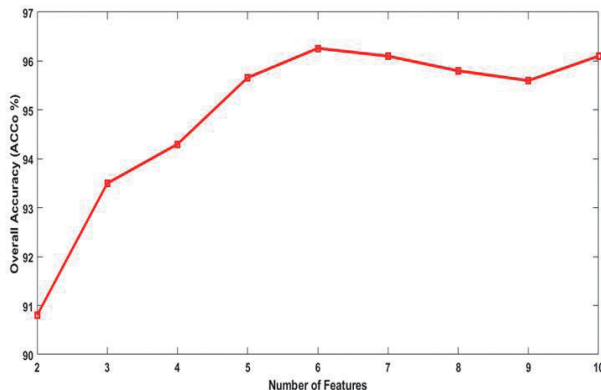


Рис. 8. Общая точность ( $ACC_o$  %) в зависимости от количества признаков RF-классификатора.

Таблица 5

Производительность предлагаемого метода с точки зрения матрицы путаницы с использованием тестового набора

		Прогноз		
		NB	SVEB	VEB
	NB	43494	653	69
	SVEB	367	1447	23
Истинный	VEB	377	15	2818
	FB	269	2	67
	QB	3	1	5

**5 и 6** демонстрируют эффективность предлагаемой структуры с точки зрения матрицы путаницы и различных показателей оценки соответственно. Поскольку неправильная классификация QB и FB не принимается во внимание, согласно рекомендациям ААММИ, они не рассматриваются в настоящем исследовании (как наиболее предшествующие работы), но все же участвуют в оценке. Примечательно, что показатель F1 дает более надежное представление о производительности классификаторов, особенно когда данные несбалансированы. В контексте сравнения с предыдущими работами предлагаемая структура отличается от подходов предыдущих исследований тем, что является комплексной и полностью автоматизированной. В отличие от предыдущих методов, которые не определяли автоматически местоположения пиков R (они работают только в том случае, если эти местоположения заранее определены в базе данных), предлагаемая структура представляет новый, простой и эффективный метод обнаружения этих мест на основе тригонометрии. В **Таблице 7** сравниваются результаты, полученные с помощью тестового набора, представленного в этой статье, с несколькими методологиями, представленными в литературе, которые достигли очень хороших показателей классификации сигналов ЭКГ и использовали рекомендации ААММИ и концепцию взаимодействия с пациентами. Показано, что общая точность, полученная в данной работе, является одной из лучших, достигаемых при

Таблица 6

Эффективность предлагаемого подхода с точки зрения Sen, PPr, F1-Score и  $ACC_o$  с использованием тестового набора.

	Sen	PPr	F1-Score	$ACC_o$
NB	98.36%	97.71%	98.04%	
SVEB	78.77%	68.32%	73.17%	<b>96.26%</b>
VEB	87.78%	94.50%	91.02%	



Таблица 7

## Сравнение эффективности предлагаемой структуры с современными методами

Источник	Извлеченные функции	Размер используемых функций	Классификатор	Класс F1 NB	Класс F1 SVEB	Класс F1 VEB	ACC <sub>Co</sub>
[48]	Интервалы RR, морфология временной области и WT	101	Ансамбль SVM	97.59%	57.68%	92.37%	93.8%
[37]	Интервалы RR, морфология временной области, HOS и WT	45	Ансамбль SVM	97.04%	60.74%	94.29%	94.5%
[46]	GM, HOS и интервалы RR	33	Ансамбль BDT	97.89%	88.64%	85.82%	96.15%
[49]	Случайные проекции DCT, интервалы RR	33	SVM	96.88%	33.37%	77.29%	93.1%
[27]	Интервалы RR, морфология временной области и WT	8	Линейный дискриминант	96.48%	17.16%	83.89%	93%
[50]	HOS	4	Наивный Байес	65.6%	0.4%	84.7%	94.0%
	Интервалы RR, HOS, WT и морфология временной области	45	SVV и VTT	91.50%	54.45%	94.47%	88.69%
[33]	-	-	RCNN	93.93%	45.9%	83.89%	88.99%
Представленный доклад	Интервалы RR, морфология временной области и HBF	6	RF	<b>98.04%</b>	73.17%	91.02%	<b>96.26%</b>

использовании тех же показателей оценки (ACC = 96.26%), превосходит показатели, достигнутые в [46] (ACC<sub>Co</sub> = 96.15%), что, по данным нашего исследования, самое высокое из предыдущих работ. Исследователи в [46] использовали подход Гауссовой смеси (GM) (который является дорогостоящим в вычислительном отношении) для получения различных характеристик, а также использовали метод упаковки дерева для целей классификации. Схема классификации RF может дать лучшие результаты, чем дерево упаковки, поскольку RF обеспечивает минимальную корреляцию между деревьями; это также было подчеркнуто в [47]. Предложенный метод в [46] использовал сто деревьев для получения результатов, тогда как результаты, представленные в этой статье, используют только сорок деревьев. Более того, предлагаемый метод является более общим и практичным в реальном мире, поскольку решает проблему WGN, которая может негативно повлиять на результаты классификации. Эта проблема не учитывается в [46] и большинстве предыдущих методов. Наилучшие результаты обнаружения SVEB были достигнуты в [46]; однако предложенная система превзошла результаты с точки зрения обнаружения VEB. Представленная система заняла второе место по выявлению VEB (F1-оценка = 91.02%) после первого ранга, достигнутого в [51] (F1-оценка = 94.47%). Тем не

менее, наша модель более эффективна с точки зрения сложности, простоты и пригодности для носимых и портативных устройств, чем модель, предложенная в [51], основанная на DNN. Выявление VEB особенно важно, поскольку его рецидив может быть использован как предиктор опаснейшего заболевания "сердечная недостаточность", часто приводящего к летальному исходу [14,15].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании была предложена комплексная, надежная, эффективная и полностью автоматизированная система классификации сигналов ЭКГ на основе цифровой обработки сигналов, инженерного выбора функций и радиочастотного классификатора. Оптимальное сочетание разработки функций и радиочастотного классификатора было введено для решения задачи классификации пульса для устройств с ограниченными ресурсами. Эффективность классификации сигналов ЭКГ была разумно рассчитана с учетом рекомендаций ААМІ и индивидуального подхода к пациентам. Наиболее значимыми особенностями для задачи классификации ЭКГ были нормализованные характеристики, связанные с интервалами RR и продолжительностью комплекса QRS, рассчитанные при



определенных величинах. Оптимальные результаты были достигнуты с использованием шести лучших наиболее значимых функций и сорока деревьев решений RF-классификатора. Оценка была основана на MTT-BIN-ARR-DB. Сравнивая предложенную в этой статье схему с опубликованными в литературе, можно отметить, что наши результаты являются одними из лучших результатов, достигнутых на сегодняшний день. Результаты не только подтвердили, что RF-классификатор является превосходным подходом для классификации сигналов ЭКГ, но также сравнительно небольшое количество функций и деревьев адекватно для достижения или превосходства литературных показателей.

#### Приложение А Настройка $Y_1$ и $Y_2$ для получения наименьшей ошибки обнаружения

			$Y_2$		
$Y_1$	0.00006	0.00008	0.00018	0.00012	0.00014
0.2	0.350	0.281	0.262	0.251	0.624
0.3	0.235	0.218	0.216	0.207	0.218
0.4	0.198	0.191	0.190	<b>0.185</b>	0.193
0.5	0.198	0.196	0.195	0.193	0.200
0.6	0.200	0.195	0.208	0.203	0.220

#### Приложение Б

##### Извлечение ключевых точек сигнала ЭКГ

Наивысшая абсолютная амплитуда сигнала в период 100 мс до и после пика R назначается в качестве опорной базовой точки. Для получения ключевых точек ЭКГ были проведены следующие процедуры: (обратите внимание, что пики R обнаруживаются и извлекаются, как описано в разделе 2.3).

1. Первоначально предположим, что пики P, Q и S = 0 (соответствующих волн не существует).
2. Вернуться назад перед QRSmp и определить точки перехода следующим образом:
  - i. Установить  $[QRSmp/2p]$  = первую позицию, в которой значение сигнала ниже QRSmp/2.
  - ii. Установить  $[QRSmp/4p]$  = первую позицию, в которой значение сигнала ниже QRSmp/4.
  - iii. Установить  $Q_{peak}$  = амплитуду первой отрицательной точки перехода.
  - iv. Если первая точка перехода ( $t_{rp}$ )  $\geq 0$ , то указать эту точку как QRSb, установить  $S_{peak} = QRSmp$  и  $Q_{peak} = 0$ .
  - v. Если QRSmp  $> 0$ , а второй  $t_{rp} < 0$  и  $Q_{peak} = 0$ , то указать амплитуду этой точки как  $Q_{peak}$ .

- vi. Если  $Q_{peak} \neq 0$  и сигнал проходит через 0, то установить QRSb = первую точку, которая равна  $\geq 0$ .
  - vii. Если второй  $t_{rp} \geq 0$ , а QRSb еще не определен, то указать эту точку как QRSb.
3. Продолжить после QRSmp и определить точки перехода следующим образом:
    - i. Установить  $[QRSmp/2n]$  = первую позицию, в которой значение сигнала ниже QRSmp/2.
    - ii. Установить  $[QRSmp/4n]$  = первую позицию, в которой значение сигнала ниже QRSmp/4.
    - iii. Установить  $S_{peak}$  = амплитуде первого  $t_{rp}$ , то есть  $< 0$ .
    - iv. Если  $S_{peak} \neq 0$  и сигнал проходит через 0, то установить QRSe = первую точку, которая  $\geq 0$ .
  4. Оценить максимальную амплитуду сигнала в период от 236 мс до 70 мс до QRSb (MApriQRSb[236,70]). Если эта амплитуда  $> 3 \cdot STD$  сигнала за период 70 мс до рассматриваемого периода и ее местоположение соответствует  $t_{rp}$  сигнала, то устанавливаем  $P_{peak} = MApriQRSb[236,70]$ .

Примечание: QRSb – начало QRS, QRSe – окончание QRS, STD – стандартное отклонение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Xu J, Xiao W, Liang X, Shi L, Zhang P, Wang Y, Wang Y, Yang H. A meta-analysis on the risk factors adjusted association between cardiovascular disease and COVID-19 severity. *BMC Public Health*, 2021, 21(1):1533; doi: 10.1186/s12889-021-11051-w.
2. Tyagi A, Mehra R. 2021. Intellectual heartbeats classification model for diagnosis of heart disease from ECG signal using hybrid convolutional neural network with GOA. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(2):1-14.
3. Pal HS, Kumar A, Vishwakarma A, Singh GK, Lee HN. An effective ECG signal compression algorithm with self-controlled reconstruction quality. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2023, pp. 1-11. DOI: 10.1080/10255842.2023.2206933.
4. Ali AM, Ahmed AF, Najim AH. 2020, November. Efficient and Effective Scheme for ECG Compression. *Proc. 2nd Annual International Conference on Information and Sciences (AiCIS)*, 2020, pp. 91-94. DOI: 10.1109/AiCIS51645.2020.00024.
5. Martínez JP, Almeida R, Olmos S, Rocha AP, Laguna P. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 2004, 51(4):570-581.
6. Sharma M, Dhiman HS, Acharya UR. 2021. Automatic identification of insomnia using optimal antisymmetric biorthogonal wavelet filter bank with ECG signals. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, 131:104246.

7. Hussain I, Park SJ. Big-Ecg: Cardiographic Predictive Cyber-Physical System for Stroke Management. *IEEE Access*, 2021, 9:123146-123164.
8. Chandra S, Sharma A, Singh GK. A comparative analysis of performance of several wavelet based ECG data compression methodologies. *IRBM*, 2021, 42(4):227-244. DOI: 10.1016/j.irbm.2020.05.004.
9. Yan Z, Zhou J, Wong WF. 2021. Energy efficient ECG classification with spiking neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 63:102170.
10. Saini I, Singh D, Khosla A. 2013. QRS detection using K-Nearest Neighbor algorithm (KNN) and evaluation on standard ECG databases. *Journal of advanced research*, 2013, 4(4):331-344.
11. Martis RJ, Acharya UR, Mandana KM, Ray AK, Chakraborty C. Cardiac decision making using higher order spectra. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2013, 8(2):193-203.
12. Kim H, Kim S, Van Helleputte N, Artes A, Konijnenburg M, Huisken J, Van Hoof C, Yazicioglu RF. A configurable and low-power mixed signal SoC for portable ECG monitoring applications. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 2013, 8(2):257-267.
13. Scirè A, Tropeano F, Anagnostopoulos A, Chatzigiannakis I. Fog-computing-based heartbeat detection and arrhythmia classification using machine learning. *Algorithms*, 2019, 12(2):32.
14. Acharya T, Tringali S, Bhullar M, Nalbandyan M, Ilineni VK, Carbajal E, Deedwania P. Frequent atrial premature complexes and their association with risk of atrial fibrillation. *The American journal of cardiology*, 2015, 116(12):1852-1857.
15. Liaqat S, Dashtipour K, Zahid A, Assaleh K, Arshad K, Ramzan N. Detection of atrial fibrillation using a machine learning approach. *Information*, 2020, 11(12):549. DOI:10.3390/info11120549.
16. Pyakillya B, Kazachenko N, Mikhailovsky N. Deep learning for ECG classification. *Journal of Physics Conference Series*, 2013, 913(1):012004. DOI: 10.1088/1742-6596/913/1/012004.
17. Hannun AY, Rajpurkar P, Haghpanahi M, Tison GH, Bourn C, Turakhia MP, Ng AY. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature medicine*, 2019, 25(1):65-69.
18. Murat F, Yildirim O, Talo M, Baloglu UB, Demir Y, Acharya UR. Application of deep learning techniques for heartbeats detection using ECG signals-analysis and review. *Computers in biology and medicine*, 2020, 120:103726.
19. Luz EJDS, Schwartz WR, Cámara-Chávez G, Menotti D. 2016. ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2016, 127:144-164.
20. Ani R, Krishna S, Anju N, Aslam MS, Deepa OS. Iot based patient monitoring and diagnostic prediction tool using ensemble classifier. *Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2017, pp. 1588-1593.
21. Saffari A, Leistner C, Santner J, Godec M, Bischof H. On-line random forests. *Proc. IEEE 12th international conference on computer vision workshops*, 2009, pp. 1393-1400.
22. Lempitsky V, Verhoek M, Noble JA, Blake A. Random forest classification for automatic delineation of myocardium in real-time 3D echocardiography. *Proc. International Conference on Functional Imaging and Modeling of the Heart*, 2009, pp. 447-456. Springer, Berlin, Heidelberg.
23. Vamsi IV, Abhinav N, Verma AK, Radhika S. Random forest based real time fault monitoring system for industries. *Proc. 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, 2018, pp. 1-6.
24. Zhao X, Song Z, Guo J, Zhao Y, Zheng F. Real-time hand gesture detection and recognition by random forest. *Proc. Int. Conf. "Communications in computer and information processing" (ICCIP)*, 2012, 289:747-755. Springer, Berlin, Heidelberg.
25. Li J, Zhong PA, Yang M, Zhu F, Chen J, Liu W, Xu S. Intelligent identification of effective reservoirs based on the random forest classification model. *Journal of Hydrology*, 2020, 591:125324.
26. Emanet N. ECG beat classification by using discrete wavelet transform and Random Forest algorithm. *Proc. Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, 2009, pp. 1-4.
27. Llamedo M, Martínez JP. 2010. Heartbeat classification using feature selection driven by database generalization criteria. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 58(3):616-625.
28. Alickovic E, Subasi A. Medical decision support system for diagnosis of heart arrhythmia using DWT and random forests classifier. *Journal of medical systems*, 2016, 40(4):108.
29. Gutierrez-Gnecchi JA, Morfin-Magaña R, del Carmen A, Tellez-Anguiano DLE, Reyes-Archundia E, Díaz OH. Cardiac Arrhythmia Classification Using a Combination of Quadratic Spline-Based Wavelet Transform and Artificial Neural Classification Network. *Proceedings 2nd International Work-Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (IWBBIO)*, 2014, Vols 1, pp.1743-1754.
30. Kumar RG, Kumaraswamy YS. Investigating cardiac arrhythmia in ECG using random forest classification. *Int. J. Comput. Appl*, 2012, 37(4):31-34.

31. Park J, Lee S, Kang K. Arrhythmia detection using amplitude difference features based on random forest. *Proc. 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015, pp. 5191-5194.
32. Aravind S, Sanjay M. ECG Classification and Arrhythmia Detection Using Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *Proc. International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISc)*, 2021, Vol. 1, pp. 1-5.
33. Li Y, Qian R, Li K. Inter-patient arrhythmia classification with improved deep residual convolutional neural network. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2022, 214:106582.
34. <https://physionet.org/content/mitdb/1.0.0/>.
35. Wang T, Lu C, Sun Y, Yang M, Liu C, Ou C. 2021. Automatic ECG Classification Using Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *Entropy*, 2021, 23(1):119.
36. De Chazal P, O'Dwyer M, Reilly RB. Automatic classification of heartbeats using ECG morphology and heartbeat interval features. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2004, 51(7):1196-1206.
37. Mondéjar-Guerra V, Novo J, Rouco J, Penedo MG, Ortega M. Heartbeat classification fusing temporal and morphological information of ECGs via ensemble of classifiers. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2019, 47:41-48.
38. De Lannoy G, François D, Delbeke J, Verleysen M. Weighted SVMs and feature relevance assessment in supervised heart beat classification. *Proc. International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, 2010, pp. 212-223. Springer, Berlin, Heidelberg.
39. Osowski S, Linh TH. ECG beat recognition using fuzzy hybrid neural network. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2001, 48(11):1265-1271.
40. Ince T, Kiranyaz S, Gabbouj M. A generic and robust system for automated patient-specific classification of ECG signals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(5):1415-1426.
41. Mar T, Zaunseder S, Martínez JP, Llamedo M, Poll R. Optimization of ECG classification by means of feature selection. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58(8):2168-2177.
42. Kraskov A, Stögbauer H, Grassberger P. Estimating mutual information. *Physical review E*, 2004, 69(6):066138.
43. Ross BC. Mutual information between discrete and continuous data sets. *PloS one*, 2014, 9(2):e87357.
44. Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J. Scikit-learn: Machine learning in Python. *The Journal of machine Learning research*, 2011, 12:2825-2830.
45. Tsipouras MG, Fotiadis DI, Sideris D. An arrhythmia classification system based on the RR-interval signal. *Artificial intelligence in medicine*, 2005, 33(3):237-250.
46. Afkhami RG, Azarnia G, Tinati MA. Cardiac arrhythmia classification using statistical and mixture modeling features of ECG signals. *Pattern Recognition Letters*, 2016, 70:45-51.
47. Banfield RE, Hall LO, Bowyer KW, Kegelmeyer WP. A comparison of decision tree ensemble creation techniques. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2006, 29(1):173-180.
48. Huang H, Liu J, Zhu Q, Wang R, Hu G. A new hierarchical method for inter-patient heartbeat classification using random projections and RR intervals. *Biomedical engineering online*, 2014, 13(1):1-26.
49. Chen S, Hua W, Li Z, Li J, Gao X. Heartbeat classification using projected and dynamic features of ECG signal. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2017, 31:165-173.
50. Marinho LB, de MM Nascimento N, Souza JWM, Gurgel MV, Reboucas Filho PP, de Albuquerque VHC. A novel electrocardiogram feature extraction approach for cardiac arrhythmia classification. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 97:564-577.
51. Li Y, He Z, Wang H, Li B, Li F, Gao Y, Ye X. CraftNet: a deep learning ensemble to diagnose cardiovascular diseases. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 62:102091.

**Анас Фуад Ахмед**

доцент

Иракский университет

**Багдад 6029, Ирак**

**E-mail: anasfuad33eng@yahoo.com**

**Хадил Н. Абдуллах**

доктор наук, проф.

Технологический университет

**Багдад 19006, Ирак**

**E-mail: 30002@uotechnology.edu.iq**

**Бараа М. Албакер**

доцент

Иракский университет

**Багдад 6029, Ирак**

**E-mail: baraamalbaker@ymail.com.**



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.067

## Исследование и разработка методов автоматического поиска признаков болезни Паркинсона и эссенциального тремора на основе АУС-диаграмм

<sup>1</sup>Сушкова О.С., <sup>1</sup>Морозов А.А., <sup>1</sup>Хохлова М.Н., <sup>1</sup>Кершнер И.А., <sup>2</sup>Габова А.В., <sup>3</sup>Чигалейчик Л.А., <sup>3</sup>Карабанов А.В.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, <http://ihna.ru/>  
Москва 117485, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБНУ "Научный центр неврологии", <https://www.neurology.ru/>  
Москва 125367, Российская Федерация

E-mail: [o.sushkova@mail.ru](mailto:o.sushkova@mail.ru), [morozov@cplire.ru](mailto:morozov@cplire.ru), [margokhokhlova@gmail.com](mailto:margokhokhlova@gmail.com), [ivan.kershner@gmail.com](mailto:ivan.kershner@gmail.com), [agabova@yandex.ru](mailto:agabova@yandex.ru), [chigalei4ick.lar@yandex.ru](mailto:chigalei4ick.lar@yandex.ru), [doctor.karabanov@mail.ru](mailto:doctor.karabanov@mail.ru)

Поступила 08.03.2024, рецензирована 11.03.2024, принята 13.03.2024, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН В.А. Черепениным

**Аннотация:** Исследованы и разработаны методы автоматического поиска признаков нейродегенеративных заболеваний "болезнь Паркинсона" и "эссенциальный тремор" на основе АУС-диаграмм и алгоритмов оптимизации. АУС-диаграммы являются новым методом статистического анализа биомедицинских сигналов, основанным на визуализации параметров всплескообразной электрической активности мозга и мышц. Эффективность этого метода была продемонстрирована при решении задач ранней и дифференциальной диагностики болезни Паркинсона и эссенциального тремора. Недостатком данного метода является необходимость построения и анализа большого количества графических диаграмм. В связи с этим, автоматизация анализа АУС-диаграмм является актуальной задачей. Математическая задача поиска признаков на основе анализа АУС-диаграмм сводится к задаче оптимизации в многомерном пространстве признаков. Отличительной особенностью пространства признаков, построенного с использованием АУС-диаграмм, является наличие сравнительно больших компактных областей, содержащих локальные максимумы и минимумы. Это свойство пространства признаков облегчает поиск решений задачи оптимизации, но при этом требует выбор алгоритмов оптимизации и целевых функций, повышающих вероятность обнаружения глобальных экстремумов. В данной работе исследованы и разработаны методы автоматического поиска глобальных экстремумов в многомерном пространстве признаков всплескообразной электрической активности.

**Ключевые слова:** методы оптимизации, робастность, АУС-диаграммы, ROC-анализ, всплеск, электромиограмма, болезнь Паркинсона, эссенциальный тремор, дифференциальная диагностика, признаки нейродегенеративных заболеваний

УДК 519.67, 612.8, 53.083, 519.24, 004.93

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Ю.В. Обухову, который предложил идею анализа локальных максимумов на вейвлет-спектрограммах, а также академику РАН С.Н. Иллариошкину за помощь в проведении исследований. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-75-10079, <https://rscf.ru/project/22-75-10079/>.

**Для цитирования:** Сушкова О.С., Морозов А.А., Хохлова М.Н., Кершнер И.А., Габова А.В., Чигалейчик Л.А., Карабанов А.В. Исследование и разработка методов автоматического поиска признаков болезни Паркинсона и эссенциального тремора на основе АУС-диаграмм. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):67-78. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.067.



## Investigation and development of methods for automatic search for AUC-diagram-based features of Parkinson's disease and essential tremor

**Olga S. Sushkova, Alexei A. Morozov, Margarita N. Khokhlova, Ivan A. Kershner**

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

*E-mail: o.sushkova@mail.ru, morozov@cplire.ru, margokhokhlova@gmail.com, ivan.kershner@gmail.com*

**Alexandra V. Gabova**

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, <http://ihna.ru/>

Moscow 117485, Russian Federation

*E-mail: agabova@yandex.ru*

**Larisa A. Chigaleychik, Alexei V. Karabanov**

Research Center of Neurology, <https://www.neurology.ru/>

Moscow 125367, Russian Federation

*E-mail: chigalei4ick.lar@yandex.ru, doctor.karabanov@mail.ru*

*Received March 08, 2024, peer-reviewed March 11, 2024, accepted March 13, 2024, published March 15, 2024.*

**Abstract:** Methods and optimization algorithms for automatic search for AUC-diagram-based features of Parkinson's disease and essential tremor were studied and developed. AUC diagrams are a new method for statistical analysis of biomedical signals, based on visualizing the parameters of wave train electrical activity in the brain and muscles. The effectiveness of this method has been demonstrated in solving problems of early and differential diagnosis of Parkinson's disease and essential tremor. The disadvantage of this method is the need to construct and analyze a large number of graphic diagrams. In this regard, automation of the analysis of AUC diagrams is an urgent task. The mathematical problem of finding features based on the analysis of AUC diagrams is reduced to an optimization problem in a multidimensional feature space. A distinctive feature of the space constructed using AUC diagrams is the presence of relatively large compact areas containing local maxima and minima. This property of the feature space facilitates the search for solutions to the optimization problem, but at the same time requires the selection of optimization algorithms and fitness functions that increase the likelihood of detecting global extrema. In this work, methods for automatically searching for global extrema in the multidimensional space of features of wave train electrical activity are investigated and developed.

**Keywords:** optimization methods, robustness, AUC diagrams, ROC analysis, wave train, electromyogram, Parkinson's disease, essential tremor, differential diagnosis, neurodegenerative disease features

**UDC 519.67, 612.8, 53.083, 519.24, 004.93**

**Acknowledgements:** The authors are grateful to Dr. Yu.V. Obukhov, who proposed the idea of analyzing local maxima on wavelet spectrograms, as well as Academician of the Russian Academy of Sciences S.N. Illarioshkin for help with the research. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-75-10079, <https://rscf.ru/en/project/22-75-10079/>.

**For citation:** Olga S. Sushkova, Alexei A. Morozov, Margarita N. Khokhlova, Ivan A. Kershner, Alexandra V. Gabova, Larisa A. Chigaleychik, Alexei V. Karabanov. Investigation and development of methods for automatic search for AUC-diagram-based features of Parkinson's disease and essential tremor. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):67-78e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.067.

## СОДЕРЖАНИЕ

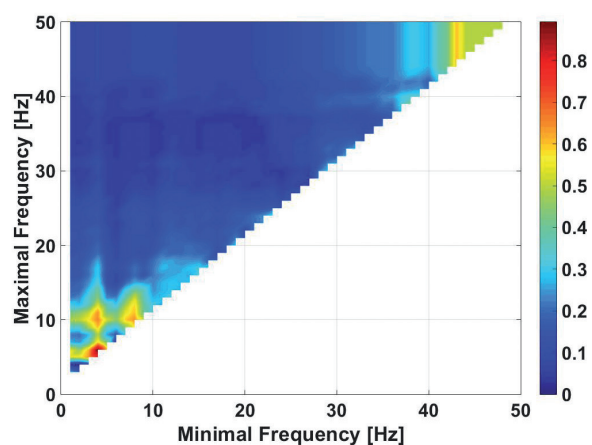
1. ВВЕДЕНИЕ (69)
  2. МЕТОД МНОГОМЕРНОГО БУРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ ВСПЛЕСКОВ (71)
  3. ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ РЕШЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ (73)
  4. ОБСУЖДЕНИЕ (75)
  5. ВЫВОДЫ (76)
- ЛИТЕРАТУРА (77)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является развитие метода анализа всплескообразной электрической активности [1-18], разработанного авторами для поиска закономерностей в биомедицинских сигналах. Идея анализа всплескообразной электрической активности заключается в том, чтобы соединить преимущества обычных спектров сигналов и их вейвлет-спектрограмм. Для этого на вейвлет-спектрограммах сигналов выделяются всплески (локальные максимумы), вычисляются характеристики этих всплесков, а именно, центральная частота всплеска, максимальная спектральная плотность мощности (СПМ) всплеска, длительность всплеска в секундах, длительность всплеска в периодах на центральной частоте, ширина полосы частот всплеска, нормированная на центральную частоту всплеска и мгновенная фаза всплеска. После этого методами математической статистики выявляются обобщённые свойства всплесков (например, диапазоны перечисленных параметров всплесков), характерные для исследуемой выборки сигналов или отличающие одну выборку сигналов от другой. Эффективность предложенного метода была продемонстрирована при решении задач ранней (доклинической) и дифференциальной диагностики нейродегенеративных заболеваний "болезнь Паркинсона" (БП) и "эссенциальный тремор" (ЭТ) [1-3,16,17], а также распознавания так называемых незрелых эпилептических разрядов у лабораторных животных [15,18]. Все примеры, рассмотренные в этой статье, основаны на анализе особой разновидности всплескообразной электрической активности – так называемых кросс-всплесков [3], которые являются локальными максимумами на кросс-спектрах огибающих электромиографических

(ЭМГ) сигналов на парных мышцах-антагонистах рук пациентов с ЭТ и пациентов с первой стадией БП.

Основным рабочим инструментом метода анализа всплескообразной электрической активности являются AUC-диаграммы [1-3]. AUC-диаграмма – это способ визуализации статистических закономерностей, отличающих две выборки сигналов. Для анализа разных параметров всплесков применяются разные виды AUC-диаграмм [2,3], однако принцип использования любой AUC-диаграммы сводится к тому, что создаётся двумерная диаграмма, по оси абсцисс которой отложено значение нижней границы исследуемого параметра всплеска, а по оси ординат – верхней границы этого параметра (см. пример на **Рис. 1**). Для каждого возможного сочетания нижней и верхней границ параметра всплеска на AUC-диаграмме с помощью цветовой шкалы показывается степень отличия одной выборки сигналов от другой. Степень отличия характеризуется площадью под ROC-кривой (area under curve, AUC), построенной для сравнения средних количеств всплесков (в секунду времени), обнаруженных в анализируемых выборках сигналов таких, что значение рассматриваемого параметра этих всплесков попадает в диапазон между рассматриваемыми нижней и верхней границами параметра (указанными на осях абсцисс и ординат диаграммы). Исторически сложилось так, что для



**Рис. 1.** Пример частотной AUC-диаграммы. Сравняются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов левых рук двух групп пациентов. Первая группа – пациенты с первой стадией БП с дебютом на левой руке (10 человек), вторая группа – пациенты с ЭТ (13 человек).

изображения AUC-диаграмм применяется синяя-красная цветовая шкала, поэтому значениям AUC, близким к 0, на диаграмме соответствуют синие области, а значениям AUC, близким к 1, – красные области. Для исследователя представляют интерес как синие, так и красные области на AUC-диаграмме. Синие области соответствуют диапазонам параметра всплеска, в которых количество всплесков в первой выборке меньше, чем во второй, а красные области – диапазонам, в которых количество всплесков в первой выборке больше, чем во второй. В данной статье мы будем придерживаться такой же терминологии. В частности, при автоматическом поиске признаков, отличающих выборки сигналов, мы будем говорить о "синих" и "красных" решениях оптимизационной задачи, соответствующих синим и красным областям, обнаруженным на AUC-диаграммах.

Поиск закономерностей в выборках сигналов с помощью AUC-диаграмм вручную представляет собой довольно трудоёмкий процесс. В ходе анализа данных исследователь создаёт AUC-диаграммы разных видов. При обнаружении на одной из диаграмм синей или красной области с хорошим значением AUC, исследователь принимает решение о более детальном изучении найденной области. На исследуемый параметр накладывается ограничение, соответствующее выбранной области на AUC-диаграмме, после чего AUC-диаграммы всех других видов приходится перестраивать и анализировать заново. Описанная последовательность действий повторяется итеративно до тех пор, пока наблюдаемые значения AUC не перестают улучшаться [2]. С точки зрения математического анализа, указанный алгоритм поиска закономерностей представляет собой решение оптимизационной задачи в двенадцатимерном пространстве (шесть параметров всплесков, у каждого есть нижняя и верхняя граница) посредством итеративного перемещения двумерных срезов этого пространства (то есть, AUC-диаграмм). На практике, для поиска признаков нейродегенеративного заболевания в выборке электроэнцефалографических (ЭЭГ) или электромиографических сигналов может потребоваться неделя или даже месяц ручного труда.

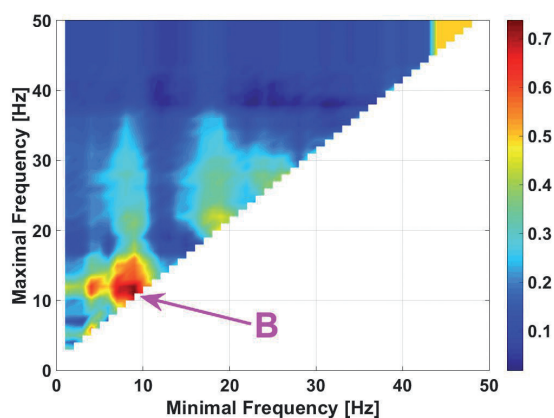
Конечно же, идея автоматического анализа AUC-диаграмм возникла с самого начала разработки метода анализа всплескообразной электрической активности. Анализ двенадцатимерного пространства параметров не является сложной задачей для современных алгоритмов оптимизации, поэтому мы надеялись автоматизировать поиск закономерностей в биомедицинских сигналах с помощью стандартных алгоритмов оптимизации [19], таких как имитация отжига [20], непосредственный поиск [21] и генетические алгоритмы [22]. Мы были очень наивны.

Первая проблема, с которой мы столкнулись при автоматическом поиске синих и красных областей на AUC-диаграммах, заключалась в том, что некоторые автоматически найденные диапазоны параметров всплесков, позволяющие различать выборки сигналов с очень хорошими значениями AUC (близкими к 0 или 1), переставали "работать" после того, как мы округляли значения границ этих диапазонов до одной-двух цифр после запятой. Мы назвали эту проблему "проблемой хрупких решений". Внимательное рассмотрение проблемы хрупких решений показало, что в двенадцатимерном пространстве параметров всплесков действительно существуют очень узкие области со значениями AUC близкими к 0 или 1, в окрестности которых AUC резко ухудшается и приближается к 0.5 (что означает невозможность отличить анализируемые выборки сигналов). При ручном анализе AUC-диаграмм человек, конечно же, избегает попадания в подобные области пространства параметров, ориентируясь, в основном, на синие и красные области сравнительно больших размеров. Стандартные алгоритмы оптимизации не располагают критериями оценки робастности (устойчивости к небольшим изменениям параметров) найденных решений и поэтому находят формально очень хорошие, но не пригодные для практического использования решения.

Вторая проблема, возникающая при автоматическом анализе AUC-диаграмм, – это большое количество вычисляемых решений. Конечно, с точки зрения практического использования параметров всплесков для распознавания и дифференциальной

диагностики нейродегенеративных заболеваний, можно просто взять некоторое количество хороших (в каком-либо смысле) решений и про остальные забыть. Однако если использовать AUC-диаграммы как исследовательский инструмент, необходимо каким-то образом сопоставить между собой и интерпретировать всю совокупность найденных решений в целом. Например, при анализе сигналов тремора рук пациентов с первой стадией БП, мы обнаружили, что AUC-диаграмма, сравнивающая группу пациентов с тремором на правой руке с группой пациентов с ЭТ (Рис. 2), существенно отличается от AUC-диаграммы, сравнивающей с ЭТ группу пациентов с БП с тремором на левой руке (Рис. 1). Возник вопрос, являются ли наблюдаемые отличия проявлением каких-то принципиально разных нейрофизиологических механизмов на правых и левых руках пациентов, или на обеих руках пациентов наблюдаются примерно одинаковые закономерности в разных пропорциях? Автоматический поиск выявил на AUC-диаграммах сотни решений, и это никак не облегчило ответ на поставленный вопрос.

К счастью, автоматические методы позволяют реализовать более сложные схемы анализа пространства параметров всплесков, чем простой поиск глобальных экстремумов, и мы можем воспользоваться ими для детального изучения структуры и свойств данного



**Рис. 2.** Пример частотной AUC-диаграммы. Сравняются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов правых рук двух групп пациентов. Первая группа – пациенты с первой стадией БП с дебютом на правой руке (12 человек), вторая группа – пациенты с ЭТ (13 человек). Стрелка указывает на большую красную область, отсутствующую на Рис. 1.

пространства. Во второй части статьи рассмотрен метод многомерного бурения пространства параметров всплесков, разработанный авторами для поиска и анализа локальных экстремумов в пространстве параметров всплесков. В третьей части статьи рассмотрена проблема оценки робастности решений задачи оптимизации и предложен критерий оценки робастности, основанный на физическом смысле пространства параметров всплесков. В четвёртой части статьи обсуждается применение разработанных средств статистического анализа для исследования клинических данных пациентов и разработки диагностических процедур.

## 2. МЕТОД МНОГОМЕРНОГО БУРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ ВСПЛЕСКОВ

Идея многомерного бурения пространства параметров всплесков заключается в том, чтобы увеличить выразительные возможности обычных AUC-диаграмм с помощью применения алгоритмов оптимизации. Улучшенные AUC-диаграммы (будем называть их AUC-Drilling-диаграммами) отличаются от обычных тем, что в каждой клеточке диаграммы вычисляется не просто значение AUC, а глобальный экстремум функции AUC в пространстве параметров всплесков. При поиске глобального экстремума алгоритму оптимизации разрешается варьировать все границы параметров всплесков, за исключением тех двух, которые соответствуют абсциссе и ординате рассматриваемой диаграммы. Указанные две границы параметров должны оставаться в пределах рассматриваемой клеточки на диаграмме.

На Рис. 3 идея многомерного бурения пространства параметров всплесков проиллюстрирована с помощью аналогии с бурением нефтяных скважин. На рисунке изображён трёхмерный куб (частный случай двенадцатимерного куба). Каждой грани этого куба можно поставить в соответствие некоторую AUC-Drilling-диаграмму; на рисунке в качестве таковой выбрана верхняя грань. Перпендикулярные рёбра верхней грани соответствуют осям абсцисс и ординат AUC-Drilling-диаграммы. В каждой клеточке верхней грани куба высверливается скважина, проходящая



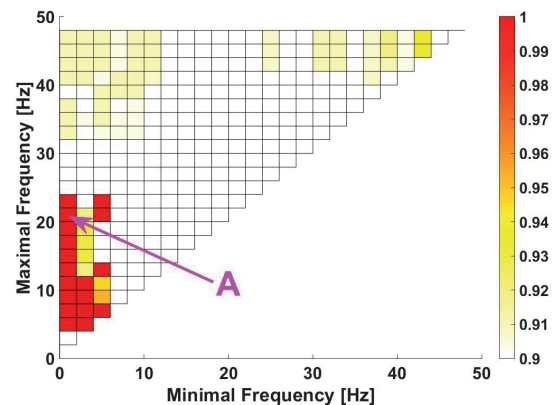


**Рис. 3.** Идея многомерного бурения пространства параметров всплесков.

через остальные десять измерений пространства, для того чтобы найти области пространства, в которых значения AUC близки к 0 или 1. В зависимости от того, какие именно решения оптимизационной задачи мы ищем, синие или красные, можно построить две разные AUC-Drilling-диаграммы – синюю или красную.

Первые же эксперименты с многомерным бурением показали, что результаты анализа ЭМГ-сигналов пациентов с БП и ЭТ разительно отличаются от того, что показывают обычные AUC-диаграммы. Если продолжить аналогию с добычей полезных ископаемых, то отличие между рассматриваемыми видами AUC-диаграмм примерно такое же, как между геологическими изысканиями на поверхности и разведочным бурением. Прежде всего, мы увидели, что в некоторых диапазонах частот существуют одновременно синие и красные решения с AUC близкими к 0 и 1. На обычных AUC-диаграммах эти решения могут перекрывать друг друга, и это не позволяет увидеть полную картину закономерностей пространства параметров всплесков. На AUC-Drilling-диаграммах синие и красные решения попадают на разные диаграммы, и мы можем изучать их независимо друг от друга.

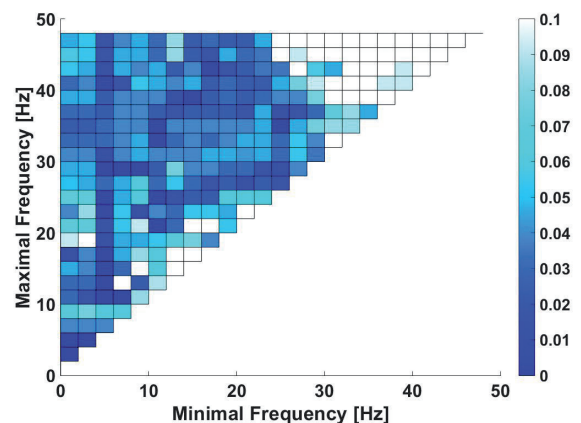
Например, на красной AUC-Drilling-диаграмме для левых рук пациентов была обнаружена красная область (см. **Рис. 4**, область A), невидимая на соответствующей AUC-диаграмме (Рис. 1) вследствие того, что



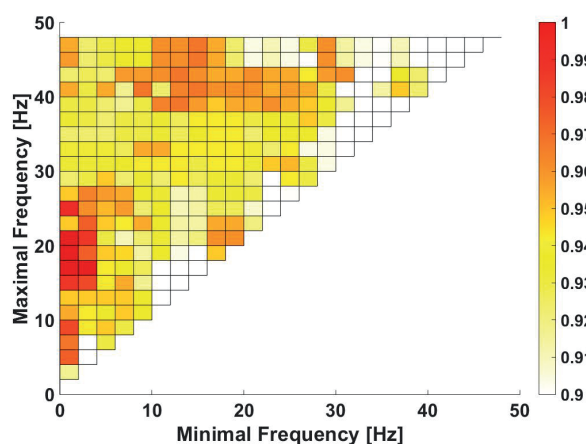
**Рис. 4.** Пример красной частотной AUC-Drilling-диаграммы. Сравниваются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов левых рук двух групп пациентов. Группы пациентов – те же, что на Рис. 1. Стрелкой обозначена красная область, невидимая на соответствующей AUC-диаграмме на Рис. 1 вследствие того, что её перекрывает некоторая синяя область. Для решения оптимизационной задачи здесь и далее применён алгоритм непосредственного поиска [21].

её перекрывает некоторая синяя область (см. **Рис. 5**).

В то же время, оказалось, что красные области на AUC-Drilling-диаграммах для правых (**Рис. 6**) и левых (Рис. 4) рук пациентов в области частот ниже 25 Гц имеют примерно одинаковую форму. Отличие красных областей на соответствующих AUC-диаграммах (см. Рис. 1 и 2) оказалось лишь кажущимся. В частности, большая красная область на AUC-диаграмме для правых рук пациентов (Рис. 2, область B) выделяется лишь потому, что



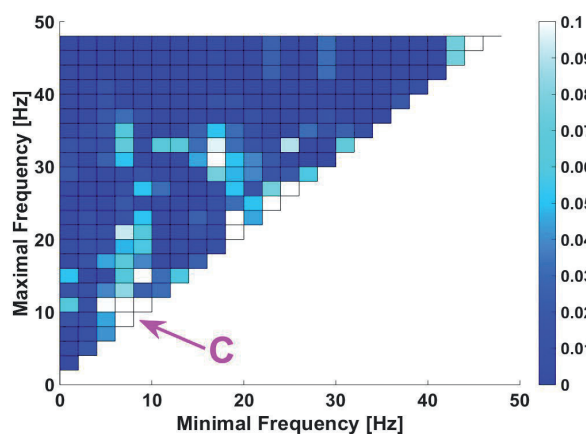
**Рис. 5.** Пример синей частотной AUC-Drilling-диаграммы. Сравниваются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов левых рук двух групп пациентов. Группы пациентов – те же, что на Рис. 1 и 4.



**Рис. 6.** Пример красной частотной AUC-Drilling-диаграммы. Сравняются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов правых рук двух групп пациентов. Группы пациентов – те же, что на Рис. 2.

в этой области частот практически отсутствуют синие решения (см. Рис. 7, область С).

Рассмотренные примеры AUC-Drilling-диаграмм позволяют высказать гипотезу о том, что тремор на левых и правых руках пациентов с БП и ЭТ управляется одними и теми же нейрофизиологическими механизмами, однако воздействие этих механизмов происходит с разной силой, что приводит к разной клинической картине. Данное наблюдение позволяет подтвердить вывод о том, что для диагностики пациентов с БП с левосторонним и правосторонним дебютом необходимо применять разные алгоритмы [3].



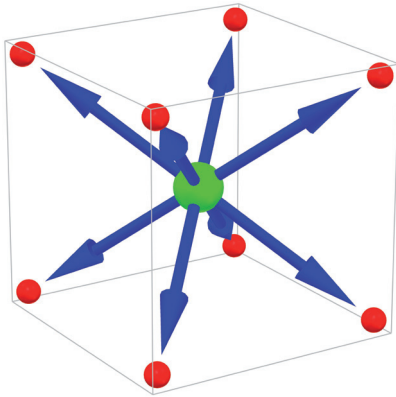
**Рис. 7.** Пример синей частотной AUC-Drilling-диаграммы. Сравняются огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов правых рук двух групп пациентов. Группы пациентов – те же, что на Рис. 2 и 6. Стрелкой обозначена область, в которой отсутствуют синие решения.

### 3. ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ РЕШЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Робастными решениями оптимизационной задачи называют такие точки в исследуемом пространстве параметров, которые обладают некоторой окрестностью, в которой решение остаётся хорошим в каком-то смысле [23-25]. В качестве количественной оценки робастности решения можно принять максимальный радиус  $R$  многомерного эллипсоида (радиус стабильности), окружающего рассматриваемое решение, внутри которого отсутствуют "плохие" решения. В рамках данного исследования, "плохими" мы будем считать такие решения, в которых значение AUC, по сравнению с AUC в центре эллипсоида, приблизилось к значению 0.5 более чем наполовину. Например, если рассматривается синее решение со значением AUC равным 0.1, количественной оценкой робастности этого решения будет считаться максимальный радиус эллипсоида, внутри которого значения AUC не превышают  $0.1 + (0.5 - 0.1)/2 = 0.3$ . Если рассматривается красное решение со значением AUC равным 0.9, количественной оценкой робастности этого решения будет считаться максимальный радиус эллипсоида, внутри которого значения AUC не ниже  $0.9 - (0.9 - 0.5)/2 = 0.7$ . Заметим, что разным осям координат в пространстве параметров всплесков соответствуют разные единицы измерения, поэтому измерять радиус эллипсоида в абсолютных единицах нет смысла. Мы будем измерять радиус эллипсоида в процентах от значений координат центра эллипсоида.

К сожалению, двенадцатимерное пространство параметров всплесков не имеет аналитического описания, поэтому единственным инструментом, доступным для оценки робастности синих и красных решений в пространстве параметров всплесков является вычислительный эксперимент. В качестве окрестности рассматриваемого решения также приходится применять модели.

В настоящее время мы используем следующую модель окрестности решения оптимизационной задачи. Рассматриваемое решение  $S$  является точкой в двенадцатимерном пространстве и может быть описано с помощью вектора из двенадцати координат  $\langle S_1, \dots, S_{12} \rangle$ .

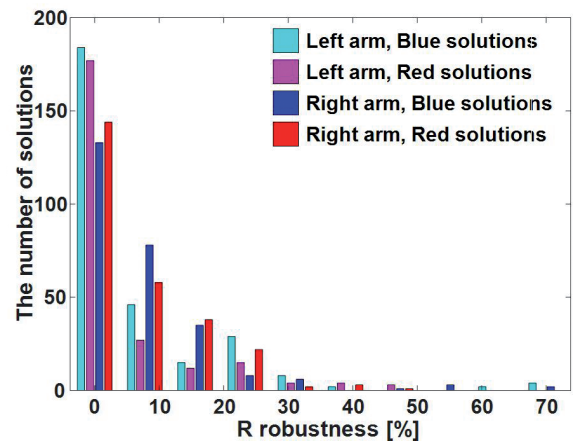


**Рис. 8.** Модель окрестности (двенадцатимерного эллипсоида) решения оптимизационной задачи в пространстве параметров всплесков. На рисунке изображены только три измерения эллипсоида.

Моделью окрестности (эллипсоида) радиуса  $R$  решения  $S$  в пространстве параметров мы называем множество всех точек  $P$  таких, что каждая координата  $P_i$  точки отличается от соответствующей координаты  $S_i$  исследуемого решения на величину  $R$  или  $-R$  (см. **Рис. 8**).

Заметим, что описанная модель эллипсоида является лишь грубым приближением к точному описанию совокупности точек, находящихся в окрестности решения, однако применение этой упрощённой модели позволяет существенно сократить вычислительные ресурсы, необходимые для проведения вычислительных экспериментов, и при этом даёт возможность получить общие представления о свойствах решений оптимизационной задачи.

На **Рис. 9** приведены гистограммы количественных оценок робастности решений оптимизационной задачи, найденных при построении частотных AUC-Drilling-диаграмм, сравнивающих огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов групп пациентов с первой стадией БП и пациентов с ЭТ, приведённых на Рис. 4-7. Гистограммы на Рис. 9 показывают, что значительное число решений имеют робастность, близкую к 0. И это притом, что модель многомерного эллипсоида (Рис. 8), очевидно, склонна к завышению оценок робастности решений, так как учитывает не все точки, прилегающие к исследуемому решению в пространстве параметров всплесков. Это означает, что наличие "хрупких" решений, к сожалению, является одним из неотъемлемых свойств пространства параметров всплесков, и



**Рис. 9.** Гистограммы количественных оценок  $R$  робастности решений оптимизационной задачи при построении частотных AUC-Drilling-диаграмм, сравнивающих огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов групп пациентов с первой стадией БП и пациентов с ЭТ.

его необходимо учитывать при решении задач медицинской диагностики.

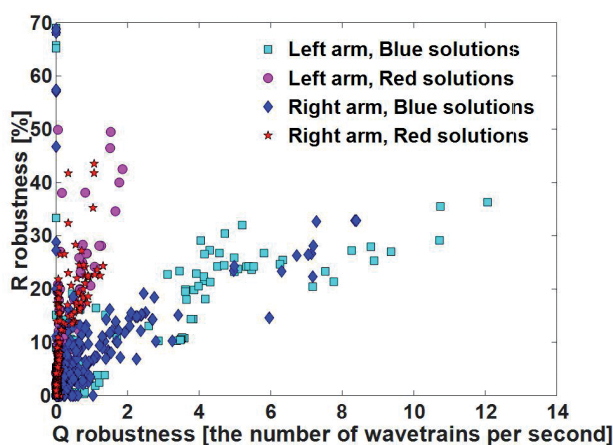
Одним из уникальных свойств пространства параметров всплесков является то, что каждая точка в этом пространстве имеет простой физический смысл, а именно, среднее количество  $Q_1$  и  $Q_2$  всплесков в секунду, наблюдаемых в первой и второй выборках сигналов соответственно, значения параметров которых попадают в диапазоны параметров, соответствующие рассматриваемой точке пространства. Это открывает возможности для разработки новых методов оценки робастности решений оптимизационной задачи, не основанных на понятии "радиус стабильности" и других геометрических аналогиях.

В качестве оценки робастности решения авторами было предложено использовать максимальное среднее количество всплесков, наблюдаемых в рассматриваемых выборках сигналов,  $Q = \max(Q_1, Q_2)$ . Идея оценки робастности  $Q$  основана на эмпирическом наблюдении, сделанном при изучении пространства параметров всплесков. Оказалось, что хрупкие решения часто возникают в точках пространства, накладывающих сильные ограничения на какие-либо параметры всплесков. В таких точках пространства количество наблюдаемых всплесков снижается до единиц всплесков в десятке или даже сотне секунд.



Следствием этого становится то, что резко увеличивается вероятность, что в данной точке пространства отношение количеств всплесков, наблюдаемых в двух исследуемых выборках сигналов, может существенно измениться из-за случайных флуктуаций количества всплесков. В результате мы получаем решение с очень хорошим значением AUC, близким к 0 или 1, которое перестаёт "работать" при малейшем изменении границ параметров.

Исследование корреляционной зависимости между оценками робастности  $Q$  и  $R$  на экспериментальных данных подтвердило, что обе оценки дают похожие результаты (см. **Рис. 10**). В частности, оказалось, что ранговая корреляция Спирмена между оценками  $Q$  и  $R$  равна 0.6-0.8 с высоким уровнем значимости ( $p < 0.001$ ) при сравнении как правых, так и левых рук пациентов, как для красных, так и для синих решений оптимизационной задачи. Интересно, что значительная часть решений не укладываются в указанную закономерность и демонстрируют высокие оценки робастности  $R$  при значениях метрики  $Q$  близких к нулю (точки, расположенные около оси ординат на Рис. 10). Это свидетельствует о потенциальной опасности применения радиуса стабильности и подобных ему геометрических оценок робастности, так как они не всегда могут выявить потенциально хрупкие решения.



**Рис. 10.** Корреляционная связь между оценками робастности  $Q$  и  $R$  решений оптимизационной задачи при построении частотных AUC-Drilling-диаграмм, сравнивающих огибающие ЭМГ-сигналов парных мышц-антагонистов групп пациентов с первой стадией БП и пациентов с ЭТ.

Существенным преимуществом оценки робастности  $Q$ , по сравнению с оценкой  $R$ , является её вычислительная простота. Оценка количества всплесков, значения параметров которых попадают в рассматриваемые интервалы, является промежуточным этапом вычисления AUC, поэтому проверка каких-либо ограничений на величину  $Q$  может быть добавлена в целевую функцию алгоритма оптимизации без дополнительных вычислительных затрат. С оценкой робастности  $R$  ситуация выглядит совершенно иначе, потому что дополнительная проверка окрестности решений, оцениваемых оптимизационным алгоритмом, существенно увеличивает время решения оптимизационной задачи.

В настоящее время мы применяем ограничение на оценку  $Q$  непосредственно в ходе многомерного бурения пространства параметров всплесков, а затем осуществляем дополнительную проверку робастности найденных решений с помощью метрик  $Q$  и  $R$ . В частности, при вычислении AUC-Drilling-диаграмм, приведённых на Рис. 4-7, было применено дополнительное условие  $Q \geq 0.5$ . В ходе последующей проверки найденных решений могут быть установлены ограничения на величину метрик AUC,  $Q$ ,  $R$  и другие характеристики решений.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

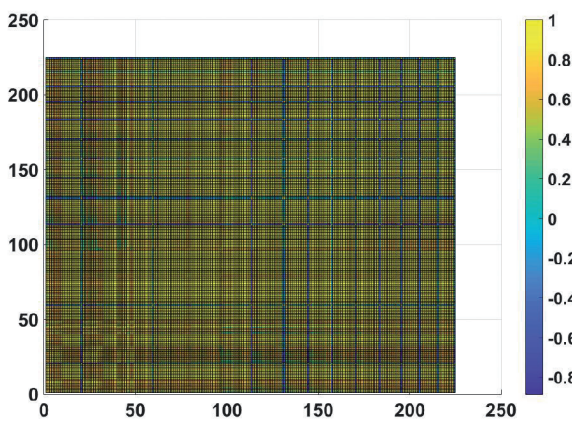
Эксперименты с клиническими данными показали, что с помощью метода многомерного бурения пространства параметров всплесков можно вычислить несколько десятков или даже сотен решений оптимизационной задачи, обладающих высокой робастностью и пригодных к клинической диагностике пациентов. Возникает закономерный вопрос, есть ли какой-то смысл анализировать такое количество решений? Какая от них может быть польза для изучения нейрофизиологических механизмов нейродегенеративных заболеваний? Нужно ли использовать все найденные решения для клинической диагностики, и какая опасность кроется в применении большого количества решений? Конечно, эти вопросы являются предметом для дальнейших исследований, однако уже сейчас мы можем высказать некоторые



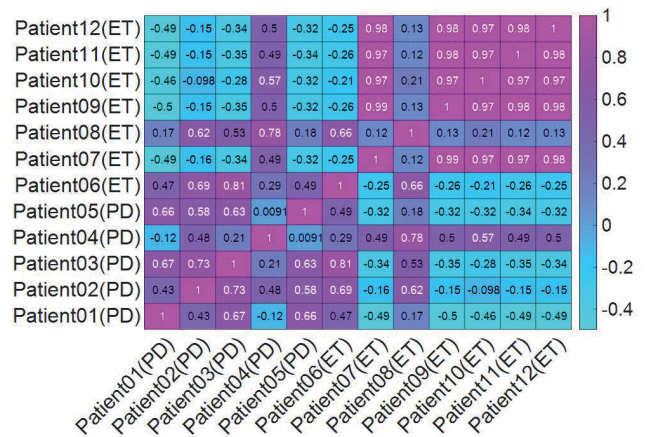
замечания, основанные на опыте исследования клинических данных пациентов.

Как правило, множество решений, вычисленных методом многомерного бурения, довольно неоднородно. На Рис. 10 приведён пример корреляционной матрицы 225 решений, каждое из которых характеризуется вектором из 12 чисел – значений среднего количества всплесков в секунду, удовлетворяющих соответствующему решению, наблюдаемых у пациента с ЭТ или пациента с первой стадией БП с дебютом на левой руке. В данном примере рассматриваются только красные решения. На Рис. 11 видно, что некоторые решения дают примерно одинаковые результаты, а некоторые – совершенно разные. Это означает, что комбинирование некоторых решений может существенно увеличить точность диагностики пациентов. При этом, однако, комбинирование похожих друг на друга решений способно привести к переобучению диагностической процедуры, то есть, очень уверенному диагностированию пациентов, включённых в обучающую выборку, и плохому распознаванию новых пациентов.

Сравнение количества всплесков, удовлетворяющих разным решениям, даёт возможность исследователю оценить однородность выборки пациентов, а врачу



**Рис. 11.** Корреляционная матрица 225 решений оптимизационной задачи, полученных методом многомерного бурения пространства параметров всплесков группы пациентов с первой стадией БП с дебютом на левой руке (5 человек) и пациентов с ЭТ (7 человек). Каждое решение характеризуется вектором 12 значений среднего количества всплесков в секунду, выявленных у соответствующего пациента.



**Рис. 12.** Корреляционная матрица группы пациентов с БП и пациентов с ЭТ, рассмотренной на Рис. 11. Каждый пациент характеризуется вектором 225 значений среднего количества всплесков в секунду, удовлетворяющих некоторым 225 решениям оптимизационной задачи. Корреляционная матрица показывает, в частности, что диагноз пациента необходимо перепроверить.

– верифицировать диагноз отдельно взятого пациента. Рассмотрим, пример корреляционной матрицы группы пациентов на Рис. 12. Корреляционная матрица наглядно показывает, что пациенты с диагнозом БП отличаются от пациентов с диагнозом ЭТ. Хотя, в некоторых случаях, параметры ЭМГ пациента больше похожи на параметры ЭМГ пациентов с другим диагнозом. Конечно, это является поводом для того, чтобы ещё раз внимательно изучить клинические данные пациента и, возможно, провести дополнительные анализы.

## 5. ВЫВОДЫ

Основная идея метода анализа всплескообразной электрической активности заключается в статистическом анализе и поиске закономерностей в параметрах локальных максимумов (всплесков), выявленных на вейвлет-спектрограммах сигналов. Метод является универсальным и может быть применён для исследования биомедицинских сигналов разных видов, включая ЭЭГ, ЭМГ и сигналы акселерометра.

AUC-диаграммы являются основным рабочим инструментом метода анализа всплескообразной электрической активности. Новый вид AUC-диаграмм, описанный в статье, сочетает в себе средства визуализации параметров

всплесков и средства автоматического поиска закономерностей в пространстве параметров всплесков. Этот статистический инструмент будет полезен как для исследования нейрофизиологических механизмов, влияющих на клиническое состояние пациента, так и для решения практических задач выявления диагностических признаков нейродегенеративных заболеваний и разработки диагностических алгоритмов.

Рассмотрена проблема "хрупких решений", обнаруженная в ходе исследования клинических данных пациентов. Предложены два принципиально разных подхода к оценке робастности решений оптимизационной задачи, вычисляемых в ходе анализа пространства параметров всплесков. Первый подход основан на вычислении радиуса стабильности исследуемого решения. Второй подход основан на физическом смысле пространства параметров всплесков. Проведено сравнение оценок робастности решений оптимизационной задачи, основанных на двух указанных принципах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сушкова ОС, Морозов АА, Габова АВ, Карабанов АВ. Применение метода анализа всплескообразной электрической активности мозга для выявления особенностей ЭЭГ пациентов на ранней стадии болезни Паркинсона. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*, 2018, 118(7):45-48.
2. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV, Illarioshkin SN. A statistical method for exploratory data analysis based on 2D and 3D area under curve diagrams: Parkinson's disease investigation. *Sensors*, 2021, 21(14):4700. DOI: 10.3390/s21144700.
3. Sushkova OS, Morozov AA, Kershner IA, Khokhlova MN, Gabova AV, Karabanov AV, Chigaleichick LA, Illarioshkin SN. Investigation of phase shifts using AUC diagrams: application to differential diagnosis of Parkinson's disease and essential tremor. *Sensors*, 2023, 23(3):1531. DOI: 10.3390/s23031531.
4. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV. A method of analysis of EEG wave trains in early stages of Parkinson's disease. *International Conference on Bioinformatics and Systems Biology (BSB-2016)*. Allahabad, Indian Institute of Information Technology, 2016. DOI: 10.1109/BSB.2016.7552163.
5. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV. Data mining in EEG wave trains in early stages of Parkinson's disease. *Advances in Soft Computing, MICAI 2016*. Springer, 2017, V. 10062 LNAI:403-412.
6. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV. EEG beta wave trains are not the second harmonic of mu wave trains in Parkinson's disease patients. *International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2017)*, Samara, CEUR, 2017, 1901:226-234.
7. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV. Investigation of specificity of Parkinson's disease features obtained using the method of cerebral cortex electrical activity analysis based on wave trains. *13th International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems*, India, Jaipur: MNIT, 2017, p. 168-172.
8. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV. Investigation of surface EMG and acceleration signals of limbs' tremor in Parkinson's disease patients using the method of electrical activity analysis based on wave trains. *Advances in Artificial Intelligence: IBERAMIA 2018*. Springer, 2018, V. 11238 LNAI:253-264.
9. Сушкова ОС, Морозов АА, Габова АВ, Карабанов АВ, Чигалейчик ЛА. Исследование низкочастотного диапазона 0.5-4 Гц всплескообразной электрической активности мышц у пациентов с болезнью Паркинсона и эссенциальным тремором. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(2):225-236. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.225.
10. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV. Investigation of the multiple comparisons problem in the analysis of the wave train electrical activity of muscles in Parkinson's disease patients. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1368(5):052004.
11. Sushkova OS, Morozov AA, Kershner IA, Petrova NG, Gabova AV, Chigaleichick LA, Karabanov AV. Investigation of distribution laws of the phase difference of the envelopes of electromyograms of antagonist muscles in Parkinson's disease and essential tremor patients. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2020, 12(3):415-428. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.415.
12. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV, Chigaleychik LA. An investigation of accelerometer signals in the 0.5-4 Hz range in Parkinson's disease and essential tremor patients. *Advances in Intelligent Systems and Computing, International Conference on Frontiers in Computing and Systems (COMSYS-2020)*, Jalpaiguri Government Engineering College, West Bengal, India, January 13-15, 2020. Springer, Singapore, 2021, 1255:455-462.

13. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV. Development of a method for early and differential diagnosis of Parkinson's disease and essential tremor based on analysis of wave train electrical activity of muscles. *Information Technology and Nanotechnology* (ITNT-2020), Samara, Russia, 2020. Washington: IEEE Xplore Digital Library, 2020, p. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253237.
14. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Kershner IA, Chigaleychik LA, Karabanov AV. Investigation of phase analysis methods of antagonist muscles electromyograms in patients with neurodegenerative diseases. *Information Technology and Nanotechnology* (ITNT-2021), Samara, Russia, 2021. Washington: IEEE Xplore Digital Library, 2021, p. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649193.
15. Sushkova OS, Morozov AA, Petrova NG, Khokhlova MN, Gabova AV, Karabanov AV, Chigaleychik LA, Sarkisova KY. Method of wave train electrical activity analysis – the theoretical basis and application. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(3):317-330. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.317.
16. Сушкова ОС, Морозов АА, Габова АВ, Карабанов АВ. Способ дифференциальной диагностики эссенциального тремора и ранней и первой стадий болезни Паркинсона с помощью анализа всплескообразной активности мышц. *Патент РФ No. RU 2741233 C1*, 22 января 2021.
17. Сушкова ОС, Морозов АА, Габова АВ, Карабанов АВ, Чигалейчик ЛА, Иллариошкин СН. Способ дифференциальной диагностики эссенциального тремора и первой стадии болезни Паркинсона с помощью анализа всплесков на кросс-вейвлет спектре электромиографических сигналов мышц-антагонистов. *Патент РФ No. RU 2797878 C1*, 9 июля 2023.
18. Сушкова ОС, Морозов АА, Габова АВ, Саркисова КЮ. Способ обнаружения незрелых разрядов при эпилепсии у лабораторных крыс с помощью анализа всплескообразной электрической активности мозга. *Патент РФ No. RU 2781622 C1*, 17 октября 2022.
19. Audet C, Hare W. *Derivative-free and blackbox optimization*. Springer, 2017.
20. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): lessons learned. *Control and Cybernetics*, 1996, 25(1):33-54.
21. Audet C, Dennis JJ. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on optimization*, 2002, 13(3):889-903.
22. Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
23. Zlobec S. Characterizing optimality in mathematical programming models. *Acta Applicandae Mathematicae*, 1988, 12:113-180.
24. Sniedovich M. Fooled by local robustness. *Risk Analysis. An International Journal*, 2012, 32(10):1630-1637.
25. Ben-Tal A, El Ghaoui L, Nemirovski A. *Robust optimization*. Princeton University Press, 2021.
- Сушкова Ольга Сергеевна**  
к.т.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
E-mail: o.sushkova@mail.ru
- Морозов Алексей Александрович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
E-mail: morozov@cplire.ru
- Хохлова Маргарита Николаевна**  
н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
E-mail: margokhokhlova@gmail.com
- Кершнер Иван Андреевич**  
м.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
E-mail: ivan.kershner@gmail.com
- Габова Александра Васильевна**  
к.б.н., с.н.с.  
ИВНД и НФ РАН  
5А, ул. Бутлерова, Москва 117485, Россия  
E-mail: agabova@yandex.ru
- Чигалейчик Лариса Анатольевна**  
к.м.н., с.н.с.  
ФГБНУ «Научный центр неврологии»  
80, Волоколамское шоссе, Москва 125367, Россия  
E-mail: chigalei4ick.lar@yandex.ru
- Карабанов Алексей Вячеславович**  
к.м.н., с.н.с.  
ФГБНУ «Научный центр неврологии»  
80, Волоколамское шоссе, Москва 125367, Россия  
E-mail: doctor.karabanov@mail.ru.



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.079

## Треки странного излучения. Их свойства. Попытка объяснения

<sup>1</sup>Пархомов А.Г., <sup>2</sup>Жигалов В.А., <sup>3</sup>Неволин В.К.

<sup>1</sup>Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."

Москва 121108, Российская Федерация

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, <https://satbayev.university.ru/>

Алматы 050013, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Московский институт электронной техники, <https://www.miet.ru/>

Зеленоград 124498, Москва, Российская Федерация

E-mail: alexparb@mail.ru, zhigalov@gmail.com, vkn@miec.ru

Поступила 29.09.2023, рецензирована 06.10.2023, принята 13.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Корниловой

**Аннотация:** Дается краткое описание обнаруженных свойств треков, возникающих около установок, в которых протекают LENR процессы. Излагается гипотеза, объясняющая, откуда берутся частицы, "рисующие" треки, почему рисунки треков неповторимы, почему интенсивность появления треков непостоянна. Описаны эксперименты, подтверждающие эту гипотезу.

**Ключевые слова:** LENR, странное излучение, треки, капельные треки, микрократеры, пыль, электрический заряд, рентгеновское излучение, электроны ОЖЕ, пьезоэлектрики

**УДК 53.043**

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность С.Г. Черноок и Л.А. Барсукову за РЭМ и АСМ исследования, А.И. Климову, А.И. Никитину, А.В. Чистолинову, В.Ф. Певцову, А.Г. Соболеву за полезные обсуждения.

**Для цитирования:** Пархомов А.Г., Жигалов В.А., Неволин В.К. Треки странного излучения. Их свойства. Попытка объяснения. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):79-88. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.079.

## Tracks of strange radiation. Their properties. An attempt at explanation

Alexander G. Parkhomov

KIT Experimental Design Laboratory

Moscow 121108, Russian Federation

E-mail: alexparb@mail.ru

Vladislav A. Zhigalov

Kazakh Satpayev National Research Technical University, <https://satbayev.university/en/>

Almaty 050013, Republic of Kazakhstan

E-mail: zhigalov@gmail.com

Vladimir K. Nevolin

Moscow Institute of Electronic Technology, <https://eng.miet.ru/>

Moscow, Zelenograd 124498, Russian Federation

E-mail: vkn@miec.ru

Received September 29, 2023, peer-reviewed October 06, 2023, accepted October 13, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** A brief description is given of the discovered properties of tracks that appear near installations in which LENR processes occur. A hypothesis is presented that explains where the particles that "draw" the tracks come from, why the patterns of the tracks are unique, and why the intensity of the appearance of the tracks is not constant. Experiments confirming this hypothesis are described.



**Keywords:** LENR, strange radiation, tracks, droplet tracks, microcraters, dust, electric charge, X-ray radiation, Auger electrons, piezoelectrics

**UGC 53.043**

**Acknowledgments:** The authors express gratitude to S.G. Chernook and L.A. Barsukov for SEM and AFM studies, A.I. Klimov, A.I. Nikitin, A.V. Chistolinov, V.F. Pevtsov, A.G. Sobolev for useful discussions.

**For citation:** Alexander G. Parkhomov, Vladislav A. Zhigalov, Vladimir K. Nevolin. Tracks of strange radiation. Their properties. An attempt at explanation. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):79-88e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.079.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (80)
2. ТИПЫ ТРЕКОВ (81)
  - 2.1. ГЛАДКИЕ ТРЕКИ (81)
  - 2.2. ТРЕКИ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМСЯ СЛОЖНЫМ РИСУНКОМ (81)
  - 2.3. ТРЕКИ, ВДОЛЬ КОТОРЫХ ПРОИСХОДИТ РАСТРЕСКИВАНИЕ И РАЗБРАСЫВАНИЕ (82)
  - 2.4. ТРЕКИ В ВИДЕ ЦЕПОЧЕК КРУГЛЫХ ПЯТЕН ("КАПЕЛЬНЫЕ ТРЕКИ") (82)
  - 2.5. МИКРОКРАТЕРЫ (82)
3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ТРЕКОВ СТРАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (82)
  - 3.1. ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО LENR-РЕАКТОРОВ. ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ (82)
  - 3.2. ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭКРАНИРОВАНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ ДЕТЕКТОРОВ (83)
  - 3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА В ТРЕКАХ (83)
4. ГИПОТЕЗА О ПРИРОДЕ ТРЕКОВ СТРАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (83)
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ (85)
  - 5.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАЧЕНИЯ ПЫЛИНОК ПО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТЕКТОРА (85)
    - 5.1.1. ТРЕКИ НА DVD (85)
    - 5.1.2. ТРЕКИ НА СТЕКЛЕ (85)
    - 5.1.3. ТРЕКИ НА ФОТОЭМУЛЬСИИ (86)
  - 5.2. БОЛЬШАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕКОВ ПРИ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛЕПОДОБНЫХ ЧАСТИЦ (86)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (87)

## ЛИТЕРАТУРА (87)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Явление, получившее название "треки странного излучения" (ТСИ) было впервые подробно описано в статье, посвященной эффектам,

обнаруженным при электрических взрывах фольг [1], хотя подобные треки исследователи LENR (low energy nuclear reaction – ядерные реакции при низких энергиях) наблюдали и раньше [2,3,4]. В исследовании [1] в качестве детекторов были использованы фотоэмульсии. Обнаруженные следы были не похожи на треки, образуемые заряженными частицами высокой энергии, прежде всего очень большой длиной (до нескольких миллиметров). Форма обнаруженных треков различная: непрерывные прямые или изогнутые треки, треки с изломами, треки со сложным периодически повторяющимся рисунком. Все треки расположены строго вдоль поверхности. Оценка выделения энергии в треках дала величину ~1000 МэВ (частицы, возникающие в ядерных реакциях, имеют энергию ~1 МэВ). Отметим, что эффектами странного излучения являются не только протяженные треки, но и микрократеры [5].

В опытно-конструкторской лаборатории "КИТ" в 2015-2022 гг. были созданы LENR-реакторы разных типов (никель-водородные, с лампами накаливания, с электролизом и плазменным электролизом) [6-13]. Некоторые из них непрерывно работали длительное время (до 7 месяцев). Длительность и стабильность работы реакторов позволили проводить систематические исследования ТСИ, исследуя не только вид конкретных треков, но и скорость их появления на поверхности детекторов, зависимость от расстояния и динамику во времени.

Первоначально для исследования ТСИ использовались детекторы, применявшиеся в ядернофизических экспериментах для регистрации заряженных частиц высокой энергии: фотоплёнки, рентгеновские плёнки и ядерные фотоэмульсии. Но вскоре было обнаружено, что ТСИ появляются также на гладких поверхностях практически любого

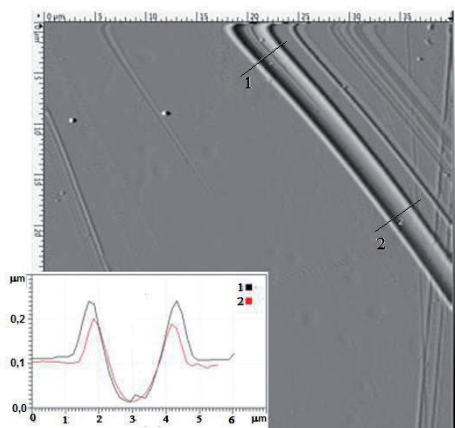
вещества. В ОКЛ "КИТ", помимо детекторов с фотоэмульсией, были испытаны стекло, слюда, металлы, пластмассы и детекторы из ряда других материалов. Большинство экспериментов сделано с использованием в качестве детекторов CD и DVD дисков (поликарбонат). Свежие диски имеют очень гладкую поверхность без царапин и легкодоступны в большом количестве, что даёт возможность повысить статистическую достоверность получаемых результатов. Для исследования формы треков использовались методы оптической, растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии.

Эта статья не ставит целью детальное описание методики проведённых исследований и массива полученных данных, так как они изложены в публикациях [14-19]. Здесь приведены лишь наиболее важные результаты и основные выводы, вытекающие из проведённых разнообразных исследований. Мы систематизируем типы треков, даём анализ полученных результатов, и на основе выявленных закономерностей формулируем гипотезу, объясняющую основные экспериментально обнаруженные свойства ТСИ.

## 2. ТИПЫ ТРЕКОВ

### 2.1. Гладкие треки

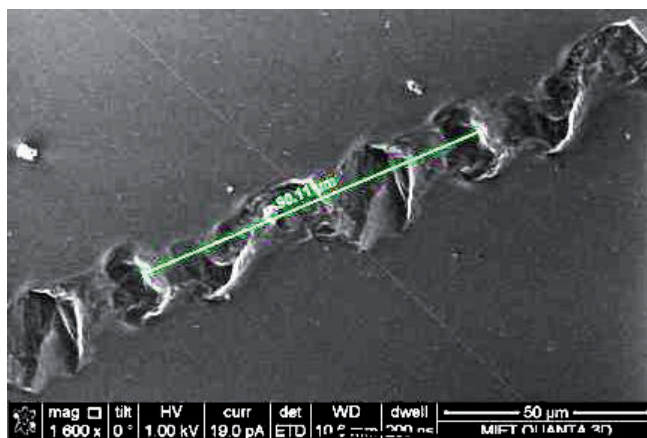
Гладкие треки (Рис. 1) преобладают в пластичных легкоплавких материалах (пластмассы, желатин в фотоэмульсии). Такие треки имеют вид канавок глубиной около 0.1 мкм шириной несколько мкм. По бокам видны выступы высотой примерно равной глубине канавки (вероятно, выдавленный материал).



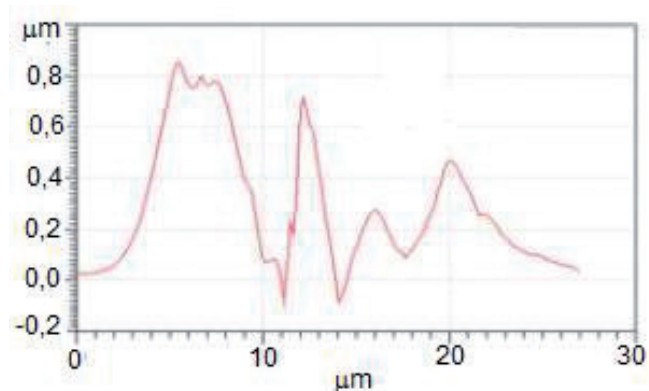
**Рис. 1.** "Гладкие" треки на поликарбонате. Изображение, полученное методом атомно-силовой (АСМ) микроскопии [18,19].

### 2.2. Треки с периодически повторяющимся сложным рисунком

Обнаружены треки с периодом от 44 до 200 мкм. В каждом треке такого типа рисунок уникален (Рис. 2). Возникают как в пластичных материалах, так и умеренно твёрдых и теплостойких (стекло, металлы). Профиль поперечного сечения таких треков имеет сложный характер (Рис. 3). Иногда можно наблюдать переход гладкого трека в периодический (Рис. 4).



**Рис. 2.** Фрагмент типичного трека с периодически повторяющимся рисунком на поверхности поликарбоната (РЭМ). Период около 90 мкм [18,19].



**Рис. 3.** Пример АСМ профилограммы поперечного сечения одного из участков периодического трека на поликарбонате [18,19].



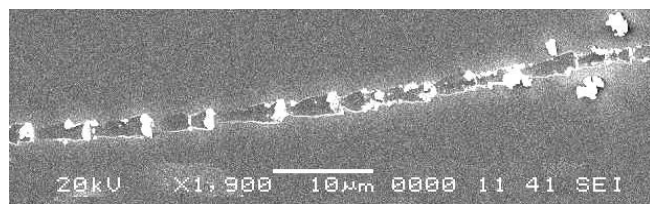
**Рис. 4.** Переход периодического трека (период 45 мкм) в гладкий (или наоборот). Поликарбонат. Оптический микроскоп [15].



**Рис. 5.** Фрагмент трека на стекле. Оптический микроскоп. Узор трека повторяется с периодом около 70 мкм. Светлые участки, возможно, трещины в стекле [22].

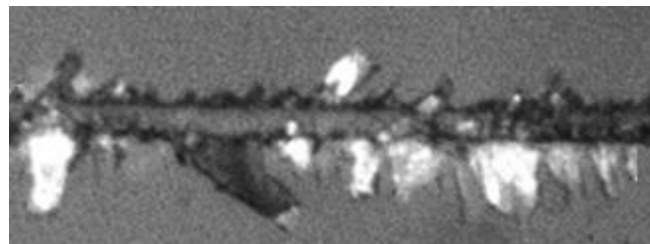
### 2.3. ТРЕКИ, ВДОЛЬ КОТОРЫХ ПРОИСХОДИТ РАСТРЕСКИВАНИЕ И РАЗБРАСЫВАНИЕ

Возникают в хрупких теплостойких материалах (слюда, стекло, керамика и др.).



**Рис. 6.** Пример трека на слюде (РЭМ) [15,17].

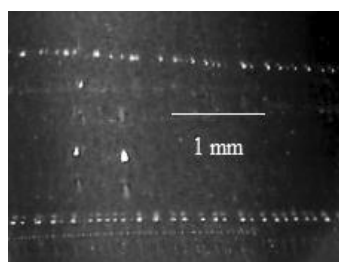
Треки на слюде представляют собой протяженные следы разрушения поверхности, как будто захваченный материал сгребается и затем периодически оставляется на дальнейшем пути. Рядом с треками на поверхности слюды видны мелкие частицы слюды, возможно, выброшенные из трека.



**Рис. 7.** Треки на поверхности ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  сопровождаются многочисленными трещинами. Оптический микроскоп [22].

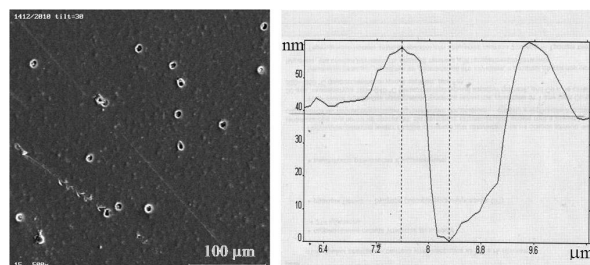
### 2.4. ТРЕКИ В ВИДЕ ЦЕПОЧЕК КРУГЛЫХ ПЯТЕН ("КАПЕЛЬНЫЕ ТРЕКИ")

Обнаружены около электролизных установок.



**Рис. 8.** "Капельные" треки на DVD дисках около электролитической ячейки  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с никелевыми электродами [12].

### 2.5. МИКРОКРАТЕРЫ



**Рис. 9.** Слева: микрократеры и треки, обнаруженные на рентгеновской плёнке, расположенной около кавитационной установки. Справа: АСМ профилеграмма одного из микрократеров. Этот микрократер имеет диаметр около 1.1 мкм и глубину 38 нм, измеренную от плоскости пленки [5].

## 3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ТРЕКОВ СТРАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 3.1. ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО LENR-РЕАКТОРОВ. ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ

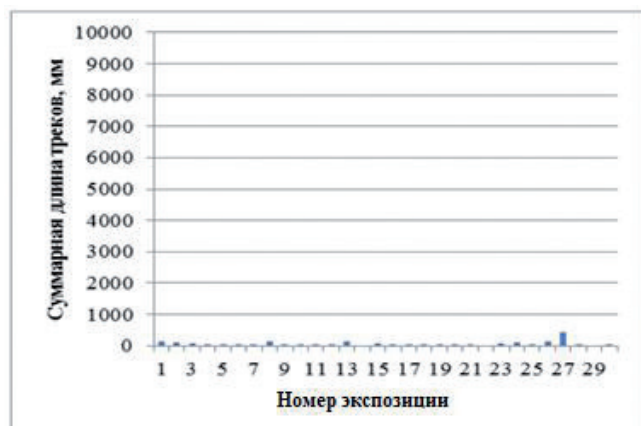
Для численной оценки интенсивности появления треков использован метод подсчета суммарной длины треков и сравнение полученных значений опытных образцов с контролем [14-16]. Обычная продолжительность каждой экспозиции 1 неделя. Ввиду того, что размеры детекторов сопоставимы с размером области, в которой наблюдается появление достаточно большого числа треков, и, кроме того, интенсивность появления треков крайне нестабильна во времени, определение зависимости от расстояния может быть лишь оценочным. Несмотря на это, проведённые многочисленные продолжительные измерения позволяют сделать важный вывод о резком спаде интенсивности появления треков на расстоянии более 20 см от реакторов. Так, средняя за 5 экспозиций суммарная длина треков на слюде для расстояний 5 см от реакторов (948 мм на образец) превышает более чем на порядок среднюю за 10 экспозиций суммарную длину для больших расстояний (37 мм на образец). Характерен большой разброс значений отдельных измерений.

Результаты на DVD похожи на те, что были получены для слюды: в среднем 980 мм на образец для зоны ближе 20 см от реакторов (49 экспозиций) и 54 мм на образец для зоны дальше 20 см (30 экспозиций). Здесь также большой разброс значений, полученных как в ближней зоне, так и в дальней (см. **Рис. 10**).





a



b

Рис. 10. Суммарные длины треков на DVD по экспозициям: (а) для ближней зоны, (b) для дальней зоны [14,15].

Заметим, что появление треков – явление довольно редкое. По данным [14,15], средняя скорость накопления треков на расстоянии 5-13 см от никель-водородного реактора [7] 0.027 мм на см<sup>2</sup> в час, т.е. появление на квадратном сантиметре детектора треков общей длиной 1 мм можно ожидать за время порядка 37 часов.

### 3.2. Интенсивность появления треков в зависимости от экранирования и ориентации детекторов

В ходе разнообразных экспериментов выяснено следующее [16]. Диски, плотно расположенные в стопке, защищают друг друга (треки появляются в основном на первом диске). На дисках, расположенных в закрытой со всех сторон пластиковой коробке, треков возникает мало.

В части экспозиций от никель-водородного реактора шторка из алюминиевой фольги закрывала DVD-диски от теплового излучения. Эта шторка не образовывала сплошную оболочку вокруг диска, и отстояла от диска на расстояние нескольких см. При этом диски

набирали значительное число треков, в отличие от контрольных дисков, расположенных на удалении от реактора. Защита от появления треков работает, по-видимому, только в случае экрана, плотно охватывающего детектор со всех сторон.

Закономерности в накоплении дисками треков в зависимости от их ориентации в наших экспериментах не прослеживались.

### 3.3. Исследование элементного состава вещества в треках

Одним из методов, использованных для исследования формы треков, была растровая электронная микроскопия (РЭМ). Этот метод, наряду с получением изображений высокого разрешения, позволяет делать анализ элементного состава вещества в заданных точках исследуемой поверхности. Анализы, сделанные в области треков и на удалении от них, не выявили существенных различий.

## 4. ГИПОТЕЗА О ПРИРОДЕ ТРЕКОВ СТРАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С обзором подходов к объяснению ТСИ (гипотеза магнитных монополей, гипотеза тахионов, гипотеза магнито-торо-электронного излучения, гипотеза "тёмного" водорода, гипотеза многозарядных кластеров и др.) можно ознакомиться в статье [23]. Ни одна из этих гипотез не может объяснить комплекс свойств, присущих этому удивительному феномену. В частности, игнорируются два важнейших свойства, без объяснения которых обойтись невозможно: весьма сложный, разнообразный, неповторяющийся рисунок периодических треков, и сильная непредсказуемая вариабельность интенсивности появления треков. Изложенная ниже гипотеза даёт возможность приблизиться к объяснению не только какой-то одной стороны этого феномена, а всей совокупности экспериментально обнаруженных свойств

4.1. Треки с периодически повторяющимся сложным рисунком могут образоваться в результате качения объектов размером от 14 до 64 мкм [18,19]. На поверхности детектора отпечатываются неровности этих объектов, что обеспечивает повторяемость рисунка с обнаруженными периодами от 44 до 200 мкм.

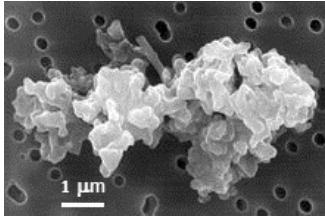


Рис. 11. Частица пыли под микроскопом [20].

4.2. Разумно предположить, что этими объектами являются пылинки, взвешенные в воздухе. Разнообразие форм пылинок объясняет неповторимость рисунков в различных треках (Рис. 11). Запылённость воздуха, а, следовательно, интенсивность появления треков, зависит от множества трудно контролируемых обстоятельств. Пылинки, движимые воздушными потоками, могут проникать в любые места, не имеющие надёжной защиты от проникновения воздуха.

4.3. Для того чтобы пылинка могла оставить отпечаток, она должна быть более твёрдой по сравнению с материалом детектора и достаточно сильно прижатой к поверхности детектора. Если считать площадь соприкосновения пылинки с поверхностью детектора  $1 \text{ мкм}^2$  и предел прочности 50 МПа (поликарбонат), для необратимой деформации нужна сила  $F \sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ .

4.4. Допустим, что сила связана с электрическим зарядом пылинки. Предположим, что пылинка имеет форму сферы диаметром  $d = 20 \text{ мкм}$ . Для притяжения к плоской электропроводящей поверхности с силой  $5 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$  сфера диаметром 20 мкм должна иметь заряд  $q = 2d(\epsilon_0 F)^{1/2} = 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$  ( $9.3 \cdot 10^6$  зарядов электрона). Сила притяжения к диэлектрической поверхности имеет такой же порядок величины (зависит от диэлектрической проницаемости). Электрическая ёмкость сферы диаметром 20 мкм  $C = 2\pi\epsilon_0 d = 1.1 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$ , потенциал  $\varphi = q/C = 1350 \text{ В}$ , энергия электрического поля  $W = C\varphi^2/2 = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} = 6300 \text{ МэВ}$ , напряжённость электрического поля на поверхности сферы  $E = q/\pi\epsilon_0 d^2 = 1.3 \cdot 10^8 \text{ В/м}$ .

4.5. Появиться в пылинке такой заряд может, когда она находится вблизи LENR реактора. Эксперименты показывают, что агент, вызывающий ядерные трансмутации, действует не только внутри, но и вне реактора [9-11]. Обсуждение природы этого агента

выходит за рамки этой статьи. Именно этот агент, обладающий высокой проникающей способностью, является "странным излучением".

4.6. Электронные оболочки возникающих в результате ядерных трансмутаций атомов находятся в сильно возбуждённом состоянии (об этом свидетельствует мягкое рентгеновское излучение около LENR-реакторов) [21]. Возбуждение электронных оболочек снимается не только рентгеновским излучением, но и испусканием электронов Оже с энергией до десятков кэВ. Обычно они поглощаются в близких областях окружающего вещества. Но в случае маленькой пылинки они могут выходить наружу. Например, длина пробега электрона с энергией 10 кэВ в веществе плотностью  $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  (диоксид кремния) около 5 мкм [24]. В результате этого пылинка приобретает положительный заряд. Считая, что каждый акт ядерных трансмутаций сопровождается потерей одного электрона, для приобретения пылинкой заряда  $1.5 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$  требуется  $9.3 \cdot 10^6$  трансмутаций (примерно одна трансмутация на  $10^8$  атомов вещества пылинки).

4.7. Высокая напряжённость электрического поля около заряженной пылинки ( $\sim 10^8 \text{ в/м}$ ), казалось бы, должна приводить к зажиганию коронного разряда и быстрому стеканию электрического заряда. Однако, для возникновения электронных лавин нужна не только высокая напряжённость поля, но и достаточно высокая разность потенциалов [25]. Разности потенциалов около 1000 В для этого недостаточно. Кроме того, диэлектрические частицы в результате ядерных трансмутаций заряжаются объёмно, что затрудняет стекание зарядов, происходящее с поверхности.

4.8. Притянувшаяся к поверхности детектора пылинка может либо высвободить энергию электрического заряда, образуя микрократер (энергии 6300 МэВ для этого вполне достаточно), либо прийти в движение, если есть электрическое поле вдоль поверхности или материал детектора неоднороден (непостоянна относительная диэлектрическая проницаемость). Возможны и причины, не связанные с электрическим полем, например, движение воздуха вдоль поверхности детектора. Причём, частица преимущественно будет не скользить, а катиться, так как

коэффициент трения качения на 2-4 порядка меньше коэффициента трения скольжения.

**4.9.** "Гладкие" треки формируются частицами размером до 10 мкм [18,19]. В процессе движения происходит выделение тепла в результате деформации и разрушения материала детектора и пылинки. Это может приводить к расплавлению материала, на котором образуются треки, и к сглаживанию возможных неровностей [18,19]. Понятно, почему "гладких" треков особенно много на легкоплавких материалах (пластмассы).

**4.10.** Хрупкие материалы с высокой температурой плавления (например, слюда, стекло) разрушаются движущейся частицей не только давлением, но и резким перепадом температуры. Особенно сильные разрушения происходят в материалах, обладающих пьезоэлектрическими свойствами (например, ниобат лития) в результате действия сильного электрического поля. Приближение к поверхности диэлектрического детектора положительно заряженного тела вызывает поляризацию диэлектрика, эквивалентную действию отрицательного заряда такой же величины (в нашем примере  $q = 1.5 \cdot 10^{-12}$  Кл). Если вещество имеет пьезоэлектрические свойства с типичным пьезомодулем  $d \sim 10^{-11}$  Кл/Н, оно сожмётся с силой  $F = q/d \sim 0.1$  Н. Эта сила действует на площади порядка 10 мкм<sup>2</sup> ( $10^{-11}$  м<sup>2</sup>), вызывая давление  $10^{10}$  Па, что значительно превышает пределы прочности обычных материалов.

**4.11.** "Капельные" треки. В процессе электролиза образуется множество капелек электролита в виде аэрозоля. Некоторые из них, находясь в области действия агента, вызывающего ядерные трансмутации, приобретают положительный электрический заряд. Свойства таких капелек ("заряженных кластеров") детально исследованы в работе [23]. Они движутся, периодически приближаясь и удаляясь от поверхности детектора, сбрасывая в момент сближения кластер размером много меньше основного. На детекторе возникают цепочки круглых следов.

**4.12.** Резкий спад вероятности появления треков на расстоянии 20-30 см от LENR-реакторов связан, возможно, не только с геометрическим ослаблением интенсивности агента, активирующего пылинки, но и ограниченностью

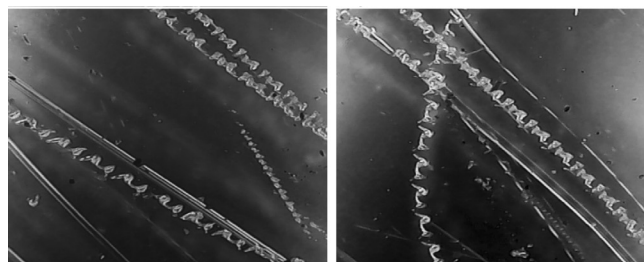
времени удержания электрических зарядов на пылинках.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ

### 5.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАЧЕНИЯ ПЫЛИНОК ПО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТЕКТОРА [22]

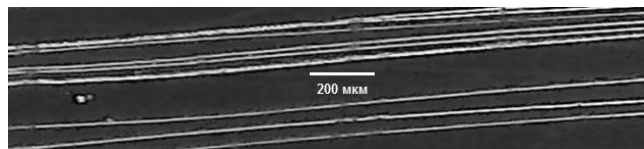
#### 5.1.1. ТРЕКИ НА DVD

а) Два дня на подоконнике возле открытого окна лежал чистый DVD диск без царапин рабочей поверхностью вверх, накапливая пыль. Затем рабочую поверхность запылённого диска потерли о другой диск с очень легким нажатием. На диске появились следы с периодическими рисунками, а также гладкие одиночные и двойные следы, очень похожие на треки странного излучения (Рис. 12).



**Рис. 12.** Треки, возникшие на поверхности DVD диска при качении частиц пыли (оптический микроскоп).

б) На фрагмент чистого DVD нанесли несколько частиц карбонильного никеля, имеющих форму, близкую к сферической, и размер от 5 до 20 мкм, накрыли другим фрагментом чистого DVD и передвинули верхний диск примерно на 1 см. На дисках появилось несколько параллельных треков шириной  $\sim 10$  мкм (Рис. 13).

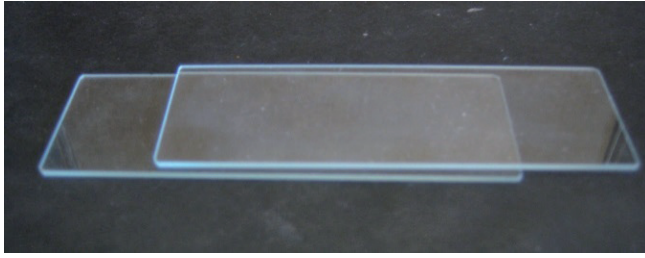


**Рис. 13.** Треки, возникшие на поверхности DVD диска при качении частиц карбонильного никеля (оптический микроскоп).

#### 5.1.2. ТРЕКИ НА СТЕКЛЕ

Между предметными стёклами для микроскопов помещали крупинки кварцевого песка, корунда, карбонильного никеля (Рис. 14). Сила сжатия пластин  $\sim 1$  Н (лёгкое нажатие пальцем),

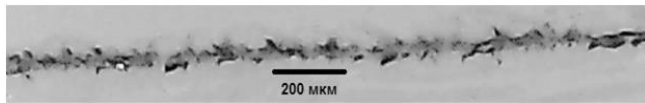




**Рис. 14.** Расположение предметных стёкол.

передвижение верхнего стекла относительно нижнего около 1 см.

На **Рис. 15** показан один из треков, возникших при использовании крупинки корунда размером ~ 50 мкм. Хаотичность рисунка трека, возможно, связана со случайностью процесса образований трещин в стекле, а также постепенным разрушением крупинки корунда.



**Рис. 15.** Предметные стёкла, крупинки корунда размером ~ 50 мкм (оптический микроскоп).

При использовании крупинки кварцевого песка и карбонильного никеля треки на стекле не возникали (твёрдость этих веществ ниже твёрдости стекла).

### 5.1.3. ТРЕКИ НА ФОТОЭМУЛЬСИИ

На рентгеновскую плёнку РМ-1 размером 2×5 см<sup>2</sup> нанесли несколько крупинки кварцевого песка размером 100-200 мкм, накрыли такой же плёнкой и передвинули верхнюю плёнку примерно на 1 см при лёгком нажиме. На плёнках появились треки с отчётливо выраженной периодичностью рисунка (**Рис. 16**).



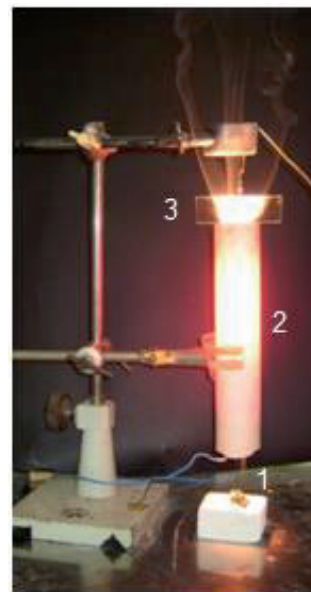
**Рис. 16.** Трек на рентгеновской плёнке от крупинки кварцевого песка (оптический микроскоп).

Эти эксперименты подтверждают возможность появления следов, аналогичных трекам странного излучения, при качении разнообразных частиц по поверхности из различных материалов.

## 5.2. БОЛЬШАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕКОВ ПРИ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛЕПОДОБНЫХ ЧАСТИЦ

Галогенная лампа накаливания номинальной мощности 300 Вт при повышенном с 220 до 320 В напряжении питания подвешена внутри керамической трубы. Как показывают эксперименты, лампы накаливания, работающие в форсированном режиме, являются источниками агента, вызывающего ядерные трансмутации [9-12]. При включении лампы и керамическая труба нагреваются до высокой температуры, что способствует конвекционному движению воздуха снизу вверх. Если внизу пересыпать порошок, например корундовый, достаточно мелкие частицы увлекаются восходящим потоком воздуха и проходят около лампы (**Рис. 17**). Сверху на трубе расположен детектор (например, стеклянная пластинка). Выходящий из трубы воздух с захваченными частицами омывает детектор.

Во избежание перегрева установку удаётся включать лишь на 1 минуту. Но и этого времени достаточно, чтобы на детекторах появлялись треки (примеры на **Рис. 18**). Это очень высокая интенсивность. Напомним, что в обычных условиях появление на квадратном сантиметре детектора треков общей длиной 1 мм можно ожидать за время порядка 37 часов (см. раздел 3.1).



**Рис. 17.** "Генератор" треков. 1 – источник аэрозоля, 2 – керамическая труба с расположенной внутри галогенной лампы накаливания, 3 – детектор.

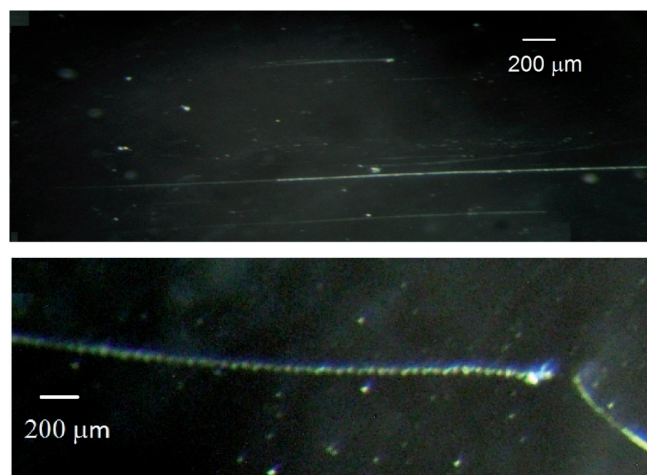


Рис. 18. Некоторые из треков, появившихся на предметных стёклах за 1 минуту работы "генератора треков" (оптический микроскоп).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предположение о том, что треки странного излучения образуют взвешенные в воздухе пылинки или капельки жидкости, приобретшие электрический заряд в результате ядерных трансмутаций, позволяет объяснить многие особенности феномена треков странного излучения, обозначенные в начале статьи. Выдвинутая гипотеза отвечает на вопросы:

- почему треки возникают только на поверхности;
- откуда берутся частицы, образующие треки;
- почему в них появляется электрический заряд и причём здесь LENR;
- как возникают треки с уникальными периодическими рисунками, гладкие треки, треки с трещинами и "капельные" треки;
- почему интенсивность появления треков непостоянна при одинаковых, казалось бы, условиях.

Возможность появления треков, аналогичных ТСИ, при движении пыли и пылеподобных частиц, прижатых к поверхности разнообразных детекторов, подтверждена экспериментально. На основе выдвинутой гипотезы создана экспериментальная установка, в которой скорость интенсивность появления треков увеличена на много порядков по сравнению с естественным процессом.

Вместе с тем, остаются вопросы, требующие размышлений и дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уруцкоев ЛИ, Ликсонов ВИ, Циноев ВГ. Экспериментальное обнаружение "странного" излучения и трансформация химических элементов. *Прикладная физика*, 2000, 4:83-100.
2. Matsumoto T, Kurokawa K. Observation of Heavy Elements Produced During Explosive Cold Fusion. *Fusion Technology*, 1991, 20(3):323-329.
3. Солин МИ. Экспериментальные факты спонтанного зарождения конденсата солитонных зарядов с образованием продуктов ядерного синтеза в жидком цирконии. Часть 1. *Физическая мысль России*, 2001, 1:43-58, <http://www.invur.ru/print.php?page=proj&cat=neob&doc=solin1>.
4. Родионов БУ, Савватимова ИБ. О природе странных треков. *Материалы 13 Российской конференции "Холодная трансмутация ядер химических элементов и шаровая молния (ХТЯиШМ)"*, 2005, 187-205.
5. Шишкин АА, Татур ВЮ. Оценка воздействия странного излучения на биологические объекты. *Материалы 25 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2018, 76-80.
6. Пархомов АГ, Алабин КА, Андреев СН и др. Никель-водородные реакторы: тепловыделение, изотопный и элементный состав топлива. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2017, 9(1): 4-93. DOI: 10.17725/rensit.2017.9.004.
7. Alabin KA, Andreev SN, et al. Isotopic and Elemental Composition of Substance in Nickel-Hydrogen Heat Generators. *J. Condensed Matter Nucl. Sci.*, 2018, 26:32, <http://www.iscmns.org/CMNS/JCMNS-Vol26.pdf>.
8. Пархомов АГ, Жигалов ВА, Забавин СН, Соболев АГ, Тимербулатов ТР. Никель-водородный теплогенератор, непрерывно проработавший 7 месяцев. *Журнал Формирующихся Направлений Науки (ЖФНН)*, 2019, 23-24(7):57-63.
9. Пархомов АГ, Карабанов РВ. Исследование элементных и изотопных изменений в веществе около ламп накаливания. *ЖФНН*, 2021, 27(8):116-119, <http://www.unconv-science.org/pdf/27/parkhomov2.pdf>.
10. Пархомов АГ, Карабанов РВ. LENR как проявление слабых ядерных взаимодействий.

- Новый подход к созданию LENR-реакторов. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2021, 13(1):45-58. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.045.
11. Parkhomov AG, Karabanov RV, Belousova EO. Investigation of LENR Processes Near Incandescent Metals. *Proceedings of the 23rd International Conference on Condensed Matter Nuclear Science*, Xiamen, China, June 9-11, 2021. *J. Condensed Matter Nucl. Sci.*, 2022, 36:362–376, <https://yadi.sk/d/sZOkktMQkxDjvg>.
  12. Жигалов ВА, Пархомов АГ, Неволин ВК. Исследование треков странного излучения около ламп накаливания и электролитической ячейки. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(1): 95-105. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.095.
  13. Пархомов АГ. Исследование процессов на установке импульсного плазменного электролиза. *Материалы 20 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2013, 65-76. <http://www.unconv-science.org/n25/parkhomov>.
  14. Пархомов АГ, Жигалов ВА, Забавин СН, Соболев АГ, Тимербулатов ТР. Статистика треков странного излучения от двух типов реакторов LENR. *Материалы 25 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2018, 51-62.
  15. Жигалов ВА, Забавин СН, Пархомов АГ, Соболев АГ, Тимербулатов ТР. Статистика и структура треков странного излучения от двух типов реакторов LENR. *ЖФНН*, 2018, 21-22(6): 10-25, <http://www.unconv-science.org/pdf/21/zhigalov1.pdf>.
  16. Жигалов ВА. Странное излучение и LENR: какая связь? *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2021, 13(3):329-348. DOI:10.17725/rensit.2021.13.329.
  17. Пархомов АГ, Жигалов ВА, Забавин СН, Соболев АГ., Тимербулатов Т.Р. Структура треков странного излучения от двух типов реакторов LENR *Материалы 25 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2018, 63-75.
  18. Жигалов ВА, Пархомов АГ. Треки странного излучения – движение твердых частиц вдоль поверхности. *Материалы 27 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2022, 51-64.
  19. Zhigalov VA, Parkhomov AG. Strange radiation tracks – the movement of solid particles along the surface. *Preprint*. August 2023. <https://www.researchgate.net/publication/373257344>.
  20. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пыль>.
  21. Климов АИ, Белов НК, Толкунов БН. Измерение потоков нейтронов, мягкого рентгеновского излучения в гетерогенной нано-кластерной плазме. *Материалы 26 Российской конференции ХТЯиШМ*, 2020, 29-36.
  22. Пархомов АГ, Жигалов ВА. Новый подход к исследованию треков странного излучения. *Доклад на вебинаре Климова-Зателепина 21 июня 2023 г.*, <http://lenr.seplm.ru/seminary>.
  23. Никитин АИ, Никитин ВА, Величко АМ, Никитина ТФ. Странные следы "странного" излучения. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(3):249-268. DOI:10.17725/rensit.2022.14.249.
  24. Григорьев ИС, Мейлихов ЕЗ (ред.) *Физические величины. Справочник*. М., Энергоатомиздат, 1991, 1170 с.
  25. Райзер ЮП. *Физика газового разряда*. М., Наука, 1992, 536 с.
- Пархомов Александр Георгиевич**  
к.ф.-м.н., член-корреспондент РАЕН  
Опытно-конструкторская лаборатория "К.И.Т."  
12, ул. Герасима Курина, Москва 121108, Россия  
E-mail: alexparh@mail.ru
- Жигалов Владислав Анатольевич**  
к.т.н.  
Сатпаев университет  
22А, ул. Сатпаева, Алмата 050013, Республика Казахстан  
E-mail: zhigalov@gmail.com
- Неволин Владимир Кириллович**  
д.ф.-м.н.  
Московский институт электронной техники  
1, пл. Шокина, Зеленоград 124498, Москва, Россия  
E-mail: vkn@miec.ru



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.089

## Анализ внутреннего спинового эффекта Холла в металлах для задач спинтроники

Игнатьев В.К., Перченко С.В., Станкевич Д.А.

Волгоградский государственный университет, <https://volsu.ru/>

Волгоград 400062, Российская Федерация

E-mail: [vkignatjev@yandex.ru](mailto:vkignatjev@yandex.ru), [perchenko@volsu.ru](mailto:perchenko@volsu.ru), [stankevich@volsu.ru](mailto:stankevich@volsu.ru)

Поступила 18.09.2023, рецензирована 25.09.2023, принята 02.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН Ю.К. Фетисовым

**Аннотация:** Предложен метод оценки поперечного спин-холловского сопротивления для поликристаллических образцов чистых металлов. Вычислены коэффициенты спинового эффекта Холла для различных металлов 3–6 периодов, включая редкоземельные лантаноиды. Показано, что знак рассчитанного спин-холловского сопротивления всегда совпадает с экспериментальным. Для большинства рассмотренных металлов результат расчета согласуется с экспериментальными данными. Показано, что согласование результатов расчета с экспериментом можно значительно улучшить, если использованные приближения сильной связи и эффективного заряда дополнить предположением, что взаимодействие коллективизированных электронов проводимости при построении самосогласованного поля может быть учтено введением эффективной массы электрона проводимости в гамильтониан спин-орбитального взаимодействия. Обсуждены причины отклонения для алюминия, меди, диспрозия, гольмия и гадолиния.

**Ключевые слова:** спинтроника, спиновый эффект Холла, спин-орбитальное взаимодействие, приближение сильной связи, приближение ближайших соседей, приближение идеального ферми-газа, самосогласованное поле

PACS: 67.57.Lm, 72.25.Ba, 75.76.+j

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-22-20035 (<https://rscf.ru/project/22-22-20035/>) и за счет средств бюджета Волгоградской области.

**Для цитирования:** Игнатьев В.К., Перченко С.В., Станкевич Д.А. Анализ внутреннего спинового эффекта Холла в металлах для задач спинтроники. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):89-100. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.089.

## Analysis of the intrinsic spin-Hall effect in metals for spintronics problems

Vyacheslav K. Ignatjev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich

Volgograd State University, <https://volsu.ru/>

Volgograd 400062, Russian Federation

E-mail: [vkignatjev@yandex.ru](mailto:vkignatjev@yandex.ru), [perchenko@volsu.ru](mailto:perchenko@volsu.ru), [stankevich@volsu.ru](mailto:stankevich@volsu.ru)

Received September 18, 2023, peer-reviewed September 25, 2023, accepted October 02, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** A method for estimating the transverse spin-Hall resistance for polycrystalline samples of pure metals has been proposed. The spin Hall effect coefficients for various metals of 3-6 periods, including rare-earth lanthanides, have been calculated. It is shown that the sign of the calculated spin-Hall resistance always coincides with the experimental one. For most of the considered metals the calculation result agrees with the experimental data. It is shown that the agreement of the calculation results with experiment can be significantly improved if the used approximations of strong coupling and effective charge are supplemented by the assumption that the interaction of collectivized conduction electrons in the construction of the self-consistent field can be taken into account by the introduction of the effective mass of the conduction electron in the Hamiltonian

of the spin-orbit interaction. The reasons for the deviation for aluminum, copper, dysprosium, holmium, and gadolinium are discussed.

*Keywords:* spintronics, spin-Hall effect, spin-orbit interaction, strong coupling approximation, nearest-neighbor approximation, ideal Fermi-gas approximation, self-consistent field, effective charge

**PACS:** 67.57.Lm, 72.25.Ba, 75.76.+j

*Acknowledgments:* The study was carried out with funds from the Russian Science Foundation grant No. 22-22-20035 (<https://rscf.ru/project/22-22-20035/>) and at the expense of the budget of the Volgograd region.

*For citation:* Vyacheslav K. Ignatjev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich. Analysis of the intrinsic spin-Hall effect in metals for spintronics problems. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):89-100e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.089.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (90)
  2. ПРИБЛИЖЕНИЕ САМОСОГЛАСОВАННОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОЛЛЕКТИВИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ (91)
  3. ДИНАМИКА ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОНА ПРОВОДИМОСТИ В КРИСТАЛЛЕ (92)
  4. ВНУТРЕННИЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МЕТАЛЛЕ (93)
  5. РАСЧЕТ СПИН-ХОЛЛОВСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ (94)
  6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ (95)
  7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (98)
- ЛИТЕРАТУРА (99)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением для реализации нового поколения устройств информационных и сенсорных технологий [1] является немагнитная спинтроника, основанная на спиновом эффекте Холла (СЭХ). Принято различать внешний (несобственный) и внутренний (собственный) СЭХ. Основную роль во внешнем СЭХ, предсказанном М.И. Дьяконовым и В.И. Перелем в 1971 г. [2], играет спин-зависимое рассеяние электронов проводимости на полях примеси. Такое рассеяние обеспечивают долю спин-поляризованного тока порядка долей процента с длиной когерентности порядка десятков нанометров. Этого достаточно для исследований спиновых эффектов в наноструктурах, но не для информационных и биотехнологий. Внутренний СЭХ, предсказанный С. Мураками в 2003 г., Д. Синова в 2004 г. [3] и вскоре обнаруженный экспериментально [4], происходит из-за спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы

–Дрессельхауса [5]. Такое взаимодействие обусловлено полем атомных ядер и может индуцироваться ненулевым орбитальным моментом электрона проводимости, или непосредственно его импульсом [6].

Внутренний СЭХ заключается в том, что зарядовый ток в чистых немагнитных металлах с сильным спин-орбитальным взаимодействием приводит к возникновению измеряемого поперечного спинового тока [7]. Существует также обратное явление – инверсный спиновый эффект Холла (ИСЭХ), заключающийся в том, что спиновый ток в металле создает поперечный зарядовый ток [8]. Таким образом, внутренний СЭХ может использоваться в устройствах спинтроники как для генерации, так и для детектирования спинового тока. Экспериментально обнаружено, что в некоторых случаях в поликристаллических образцах наблюдается увеличение угла СЭХ, доли спин-поляризованного тока и длины когерентности по сравнению с монокристаллическими [9].

В настоящее время доступны достоверные экспериментальные данные по спиновому эффекту Холла в металлах. Поэтому в рамках использованных в работе [10] приближений были рассчитаны коэффициенты спинового эффекта Холла немагнитных металлов 5-го и 6-го периодов [11]. Для платины, тантала, золота, альфа-вольфрама, палладия, молибдена и ниобия расчет поперечного спин-холловского сопротивления дал результаты, согласующиеся с опубликованными экспериментальными в пределах погрешности измерений. Для бета-вольфрама расчетные значения примерно в 2 раза больше экспериментальных, отражающих аномально высокий СЭХ. Целенаправленный

поиск перспективных материалов для устройств спинтроники, обоснование методов их проектирования, расчета и оптимизации их сигнальных характеристик предполагает расширение базы сравнения расчетных значений с экспериментальными. Для этого рассчитаны константы спинового эффекта Холла для металлов 4-го и 3-го периодов, а также лантаноидов.

## 2. ПРИБЛИЖЕНИЕ САМОСОГЛАСОВАННОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОЛЛЕКТИВИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Спин-орбитальная добавка в энергию одиночного электрона, находящегося в заданном электрическом поле с потенциалом  $\Phi(r)$ , имеет вид [12]

$$\hat{V} = -\frac{\hbar e}{2m^2c^2} \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \hat{s}_\alpha \frac{\partial\Phi}{\partial r_\beta} \hat{p}_\gamma. \quad (1)$$

Здесь  $m$  – масса электрона с зарядом  $-e$ ,  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$  – единичный антисимметричный тензор Леви-Чивитты.

Кристаллит чистого металла можно рассматривать как гомоядерную молекулу с металлической связью. В рамках одноэлектронного приближения Хартри–Фока каждый коллективизированный электрон находится в самосогласованном поле, созданным ионными остатками и другими коллективизированными электронами [13]. Самосогласованное поле обычно строится методом последовательных приближений. В начальном приближении волновая функция коллективизированного электрона рассматривается как молекулярная орбиталь и представляется в виде линейной комбинации атомных орбиталей (приближение ЛКАО).

Для любого спинового состояния электрона можно выбрать такое направление оси  $z$ , чтобы проекция его спина на эту ось имела определенное значение  $s_z$ , то есть  $\psi(\mathbf{r}, \sigma) = \psi(\mathbf{r}) \delta(\sigma, s_z)$ . В приближении сильной связи такой комбинацией для координатной части волновой функции может быть функция Ванье [14]:

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \Psi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n) \exp(ik\mathbf{R}_n), \quad (2)$$

где  $\Psi(\mathbf{r})$  – атомарная функция внешнего электрона,  $\mathbf{R}_n$  – вектор трансляции,  $N$  – количество узлов в кристаллите.

В качестве модельного потенциала начального приближения возьмем потенциал кристаллического поля ионных остатков с эффективным зарядом  $Ze$  и координатами  $\mathbf{R}_k$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{eZ}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{k=1}^N \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_k|}. \quad (3)$$

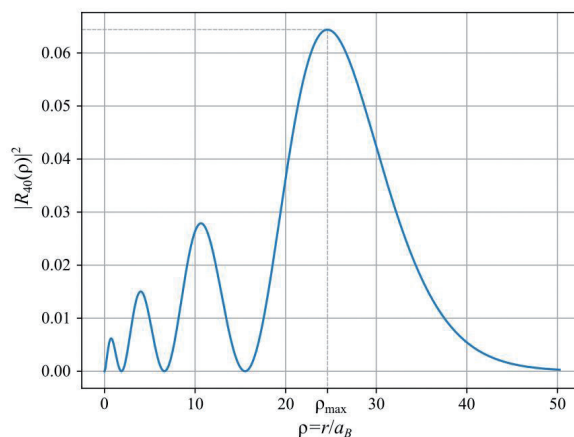
Здесь  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Если в качестве начального приближения атомарную волновую функцию  $\Psi(\mathbf{r})$  в соотношении (2) считать водородоподобной, величину  $Z$  можно оценить, приравняв координату максимума  $\rho_{\max}$  радиальной компоненты этой функции к радиусу атома  $R_a$ .

$$Z = \frac{\rho_{\max} a_B}{R_a},$$

где  $a_B = 5.3 \cdot 10^{-10}$  м – боровский радиус. На **Рис. 1** приведен пример для определения величины  $Z$  для металла четвертого периода, то есть, когда квадрат модуля радиальной волновой функции  $R_{40}$  имеет четыре максимума.

Приближение эффективного заряда в модельном потенциале (3) совместно с приближением сильной связи (2) означает, что при построении самосогласованного



**Рис. 1.** Зависимость квадрата модуля радиальной компоненты волновой функции  $|R_{40}|^2$  от безразмерной координаты  $\rho$ . Здесь главное квантовое число  $n = 4$ , орбитальное квантовое число  $l = 0$ .



поля для коллективизированного электрона учитывается только его взаимодействие с ядрами и локализованными электронами ионных остатков. В следующем приближении следует учесть взаимодействие, включая обменное, коллективизированного электрона с другими электронами проводимости. При анализе явлений переноса такое взаимодействие обычно учитывается в рамках метода эффективной массы. Формально можно заменить в формуле (1) массу свободного электрона на эффективную. Однако нет оснований полагать, что это должна быть эффективная масса, определяющая проводимость и теплопроводность металла.

### 3. ДИНАМИКА ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОНА ПРОВОДИМОСТИ В КРИСТАЛЛЕ

Рассмотрим мезоскопически однородный и изотропный металл. Отдельные кристаллиты проявляют анизотропные свойства на микроскопическом уровне, но физически малый объем, содержащий большое число случайно ориентированных кристаллитов, не будет иметь какого-либо выделенного направления. Под мезоскопической однородностью и изотропностью подразумевается, что в образце отсутствует регулярная текстура, то есть кристаллиты ориентированы равномерно хаотически. Регулярная текстура может образоваться при изготовлении образца, например, при механической прокатке или другой деформации образца, но не при напылении. Также будем подразумевать, что все кристаллиты не имеют собственного магнитного момента и доменные стенки отсутствуют, поэтому при транспорте электрона проводимости через границу между кристаллитами не возникает существенного возмущения спина.

Динамика импульса электрона, создаваемая возмущением (1), описывается уравнением для средних [13]

$$\begin{aligned} \frac{dp_\delta}{dt} &= \frac{i}{\hbar} \langle [\hat{V}, \hat{p}_\delta] \rangle = \\ &= \frac{\hbar e \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}}{2m^2 c^2} \langle \psi | \hat{s}_\alpha \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r_\beta \partial r_\delta} \hat{p}_\gamma | \psi \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

В правой части соотношения (4) подразумевается интегрирование по координатам и суммирование по спиновым переменным

электрона проводимости. Для любого спинового состояния электрона можно выбрать такое направление оси  $z$ , чтобы проекция его спина на эту ось имела определённое значение  $s_z$ , то есть  $\psi(\mathbf{r}, \sigma) = \psi(\mathbf{r}) \delta(\sigma, s_z)$ . Тогда после суммирования в (4) по спиновым переменным, положив  $\langle \hat{\mathbf{s}} \rangle = \mathbf{s}$  и выполнив замену переменных  $\mathbf{r} - \mathbf{R}_k \rightarrow \mathbf{r}$ , получаем

$$\begin{aligned} \frac{dp_\delta}{dt} &= \frac{\hbar^2 e^2 Z s_\alpha}{8\pi \varepsilon_0 m^2 c^2 N} \sum_{n,m,k=1}^N \exp(i\mathbf{k}(\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_m)) \times \\ &\times \langle \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{R}_k - \mathbf{R}_m) | 3 \frac{r_\delta}{r^5} \hat{l}_\alpha - \frac{\varepsilon_{\alpha\delta\gamma}}{\hbar r^3} \hat{p}_\gamma | \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{R}_k - \mathbf{R}_m) \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Оператор  $3 \frac{r_\delta}{r^5} \hat{l}_\alpha - \frac{\varepsilon_{\alpha\delta\gamma}}{\hbar r^3} \hat{p}_\gamma$ , в правой части соотношения (5) является нечетным. Поэтому при  $\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_k = 0$  и  $\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_k = 0$  его среднее равно нулю. Атомарные функции экспоненциально малы при  $r > R_a = na_B/Z$ ,  $n$  – главное квантовое число. При этом расстояние между атомами в кристалле существенно больше, чем  $R_a$ . Поэтому в соотношении (5) можно ограничиться приближением ближайших соседей и оставить в правой части только слагаемые, для которых  $\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_k = \mathbf{a}_\nu$ , а  $\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_k = 0$  или  $\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_k = 0$ , а  $\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_k = \mathbf{a}_\nu$ , где  $\mathbf{a}_\nu$  – вектор, проведенный от рассматриваемого атома с центром в точке  $\mathbf{r} = 0$  к ближайшему соседу. Тогда с учетом эрмитовости оператора в соотношении (5) получаем

$$\begin{aligned} \frac{dp_\delta}{dt} &= -\frac{\hbar^2 e^2 Z s_\alpha}{4\pi \varepsilon_0 m^2 c^2} \sin(\mathbf{k} \mathbf{a}_\nu) \times \\ &\times \text{Im} \langle \Psi_\nu | 3 \frac{r_\delta}{r^5} \hat{l}_\alpha - \frac{\varepsilon_{\alpha\delta\gamma}}{\hbar r^3} \hat{p}_\gamma | \Psi \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\Psi_\nu(\mathbf{r}) = \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{a}_\nu) - \Psi(\mathbf{r} - \mathbf{a}_\nu)$  – функция с четностью противоположной четности функции  $\Psi(\mathbf{r})$  и подразумевается суммирование по  $\nu$  по парам симметрично расположенных относительно рассматриваемого атома его ближайших соседей.

Правая часть соотношения (6) равна силе, действующей на электрон. Ее можно представить как результат действия на электрон стороннего электрического поля  $\mathbf{E}_{SH}$ . В первом порядке малости по  $\mathbf{k} \mathbf{a}_\nu$  получаем:

$$\begin{aligned} E_{SH\alpha} &= \frac{\hbar^2 Z e s_\beta k_\mu}{4\pi \varepsilon_0 m^2 c^2} a_{\nu\mu} \times \\ &\times \text{Im} \langle \Psi_\nu | 3 \frac{r_\alpha}{r^5} \hat{l}_\beta - \frac{\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}}{\hbar r^3} \hat{p}_\gamma | \Psi \rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Отметим, что квантовое среднее в формуле (7) распадается на два слагаемых, первое из которых пропорционально орбитальному моменту электрона проводимости, а второе – его импульсу, что согласуется с моделями [6].

#### 4. ВНУТРЕННИЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МЕТАЛЛЕ

Рассмотрим макроскопическую область поликристаллического металла. Для любого состояния электрона можно выбрать направление оси квантования (оси  $z$ ) так, чтобы проекция его орбитального момента на эту ось имела определённое значение  $l_z = l$ . Энергия электрона в атоме, находящемся в электрическом поле, зависит от проекции его орбитального момента на направление поля [13]. Поэтому ориентация атомных орбиталей определяется положением кристаллофизических осей кристаллита, и можно считать, что соотношение (7) записано в системе координат, связанной с осями симметрии кристаллита.

Введем лабораторную систему координат, связанную с приборами, которые задают ток проводимости и измеряют компоненты спина. Поэтому волновой вектор и вектор спина электронов проводимости следует считать заданными в лабораторной системе координат. Компоненты векторов и тензоров в лабораторной системе будем обозначать штрихованными индексами, а в системе координат, связанной с кристаллическими осями домена, не штрихованными.

Преобразуем волновой вектор и вектор спина электронов проводимости из лабораторной системы в систему кристаллических осей  $k_\mu = p_{\mu\mu'} k_{\mu'}$ ,  $s_\beta = p_{\beta\beta'} s_{\beta'}$ , а вектор холловского электрического поля из системы кристаллических осей в лабораторную  $E_{SH\alpha'} = p_{\alpha'\alpha}^{-1} E_{SH\alpha}$ , где  $p_{\alpha'\alpha}$  – унитарная матрица поворота. Подставив это преобразование в уравнение (7), усредним вектор  $E_{SH}$  в макроскопической области по случайным ориентациям кристаллитов. Матрицу поворота удобно выразить через углы Эйлера:

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\alpha)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\beta)\cos(\gamma) & \sin(\alpha)\sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\beta)\sin(\gamma) & -\sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\beta)\cos(\gamma) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) \\ \sin(\beta)\sin(\gamma) & \sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta) \end{bmatrix},$$

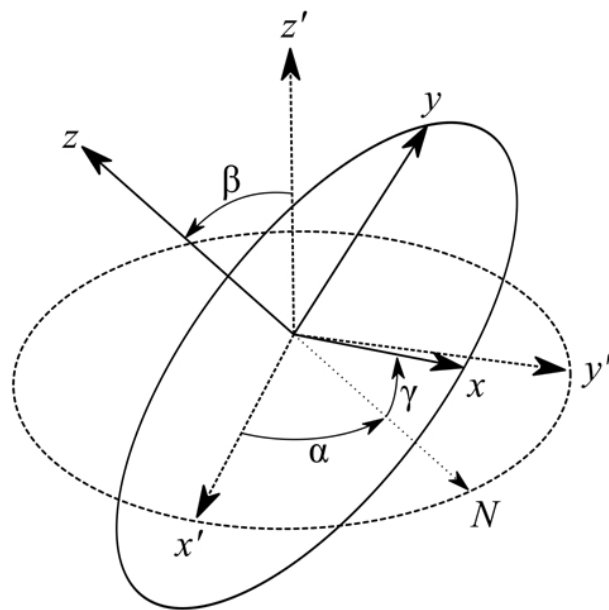


Рис. 2. Преобразование компонент векторов при переходе из лабораторной системы координат (штрихованные индексы) в систему кристаллических осей. Здесь  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  – углы Эйлера.

где  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$  – угол прецессии,  $0 \leq \beta \leq \pi$  – угол нутации,  $0 \leq \gamma \leq 2\pi$  – угол собственного вращения (Рис. 2). Тогда для мезоскопически изотропного металла усреднение по случайным ориентациям кристаллита сводится к усреднению по случайным равномерно распределенным углам Эйлера.

$$E_{SH\alpha'} = \frac{\hbar^2 Z e s_{\beta'} k_{\mu'} p_{\alpha'\alpha}^{-1} p_{\beta\beta'} p_{\mu\mu'}}{4\pi\epsilon_0 m^2 c^2} a_{\nu\mu} \times$$

$$\times \text{Im} \langle \Psi_\nu | 3 \frac{r_\alpha}{r^5} \hat{l}_\beta - \frac{\epsilon_{\alpha\beta\gamma}}{\hbar r^3} \hat{p}_{\gamma\beta} | \Psi \rangle.$$

Здесь

$$\bar{p} = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin(\beta) p(\alpha, \beta, \gamma) d\alpha d\beta d\gamma. \quad (9)$$

При аналитическом усреднении уравнения (8) интегралы вида (9) вычислялись в координатной форме, а затем результат преобразовывался в инвариантную форму.

Рассматривая СЭХ только в металлах, воспользуемся для электронов проводимости приближением идеального ферми-газа. Применимость этой модели для электронов

проводимости в металлах обоснована тем, что термодинамика ферми-системы определяется ее микроскопической структурой только вблизи поверхности Ферми и совершенно не зависит от того, что делается за пределами размытия порядка  $k_B T$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. В результате, чем плотнее ферми-газ в металле, тем он идеальнее [15]. Экспериментальные исследования температурной зависимости электронной теплоемкости в металлах показывают, что она хорошо соответствует модели идеального ферми-газа со скалярной эффективной массой  $m^*$ . Для многих металлов  $m^* \approx m$ . Однако для галлия  $m^* \approx 2.5 m$ , а для лантана  $m^* \approx 0.23 m$ . Полагая в рамках метода эффективной массы в (8)  $\mathbf{k} = \mathbf{j}m^*/(\hbar en_e)$ , где  $\mathbf{j}$  – плотность зарядового тока,  $n_e$  – концентрация электронов проводимости, получаем

$$\mathbf{E}_{SH} = R_S \left[ \mathbf{j} \times \frac{\mathbf{P}}{n_e} \right],$$

$$R_S = \frac{\hbar e Z}{48 \pi \epsilon_0 m c^2} \frac{m^*/m}{en_e} \times$$

$$\times \text{Re} \langle \Psi_\nu | \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r}\mathbf{a}_\nu) - \mathbf{a}_\nu r^2}{r^5} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} | \Psi \rangle.$$

где  $\mathbf{P} = 2sn_e$  – вектор плотности спиновой поляризации.

## 5. РАСЧЕТ СПИН-ХОЛЛОВСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Первое соотношение (10) совпадает по форме с выражением для электронного эффекта Холла, если заменить вектор  $\mathbf{P}/n_e$  вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ . Поэтому можно ожидать, что постоянная спинового эффекта Холла  $R_S$  так же зависит от эффективной массы электронов проводимости, включая ее знак, и их концентрации, как и постоянная электронного эффекта Холла  $R_H = (m^*/m)/(en_e)$ . Тогда вторую часть формулы (10) можно записать в виде

$$R_S = \frac{\hbar e Z R_H}{48 \pi \epsilon_0 m c^2} \text{Re} \langle \Psi_\nu | \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r}\mathbf{a}_\nu) - \mathbf{a}_\nu r^2}{r^5} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} | \Psi \rangle. \quad (11)$$

Потенциал кристаллического поля вида (3) не является центрально-симметричным, и орбитальный момент электрона не является для него "хорошим" квантовым числом. Поэтому волновая функция электрона в атоме отличается от волновой функции электрона в

изолированном атоме. Соответственно, волновая функция  $\Psi(\mathbf{r})$  в соотношении (2) не является волновой функцией внешнего электрона, например,  $s$ -электрона, изолированного атома. Но ее всегда можно представить в виде линейной комбинации волновых функций изолированного атома. В результате в металлах зоны проводимости перекрываются, и часть электронов проводимости может быть образована коллективизацией  $p$ -электронов.

Используем в соотношении (9) приближение водородоподобной атомарной орбитали для внешних (валентных) электронов

$$\Psi_{nlm}(x, \theta, \varphi) = R_{nl}(x) Y_{lm}(\theta, \varphi). \quad (12)$$

Здесь  $l$  – орбитальное квантовое число,  $m$  – магнитное квантовое число,  $\theta$  – полярный угол,  $\varphi$  – азимутальный угол,  $R_{nl}(x)$  – радиальная часть волновой функции,  $x = Zr/a_B$ ,  $Y_{lm}(\theta, \varphi)$  – угловая часть волновой функции (сферическая функция). Радиальная часть водородоподобной волновой функции (12) имеет вид [13]

$$R_{nl}(x) = -\frac{2}{n^2} \sqrt{\frac{(n-l-1)!}{[(n+l)!]^3}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{x}{n}\right) \left(\frac{2x}{n}\right)^l L_{n+l}^{2l+1}\left(\frac{2x}{n}\right),$$

где  $L_{n+l}^{2l+1}(t)$  – обобщенный полином Лагерра. Для  $s$ -электрона нормированная сферическая функция  $Y_{00}(\theta, \varphi) = 1/\sqrt{4\pi}$ . Нормированная сферическая функция  $p$ -электрона, ориентированная вдоль полярной оси, имеет вид  $Y_{10}(\theta, \varphi) = i\sqrt{3/(4\pi)} \cos(\theta)$ .

Разобьем ближайших соседей рассматриваемого атома на группы с одинаковыми расстояниями от него  $|\mathbf{a}_\nu| = a_l$ , где  $l = 1, 2, \dots$  – номер группы ближайших соседей.

Для  $s$ -электрона проводимости, направляя полярную ось вдоль вектора  $\mathbf{a}_\nu$ , получим в каждой из групп ближайших соседей

$$\langle \Psi_\nu | \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r}\mathbf{a}_\nu) - \mathbf{a}_\nu r^2}{r^5} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} | \Psi \rangle =$$

$$= m_l \frac{4b_l Z^3}{a_B^3} \int_0^\infty \frac{dR_{n0}(x)/dx}{x} dx \times$$

$$\times \int_0^1 y \{R_{n0}(x_1) - R_{n0}(x_2)\} dy, \quad (13)$$



где  $y = \cos\theta$ ,  $x_1 = \sqrt{x^2 + b_1^2 + 2xb_1y}$ ,  $x_2 = \sqrt{x^2 + b_1^2 - 2xb_1y}$ ,  $b_v = Z|a_l|/a_B$ ,  $m_l$  – число пар симметрично расположенных узлов в  $l$ -й группе ближайших соседей.

Для  $p$ -электрона проводимости направим полярную ось вдоль вектора  $\mathbf{a}_v$  и будем отсчитывать азимутальный угол  $\varphi$  от плоскости  $\mathbf{a}_v \mathbf{r}$ . В сферических координатах  $\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi$ , причем орт  $\mathbf{e}_\varphi$  ортогонален плоскости  $\mathbf{a}_v \mathbf{r}$ , а орт  $\mathbf{e}_\theta$  образует с полярной осью угол  $\pi/2 + \theta$ . Тогда для  $l$ -й группы ближайших соседей получим

$$\langle \Psi_v | \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r}\mathbf{a}_v) - \mathbf{a}_v r^2}{r^5} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} | \Psi \rangle = \frac{3b_l Z^3}{2\pi a_B^3} m_l \int_0^\infty \left( \frac{2y dR_{nl}(x)/dx}{x} - \frac{1-y^2}{x^2} R_{nl}(x) \right) dx \times \int_0^1 y \{ R_{nl}(x_1) - R_{nl}(x_2) \} dy. \quad (14)$$

### 6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

В Таблице 1 приведены свойства атомов исследованных металлов, конфигурации их

электронных оболочек, а также параметры их кристаллических решеток.

Наиболее детально спиновый эффект Холла исследован в платине [16]. Для платины радиус атома равен 139 пм, что для  $6s$  оболочки соответствует  $Z \approx 22.45$ . Постоянная гранецентрированной решетки периодом  $a = 392$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, причем каждый атом имеет 6 пар ближайших соседей на расстоянии 277 пм, далее 3 пары на расстоянии 392 пм и 12 пар на расстоянии 480 пм,  $b_1 = 117$ ,  $b_2 = 166$ ,  $b_3 = 204$ . При  $80 \text{ K} \cdot R_H = -2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{A} \cdot \text{c})$ , для  $s$ -электрона по формулам (11) и (13) получаем  $R_S = 3.48 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , для  $p$ -электрона по формулам (11) и (14) получаем  $R_S = -5.12 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

В Таблице 2 приведены теоретические, рассчитанные по формулам (11), (13) и (14), и экспериментальные значения спин-холловского сопротивления  $R_S$  для различных металлов. Значения константы Холла  $R_H$  взяты из справочника [17]. Значения проводимости взяты из цитируемых работ, если они там не приведены – то из справочника [17].

Таблица 1

Параметры решетки и электронные конфигурации металлов

Металл	Ячейка	Конфигурация	$g$ , пм	$Z$	$a$ , пм	Пары ближайших соседей					
						$a_1$ , пм	$m_1$	$a_2$ , пм	$m_2$	$a_3$ , пм	$m_3$
Au	ГЦК	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	144	21.7	408	288	6	408	3	500	12
Pt	ГЦК	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	139	22.45	392	277	6	392	3	480	12
$\alpha$ -W	ОЦК	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	141	22.77	316	274	4	316	3	449	6
$\beta$ -W	A15	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	141	22.77	504	281	6	436	4	454	6
						251	1	281	1	308	4
Ta	ОЦК	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	147	21	331	286	4	331	3	468	6
Lu	ГПУ	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	175	17.84	351	346	6	492	2	557	1
Ho	ГПУ	[Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	179	17.44	358	350	6	499	2	562	1
Dy	ГПУ	[Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	180	17.44	359	353	6	502	2	565	1
Cd	ГПУ	[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	179	17.44	363	359	6	510	2	579	1
Ag	ГЦК	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	144	14.66	409	289	6	409	3	500	12
Pd	ГЦК	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	137	15.4	389	275	6	389	3	476	12
Mo	ОЦК	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	140	15.22	315	273	4	315	3	445	6
Nb	ОЦК	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	147	14.4	331	287	4	331	3	468	6
Cu	ГЦК	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	128	10.1	362	256	6	361	3	442	12
$\alpha$ -Mn	A12	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	137	10.25	889	277	8	451	12	460	8
Cr	ОЦК	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	129	10	289	250	4	289	3	408	6
V	ОЦК	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	135	9.72	302	262	4	302	3	428	6
Ti	ГПУ	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	147	8.86	295	291	6	412	2	468	1
Al	ГЦК	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	143	4.81	495	286	6	405	3	496	12

**Таблица 2**

Экспериментальные значения констант спинового эффекта Холла  $R_S^e$  и рассчитанные значения по формуле (11) совместно с (13) для  $s$ -электронов  $R_S^s$  и (14) для  $p$ -электронов  $R_S^p$

Металл	$\sigma, 10^5$ (Ом $\cdot$ м) <sup>-1</sup>	$\theta_{SH}, \%$	$R_p, 10^{11}$ , М <sup>2</sup> (А $\cdot$ с)	$R_S^e, 10^{-9}$ Ом $\cdot$ м	$R_S^s, 10^{-9}$ Ом $\cdot$ м	$R_S^p, 10^9$ Ом $\cdot$ м
Au	200	0.25±0.05	-7.3	12±3	7.1	-1.08
Pt	81	2.1±0.5	-2	2.6±0.7	3.48	-0.512
$\alpha$ -W	47.6	≈7	11.1	-14.7	-13.96	2.56
$\beta$ -W	20.4	-35±4	-162	740±80	1660	-294
Ta	3	-0.37±0.1	9.75	-13±4	-15.38	-2.15
Lu	12	1.4±0.2	-12	11±2	9.17	-1.28
Ho	11	14±2	-32	122±17	25.6	-3.34
Dy	18	5±1	-25	28±6	18.0	-2.47
Gd	7	4±1	-12	56±14	6.98	-1.07
Ag	150	0.7±0.1	-8.98	047±007	-11.7	1.43
Pd	40	0.64±0.1	-8.45	1.6±0.3	-13.4	1.64
Mo	28	-0.8±0.18	18	-2.8±0.7	25.4	-4.41
Nb	11	-0.87±0.2	8.88	-7.9±2	10.1	-11.9
Cu	160	0.32±0.03	-5.36	02±002	8.32	-1.18
$\alpha$ -Mn	1.42	-0.19±0.01	8.44	-13.3±1	-11.1	1.85
V	55	-1±0.1	7.9	-1.8±0.3	-9.73	1.39
Cr	1.2	-5.1±0.5	36.3	-42±4	-59	8.12
Ti	3.33	-0.036±0.004	1.0	-1.2±0.1	-1.0	0.134
Al	160	0.02±0.01	-3.3	-0.012±0.006	-1.68	0.19

В эксперименте обычно определяется спин-холловский угол  $\theta_{SH} = \sigma R_S$  [9,18,19]. Здесь  $\sigma$ , обычно обозначаемая как  $\sigma_{xx}$ , – проводимость металла в отсутствии спин-орбитального взаимодействия. Для платины при 10 К  $\sigma = 8.1 \cdot 10^6$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>,  $\theta_{SH} = 0.021 \pm 0.005$  [20]. Соответственно,  $R_S = (2.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-9}$  Ом $\cdot$ м. Согласие с экспериментом для  $s$ -электронов получится, если в формуле (1) массу свободного электрона заменить эффективной массой  $m^* \approx (1.15 \pm 0.15)m$ .

Золото является вторым представителем 6-го периода и благородным металлом. Спин-холловский угол для золота на порядок меньше, чем для платины [21]. Постоянная гранецентрированной кубической решетки  $a = 407.8$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 288 пм, далее 3 пары на расстоянии 408 пм и 12 пар на расстоянии 500 пм. Согласие с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (0.77 \pm 0.1)m$ .

Тантал имеет объемноцентрированную кубическую решетку с постоянной  $a = 331$  пм. На элементарную ячейку приходится 2 атома, 4

пары ближайших соседей на расстоянии 286 пм, далее 3 пары на расстоянии 331 пм и 6 пар на расстоянии 468 пм. Согласие с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.1 \pm 0.1)m$ .

Вольфрам в стабильной альфа-модификации имеет объемноцентрированную кубическую решетку с постоянной  $a = 316$  пм. На элементарную ячейку приходится 2 атома, 4 пары ближайших соседей на расстоянии 274 пм, далее 3 пары на расстоянии 316 пм и 6 пар на расстоянии 449 пм. В эксперименте на пленке толщиной 15 нм получено значение  $|\theta_{SH}| < 0.07$  [22], что соответствует  $|R_S| < 1.47 \cdot 10^{-8}$  Ом $\cdot$ м. Погрешность экспериментально измеренного спин-холловского угла в [22] не приведена, но расчетное значение согласуется с экспериментальным для  $s$ -электронов при  $m^* \approx (1.0 \pm 0.03)m$ .

Вольфрам в метастабильной бета-модификации имеет решетку вида A15 для соединения АВ<sub>3</sub> с постоянной  $a = 503.6$  пм, на элементарную ячейку приходится 8 атомов. Для атома А (в центре и на углах) 6 пар ближайших соседей на расстоянии 281 пм, далее 4 пары на расстоянии 436 пм, 6 пар на расстоянии 454 пм, 3 пары на расстоянии 504 пм, 12 пар на расстоянии 577 пм. Для атома В (на грани) 1 пара ближайших соседей на расстоянии 251 пм, далее 1 пара на расстоянии 281 пм, 4 пары на расстоянии 308 пм, 2 пары на расстоянии 454 пм, 8 пар на расстоянии 471 пм. Расчет показывает, что атомы А и В вносят одинаковый вклад в спиновый эффект Холла. Согласие с экспериментом [23,24] для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.5 \pm 0.1)m$ .

Для редкоземельных металлов отсутствуют достоверные экспериментальные данные по спин-холловскому углу. В работе [25] приведена величина  $\xi_{SH} = T_{int} \theta_{SH}$  где  $T_{int}$  – коэффициент передачи спина. Для оценки примем его равным 1.

Для гадолиния постоянные гексагональной плотноупакованной решетки  $a = 363.4$  пм,  $c = 578.5$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 359 пм, далее 2 пары на расстоянии 510 пм и 1 пара на расстоянии 579 пм. Согласие с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (0.35 \pm 0.05)m$ .

Для диспрозия постоянные гексагональной плотноупакованной решетки  $a = 359.3$  пм,  $c = 565.4$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 353 пм, далее 2 пары на расстоянии 502 пм и 1 пара на расстоянии 565 пм. Согласно с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (0.8 \pm 0.1)m$ .

Для гольмия постоянные гексагональной плотноупакованной решетки  $a = 357.7$  пм,  $c = 561.6$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 350 пм, далее 2 пары на расстоянии 499 пм и 1 пара на расстоянии 562 пм. Согласно с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (0.46 \pm 0.04)m$ .

Для лютеция постоянные гексагональной плотноупакованной решетки  $a = 351$  пм,  $c = 556.7$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 346 пм, далее 2 пары на расстоянии 492 пм и 1 пара на расстоянии 557 пм. Согласно с экспериментом для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.1 \pm 0.1)m$ .

Отметим, что из рассмотренных РЗМ только лютеций является парамагнетиком при всех температурах. При низких температурах, диспрозий и гольмий являются ферромагнетиками. "Магнитное поведение гадолиния является сложным, ...обнаруживаются различные магнитные аномалии" [26]. Можно предположить, что при комнатной температуре в них отсутствует только дальнее спиновое упорядочение, но, в отличие от лютеция, остается ближний порядок. Формула (2) не учитывает обменное взаимодействие коллективизированного проводимости электрона с локализованными электронами намагниченности. Поэтому соотношение (11) применимо только к парамагнетикам, таким как лютеций. В присутствии ближнего спинового упорядочения помимо спин-холловского электрического поля вида (7) может присутствовать холловское электрическое поле, обусловленное аномальным эффектом Холла [27]. Это явление, возможно, имеет место в диспрозии, гольмии и гадолинии.

При анализе элементов 5-го периода расчет по формулам (11) и (13) для  $s$ -электронов проводимости дает значения, не согласующиеся

с экспериментальными. Особенно это актуально, видимо, для палладия, у которого  $5s$ -электроны отсутствуют.

Для серебра постоянная гранецентрированной кубической решетки  $a = 408.6$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 289 пм, далее 3 пары на расстоянии 409 пм и 12 пар на расстоянии 500 пм. Согласно с экспериментом [28] для  $p$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.75 \pm 0.07)m$ .

Для молибдена постоянная объемноцентрированной кубической решетки  $a = 315$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 4 пары ближайших соседей на расстоянии 273 пм, далее 3 пары на расстоянии 315 пм и 6 пар на расстоянии 445 пм. Согласно с экспериментом [20] для  $p$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.25 \pm 0.15)m$ .

Для палладия постоянная гранецентрированной кубической решетки  $a = 389$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 275 пм, далее 3 пары на расстоянии 389 пм и 12 пар на расстоянии 476 пм. Согласно с экспериментом [25] для  $p$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.0 \pm 0.1)m$ .

Для ниобия постоянная объемноцентрированной кубической решетки  $a = 331$  пм на элементарную ячейку приходится 2 атома, 4 пары ближайших соседей на расстоянии 287 пм, далее 3 пары на расстоянии 331 пм и 6 пар на расстоянии 468 пм. Согласно с экспериментом [20] для  $p$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.25 \pm 0.15)m$ .

Для меди постоянная гранецентрированной кубической решетки  $a = 361.5$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 256 пм, далее 3 пары на расстоянии 362 пм и 12 пар на расстоянии 442 пм. Согласно с экспериментом [29] для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (6.4 \pm 0.4)m$ .

Для титана постоянные гексагональной плотноупакованной решетки  $a = 295$  пм,  $c = 469.7$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 291 пм, далее 2 пары на расстоянии 412 пм и 1 пара на расстоянии 468 пм. Марганец в альфа



модификации имеет структуру A12, постоянная кубической решетки  $a = 889$  пм, на элементарную ячейку приходится 58 атомов, 8 пар ближайших соседей на расстоянии 277 пм, далее 12 пар на расстоянии 451 пм и 8 пар на расстоянии 460 пм. Согласно с экспериментом [30] для  $s$ -электронов у титана и марганца получится при  $m^* \approx (0.91 \pm 0.05)m$ .

Для ванадия постоянная кубической объёмноцентрированной решетки  $a = 302.4$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 4 пары ближайших соседей на расстоянии 262 пм, далее 3 пары на расстоянии 302.4 пм и 6 пар на расстоянии 427.7 пм. Согласно с экспериментом [27] для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (2.3 \pm 0.2)m$ .

Для хрома постоянная кубической объёмноцентрированной решетки  $a = 288.5$  пм, на элементарную ячейку приходится 2 атома, 4 пары ближайших соседей на расстоянии 249.8 пм, далее 3 пары на расстоянии 288.5 пм и 6 пар на расстоянии 408 пм. Согласно с экспериментом [27] для  $s$ -электронов получится при  $m^* \approx (1.18 \pm 0.05)m$ .

Для алюминия постоянная гранецентрированной кубической решетки  $a = 405$  пм, на элементарную ячейку приходится 4 атома, 6 пар ближайших соседей на расстоянии 286 пм, далее 3 пары на расстоянии 405 пм и 12 пар на расстоянии 496 пм. Согласно с экспериментом [31] для  $p$ -электронов получится при  $m^* \approx (3.9 \pm 1)m$ . У алюминия нет  $d$ - и  $f$ -электронов на внутренних оболочках. Эти электроны обладают хорошей экранирующей способностью, поэтому для переходных и редкоземельных металлов использование для электронов проводимости водородоподобной орбитали (12) с соответствующим эффективным зарядом является оправданным приближением. К алюминию такое приближение, видимо, неприменимо. Кроме того, из всех рассмотренных металлов, только у алюминия есть заполненная  $p$ -оболочка. В результате вклад в СХЭ от  $s$ - и  $p$ -электронов почти компенсирует друг друга, и малое экспериментальное значение постоянной спинового эффекта Холла  $R_s$  получается как разность двух относительно больших

величин, а не из-за большой эффективной массы носителей заряда.

Для меди экспериментальное значение постоянной спинового эффекта Холла очень мало, и как в случае с алюминием, возможно, получается как разность двух относительно больших величин. Хорошее согласие с экспериментом для меди получается, если принять, что 90% электронов проводимости являются коллективизированными  $p$ -электронами, а 10% –  $s$ -электронами.

Сравнительный анализ данных, приведенных в Таблицах 1 и 2, показывает, что для элементов четных периодов (6-го и 4-го) знак измеренного спин-холловского сопротивления всегда совпадает со знаком рассчитанного для  $s$ -электрона, а для элементов нечетных периодов (5-го и 3-го) – со знаком, рассчитанного для  $p$ -электрона.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснование методов проектирования систем спинтроники, расчета и оптимизации их характеристик требует дополнительных предположений о системе. Такими предположениями являются представление волновой функции коллективизированного электрона проводимости в виде функции Ванье, приближение эффективного заряда и приближение ближайших соседей в гамильтониане (5), а также модель идеального ферми-газа для электронов проводимости. Применимость этих моделей для конкретной задачи следует обосновывать экспериментально. Рассчитанные в рамках этих моделей коэффициенты внутреннего СЭХ согласуются с измеренными. Вопрос о допустимости введения эффективной массы электрона проводимости в гамильтониан спин-орбитального взаимодействия (1) для учета взаимодействия коллективизированных электронов проводимости при построении потенциала самосогласованного поля (3) в рамках одноэлектронного приближения требует дальнейшего изучения.

Спиновая поляризация по описанному в работе механизму не требует внешних магнитных полей и остаточной намагниченности и поэтому не создает помех при работе в микро- и

нано-размерных структурах спинтроники. Несомненный интерес представляет поиск новых перспективных материалов для устройств спинтроники на основе сплавов металлов и интерметаллидов. Проектирование таких систем спинтроники, расчет и оптимизация их характеристик возможны на основе описанных методов и подходов, если рассматривать кристаллит интерметаллида как гетероядерную макромолекулу. Методы построения молекулярных орбиталей для таких структур, в том числе и в виде функций Ванье, хорошо изучены [32,33].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бухараев АА, Звездин АК, Пяток АП, Фетисов ЮК. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах. *УФН*, 2018, 188(12):1288-1330; doi: 10.3367/UFNr.2018.01.038279.
2. Dyakonov MI, Perel VI. Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors. *Physics Letters A*, 1971, 35(6):459-460; doi: 10.1016/0375-9601(71)90196-4.
3. Sinova J, Culcer D, Niu Q, Sinitsyn NA, Jungwirth T, MacDonald AH. Universal Intrinsic Spin Hall Effect. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92(12):126603-126606; doi: 10.1103/PhysRevLett.92.
4. Wunderlich J, Kaestner B, Sinova J, Jungwirth T. Experimental observation of the spin-Hall effect in a two dimensional spin-orbit coupled semiconductor system. *Phys. Rev. Lett.*, 2005. 94(4):047204-047216; doi: 10.1103/PhysRevLett.94.047204.
5. Zhang S. Spin torques due to large Rashba fields. In book "Spin Current", Edited by Maekawa S, Valenzuela SO, Saitoh E, Kimura T. Oxford, University Press, 2012, pp. 424-431.
6. Sinova J, Valenzuela SO, Wunderlich J, Back CH, Jungwirth T. Spin Hall effects. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87:1213-1259; doi: 10.1103/RevModPhys.87.1213.
7. Hoffmann A. Spin hall effects in metals. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(10):5172-5193; doi: 10.1109/TMAG.2013.2262947.
8. Saitoh E, Ueda M, Miyajima H, Tatara G. Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect. *Applied Physics Letters*, 2006, 88:182509; doi: 10.1063/1.2199473.
9. Xiao Y, Wang H, Fullerton EE. Crystalline Orientation-Dependent Spin Hall Effect in Epitaxial Platinum. *Frontiers in Physics*, 2022. 9:791736; doi: 10.3389/fphy.2021.791736.
10. Игнатъев ВК, Лебедев НГ, Станкевич ДА. Эффект управления спиновой поляризацией электронов проводимости через деформацию ферромагнетика. *Письма в ЖТФ*, 2022, 48(23):30-33; doi: 10.21883/PJTF.2022.23.53949.19363.
11. Игнатъев ВК, Перченко СВ, Станкевич ДА. Спиновый эффект Холла в поликристаллических образцах немагнитных металлов пятого и шестого периодов. *Письма в ЖТФ*, 2023, 49(6):25-27; doi: 10.21883/PJTF.2023.06.54812.19437.
12. Берестецкий ВБ, Лифшиц ЕМ, Питаевский ЛП. *Квантовая электродинамика*. М., Физматлит, 1989, 388 с.
13. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. *Квантовая механика. Нерелятивистская теория*. М., Физматлит, 1974, 752 с.
14. Маделунг О. *Теория твердого тела*. М., Наука, 1980, 416 с.
15. Квасников ИА. *Теория равновесных систем: Статистическая физика*. М., Едиториал УРСС, 2002, 240 с.
16. Sinova J, Valenzuela SO, Wunderlich J, Back CH, Jungwirth T. Spin Hall effects. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87:1213; doi: 10.1103/RevModPhys.87.1213.
17. Cardarelli F. *Materials Handbook*. Springer International Publishing AG, Switzerland, 2018.
18. Dyakonov MI, Khaetskii AV. Spin Hall effect. In book "*Spin Physics in Semiconductors*". Edited by Dyakonov MI. Chapter 8. ser. in Solid-State Sciences. New York, Springer, 2008, 157:211-243; doi: 10.1007/978-3-319-65436-2\_8.
19. Dyakonov MI. Magnetoresistance due to edge spin accumulation. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (12):126601; doi: 10.1103/PhysRevLett.99.126601.
20. Morota M, Niimi Y, Ohnishi K, Wei DH, Tanaka T, Kontani H, Kimura T, Otani Y. Indication of intrinsic spin Hall effect in 4d and 5d transition metals. *Physical Review B*, 2011, 83:174405; doi: 10.1103/PhysRevB.83.174405.

21. Vlaminck V, Pearson JE, Bader SD, Hoffmann A. Dependence of spin pumping spin Hall effect measurements on layer thickness and stacking order. *Physical Review B*, 2013, 88(6):064414; doi: 10.1103/PhysRevB.88.064414.
22. Pai C-F, Liu L, Tseng HW, Ralph DC, Buhrman RA. Spin transfer torque devices utilizing the giant spin Hall effect of tungsten. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(12):122404-122412; doi: 10.1063/1.4753947.
23. Hao Q, Chen W, Xiao G. Beta ( $\beta$ ) tungsten thin films: Structure, electron transport, and giant spin Hall effect. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(18):182403; doi: 10.1063/1.4919867.
24. Hao Q, Xiao G. Giant Spin Hall Effect and Switching Induced by Spin-Transfer Torque in a  $W/Co_{40}Fe_{40}B_{20}/MgO$  Structure with Perpendicular Magnetic Anisotropy. *Physical Review Applied*, 2015, 3:034009; doi: 10.1103/PhysRevApplied.3.034009.
25. Reynolds N, Jadaun P, Heron JT, Jermain CL, Gibbons J, Collette R, Buhrman RA, Schlom DG, Ralph DC. Spin-Hall Torques Generated by Rare-Earth (Lanthanide) Thin Films. *Physical Review B*, 2017, 95:064412; doi: 10.1103/PhysRevB.95.064412.
26. Белов КП, Белянчикова МА, Левитин РЗ, Никитин СА. *Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики*. М., Наука, 1965, 320 с.
27. Smejkal L, MacDonald AH, Sinova J, Nakatsuji S, Jungwirth T. Anomalous Hall antiferromagnets. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7:482-496, doi: 10.1038/s41578-022-00430-3.
28. Wang HL, Du CH, Pu Y, Adur R, Hammel PC, Yang FY. Scaling of Spin Hall Angle in 3d, 4d, and 5d Metals from  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Metal Spin Pumping. *Physical Review Letters*, 2014, 112:197201, doi: 10.1103/PhysRevLett.112.197201.
29. Mosendz O, Vlaminck V, Pearson JE, Fradin FY, Bauer GEW, Bader SD, Hoffmann A. Detection and quantification of inverse spin Hall effect from spin pumping in permalloy/normal metal bilayers. *Physical Review B*, 2010, 82(21):214403, doi: 10.1103/PhysRevB.82.214403.
30. Du C, Wang H, Yang F, Hammel C. Systematic variation of spin-orbit coupling with d-orbital filling: Large inverse spin hall effect in 3d transition metals. *Physical Review B*, 2014, 90:40407, doi: 10.1103/PhysRevB.90.140407.
31. Valenzuela S, Tinkham M. Direct electronic measurement of the spin Hall effect. *Nature*, 2006, 442:176-179, doi: 10.1038/nature04937.
32. Базилевский МВ. *Метод молекулярных орбит и реакционная способность органических молекул*. М., Химия, 1969, 304 с.
33. Грибов ЛА, Муштакова СП. *Квантовая химия*. М., Гардарики, 1999, 390 с.

**Игнатъев Вячеслав Константинович**

*д.ф.-м.н., профессор*

Волгоградский государственный университет

г. Волгоград 400062, Россия

E-mail: vkignatjev@yandex.ru

**Перченко Сергей Владимирович**

*к.ф.-м.н.*

Волгоградский государственный университет

г. Волгоград 400062, Россия

E-mail: perchenko@volsu.ru

**Станкевич Дмитрий Александрович**

*к.ф.-м.н., доцент*

Волгоградский государственный университет

г. Волгоград 400062, Россия

E-mail: stankevich@volsu.ru



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.101

## Оптимизация оптического поглощения в спинтронных терагерцевых излучателях с использованием брэгговских отражателей

Горбатова А.В., Буряков А.М.

МИРЭА-Российский технологический университет, <https://www.mirea.ru/>

Москва 119454, Российская Федерация

E-mail: [gorbatova@mirea.ru](mailto:gorbatova@mirea.ru), [buryakov@mirea.ru](mailto:buryakov@mirea.ru)

Поступила 21.10.2023, рецензирована 25.10.2023, принята 31.10.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН Ю.К. Фетисовым

**Аннотация:** Разработана оптимизированная конструкция спинтронного терагерцевого излучателя, основанная на двухслойной структуре Co/Pt с интегрированным распределенным брэгговским отражателем. Внедрение брэгговского зеркала между структурой Co/Pt и кремниевой подложкой способствует повышению оптического поглощения в ферромагнитном слое, что усиливает генерацию спинового тока и, следовательно, ТГц сигнала. Для расчета оптического поглощения в ферромагнитном слое спинтронного излучателя была разработана модель, учитывающая параметры брэгговского зеркала (толщина слоев, период) на основе сверхрешеточной структуры  $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]_N$ . Модель основывается на решении уравнения Максвелла для электромагнитной волны в программном пакете COMSOL Multiphysics. Также было проанализировано влияние антиотражающих диэлектрических покрытий на уровень оптического поглощения в ферромагнитном слое. Исследование подтвердило, что применение оптимизированного брэгговского зеркала является достаточным для достижения оптимального поглощения.

**Ключевые слова:** терагерцевое излучение, спинтронный эмиттер, брэгговское зеркало, антиотражающее покрытие, резонатор Фабри-Перо, COMSOL Multiphysics

УДК 535.34, 537.9

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10353, <https://rscf.ru/project/21-79-10353/>

**Для цитирования:** Горбатова А.В., Буряков А.М. Оптимизация оптического поглощения в спинтронных терагерцевых излучателях с использованием брэгговских отражателей. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):101-110. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.101.

## Optimization of optical absorption in spintronic terahertz emitters using Bragg reflectors

Anastasiya V. Gorbatova, Arseny M. Buryakov

MIREA-Russian technological university, <https://www.mirea.ru/>

Moscow 119454, Russian Federation

E-mail: [gorbatova@mirea.ru](mailto:gorbatova@mirea.ru), [buryakov@mirea.ru](mailto:buryakov@mirea.ru)

Received October 21, 2023, peer-reviewed October 25, 2023, accepted October 31, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** An optimized design of a spintronic terahertz emitter has been developed, based on a bilayer Co/Pt structure with an integrated distributed Bragg reflector. The incorporation of the Bragg mirror between the Co/Pt structure and the silicon substrate enhances optical absorption in the ferromagnetic layer, thereby amplifying spin current generation and, consequently, THz signal. A model was developed for calculating the optical absorption in the ferromagnetic layer of the spintronic emitter, taking into account the parameters of the Bragg mirror (layer thicknesses, period) based on the superlattice structure  $[\text{TiO}_2/\text{SiO}_2]_N$ . This model is grounded on the solution of Maxwell's equations for electromagnetic waves using the COMSOL Multiphysics software. The

effect of anti-reflective dielectric coatings on the level of optical absorption in the ferromagnetic layer was also analyzed. The study confirmed that using the optimized Bragg mirror is sufficient for achieving optimal absorption.

*Keywords:* terahertz radiation, spintronic emitter, Bragg mirror, anti-reflection coating, Fabry-Perot cavity, COMSOL Multiphysics

UDC 535.34, 537.9

*Acknowledgments:* The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 21-79-1035, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10353/>

*For citation:* Anastasiya V. Gorbatova, Arseny M. Buryakov. Optimization of optical absorption in spintronic terahertz emitters using Bragg reflectors. *RENSIT: Radioelectronics, Nanosystems, Information Technologies* 2024, 16(1):101-110e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.101.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (102)
  2. МОДЕЛЬ ТГц ГЕНЕРАТОРА С БРЭГГОВСКИМ ЗЕРКАЛОМ И ПРОСВЕТАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ (103)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (105)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (108)
- ЛИТЕРАТУРА (108)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение в диапазоне 0.1-30 ТГц представляет собой эффективное средство для спектроскопического анализа. Оно открывает новые горизонты в исследованиях физики конденсированных сред, таких как фононные и магнонные моды, электронная и спиновая динамика [1–4]. В связи с этим наблюдается растущий спрос на высокоомощные и широкополосные терагерцовые излучатели, которые могут возбуждать разнообразные физические процессы в твердых телах. Среди ТГц эмиттеров наиболее известными и используемыми в ТГц спектрометрах являются нелинейно-оптические кристаллы, такие как  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{ZnTe}$  и  $\text{GaP}$  [5], органические кристаллы, фотопроводящие антенны (ФПА) и спинтронные терагерцовые эмиттеры (СТЭ) [5,6]. Первые два типа источников работают на основе эффекта нелинейно-оптического выпрямления [5–7], в то время как два последних – на основе сверхбыстрой генерации токов [8,9]. Большинство нелинейно-оптических кристаллов генерирует ТГц импульсы с пиковой напряженностью около 100 кВ/см [5,6]. Исключением является  $\text{LiNbO}_3$ : при накачке скошенным по фронту импульсом для достижения фазового согласования и при криогенных температурах он генерирует ТГц

импульсы с пиковой напряженностью свыше 4 МВ/см [10]. Органические кристаллы, такие как ВНА, также позволяют получать ТГц импульсы с большой напряженностью электрического поля до  $\sim 1-10$  МВ/см при спектральной ширине от 1 до 10 ТГц [5,6]. Однако их стабильность зависит от условий оптической накачки, что часто требует использования ИК-лазеров. Что касается нелинейно-оптических и органических кристаллов, для генерации высокой напряженности в ТГц импульсе, их часто используют в сочетании с лазерами накачки с мощностью несколько десятков мДж. В отличие от них, ФПА не требуют больших энергий, однако предел их напряженности в редких случаях превышает 100 кВ/см [5,6].

В последние годы особое внимание уделяется спинтронным терагерцовым эмиттерам (СТЭ), функционирующим на основе спин-зарядовой конверсии [8]. Согласно "дорожной карте" 2023 года, ТГц спинтроника предлагает новые функциональные возможности для ТГц фотоники в области генерации, модуляции и детектирования ТГц излучения [11]. Классический дизайн СТЭ представляет собой бислойную (трехслойную) структуру на основе ферромагнитных (ФМ) и немагнитных металлов (НМ): ФМ/НМ или НМ( $\pm\gamma$ )/ФМ/НМ( $\mp\gamma$ ), где  $\gamma$  – знак угла спин-Холла [12]. Толщина пленок в структуре не превышает нескольких нанометров ( $\sim 2-3$  нм) [12]. Принцип работы СТЭ включает в себя четыре фундаментальных этапа [13]:

1. Поглощение оптического импульса лазерной накачки.
2. Генерация спинового тока в магнитном слое и его перенос в немагнитный слой.

3. Преобразование спинового тока в поперечный ток заряда.

4. Функционирование последнего как источника ТГц электромагнитного импульса.

Среди основных достоинств СТЭ можно отметить их простую архитектуру, высокую технологичность, высокие амплитуды генерируемых ТГц импульсов (от 100 кВ/см до 1.5 МВ/см) и широкую рабочую полосу частот (0.1-30 ТГц) [6]. Дополнительные важные преимущества включают возможность тонкой настройки параметров ТГц излучения, таких как поляризация, эллиптичность, амплитуда и частотный диапазон [14-18].

Несмотря на многочисленные достоинства СТЭ, низкое поглощение излучения накачки оптического и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона приводит к низкой оптико-ТГц конверсии. Этот недостаток связан, главным образом, с малой толщиной стандартных СТЭ. На сегодняшний день предпринято немало усилий для улучшения указанных параметров, среди которых: модификация функциональных слоев СТЭ (тип материала, толщина и др.) [12,19-21], использование схем каскадного усиления ТГц излучения [22], усиление ТГц-излучения за счет создания гибридных структур, сочетающих подходы спин-зарядовой конверсии и создания антенн на поверхности пленок СТЭ [18,23], применение подходов плазмоники и создание микроструктурированных СТЭ [24-26], создание условий резонансного поглощения оптического излучения в функциональной структуре СТЭ за счет интеграции диэлектрических (брэгговских) зеркал [27,28]. Среди всех перечисленных подходов, последний представляется наиболее простым с точки зрения технологии. Наряду с брэгговскими зеркалами использование антиотражающих покрытий (АОП), работающих в ИК-диапазоне и выполняющих также защитную функцию, позволит уменьшить потери возбуждающего излучения при отражении от границы воздух/СТЭ.

Данная работа направлена на оптимизацию СТЭ на основе слоев Co/Pt с точки зрения увеличения оптического поглощения в ферромагнитном слое кобальта. Методом численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics проанализированы

два подхода для достижения наиболее эффективного поглощения излучения накачки в функциональном слое СТЭ: 1) создание брэгговских зеркал – аналогов оптических резонаторов между СТЭ и подложкой; 2) использование антиотражающих покрытий на поверхности СТЭ.

## 2. МОДЕЛЬ ТГЦ ГЕНЕРАТОРА С БРЭГГОВСКИМ ЗЕРКАЛОМ И ПРОСВЕТАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ.

Концепция создания СТЭ с применением брэгговского зеркала основывается на базовых процессах генерации ТГц излучения. Одним из ключевых является поглощение оптического импульса ферромагнитным слоем гетероструктуры СТЭ. Исходя из формулы (1), амплитуда сгенерированной ТГц волны напрямую пропорциональна поглощенной энергии оптического луча возбуждения [13,29]:

$$E_{THz} \propto \frac{P_{abs}}{d_{Co} + d_{Pt}} \tanh \frac{d_{Co} + d_0}{2\lambda_{pol}} \tanh \frac{d_{Pt}}{2\lambda_{pol}} \times \frac{1}{n_{air} + n_{sub} + Z_0(\sigma_{Co}d_{Co} + \sigma_{Pt}d_{Pt})} e^{-\frac{d_{Co} + d_{Pt}}{S_{THz}}}, \quad (1)$$

где  $P_{abs}$  – мощность лазерного излучения, поглощенная излучателем,  $d_{Co}$  – толщина ферромагнитного слоя кобальта,  $d_{Pt}$  – толщина немагнитного слоя платины,  $d_0$  – критическое значение толщины ферромагнитного слоя, ниже которого ферромагнитный слой теряет свои магнитные свойства,  $\lambda_{pol}$  – характеристическая константа спиновой поляризации, возникающая в случае, когда  $d > d_0$ ,  $n_{air}$ ,  $n_{sub}$  и  $Z_0$  – показатель преломления воздуха, показатель преломления подложки на ТГц частотах и импеданс вакуума, соответственно,  $\sigma_{Co}$  и  $\sigma_{Pt}$  – обозначают электропроводность двух материалов, соответственно,  $S_{THz}$  – эффективный обратный коэффициент ослабления ТГц излучения в обоих металлических слоях. Отметим, что упрощенная формула не учитывает спиновые и зарядовые составляющие [13,29].

Переходя к вопросу оптимизации поглощательной способности структуры СТЭ, рассмотрим основные принципы работы и характеристики брэгговского зеркала. Брэгговское зеркало характеризуется периодичной структурой из двух материалов с различными показателями



преломления. Необходимое количество периодов в брэгговском зеркале для достижения оптимального отражения определяется разницей показателей преломления двух диэлектрических материалов:  $\Delta n/n = (n_H - n_L)/n_H$ , где индексы  $H$  и  $L$  – соответствуют материалам с высоким и низким коэффициентом преломления. Брэгговское зеркало будет отражать 100% падающего излучения на центральной длине волны  $\lambda_p = 2(n_H d_H + n_L d_L)$ , где  $d$  – толщина слоев. Максимальная эффективность отражения будет достигаться при условии равенства толщин отдельных слоев четверти длины волны  $n_H d_H = n_L d_L = \lambda_p / 4$ . Добротность резонатора при этом будет определяться как  $Q = f/\Delta f$ , где  $f$  и  $\Delta f$  – частота и ширина частотного пика [30]. В контексте СТЭ, экспериментальное применение брэгговского зеркала было представлено в работе [27]. В этой работе в трехслойном спинтронном эмиттере W/CoFeB/Pt была реализована брэгговская структура [TiO<sub>2</sub> (113 нм,  $n = 2.265$ )|SiO<sub>2</sub> (185 нм,  $n = 1.455$ )]<sub>5</sub>, оптимизированная для длины волны накачки ~1030 нм. Результатом стало удвоенное электрическое поле в ТГц диапазоне и четырехкратное увеличение мощности. Другой исследовательский опыт, представленный в работе [28], показал улучшение характеристик СТЭ с оптической накачкой на 800 нм до 6 раз благодаря структуре [SiO<sub>2</sub> (165 нм) TiO<sub>2</sub> (94 нм)]<sub>5</sub>. Таким образом, за счет создания оптического резонатора можно существенно увеличить поглощение в структуре СТЭ, что, соответственно, приведет к увеличению ТГц мощности.

Оптимизация свойств брэгговского зеркала играет важную роль в увеличении поглощения оптической накачки, однако для обеспечения наилучшего прохождения оптической накачки через СТЭ не менее важно создание условий полного "антиотражения" за счет использования АОП на границе воздух/СТЭ. Существуют два ключевых критерия для выполнения этого условия [31]. Во-первых, волны, отраженные от поверхности структуры и от интерфейса, должны иметь разность фаз  $\delta = n\pi/2$ , где  $n$  – показатель преломления пленки. Во-вторых, толщина пленки ( $d$ ) должна быть кратна  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина волны падающего луча, а  $i$  – нечетное целое положительное число. АОП могут быть как однородными (один однородный слой с

показателем преломления  $n$ ), так и неоднородными (слои с градиентом  $n$  в каждом отдельном слое).

Для обеспечения условий полного отражения в случае использования однородного АОП, показатель преломления должен быть равен  $n = \sqrt{n_{air} n_s}$ , где  $n_s$  – показатель преломления подложки, а толщина АОП ( $b_{ARC}$ ) равна четверти длины волны. Однослойные однородные АОП используются для умеренного подавления коэффициента отражения до 2.5% в очень широком спектральном диапазоне (450-1100 нм) при нормальном падении. Типичные примеры однослойных АОП для видимого и ИК-диапазонов: MgF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> и др. Чтобы еще больше уменьшить коэффициент отражения, можно использовать двухслойные АОП. Необходимое и достаточное условие для показателя преломления в случае двухслойного покрытия с одинаковой оптической толщиной ( $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$ ) для обеспечения нулевого коэффициента отражения:  $n_1 n_2 = n_0 n_s$  [31].

В данной работе представлена модель классического СТЭ, состоящая из двухслойной структуры (Рис. 1а). Оба слоя, сформированные

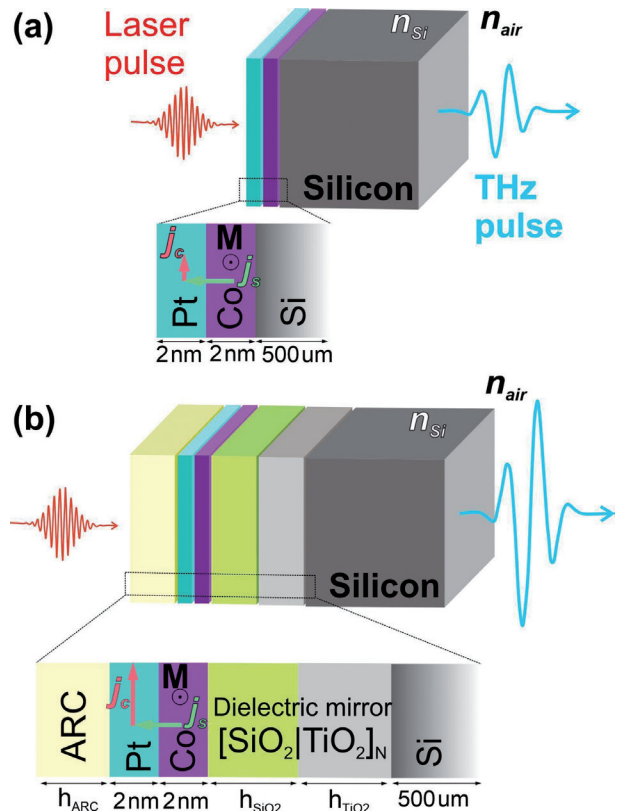


Рис. 1. (а) Конструкция СТЭ, выполненная на подложке из кремния. (б) Конструкция СТЭ с брэгговским зеркалом, выполненная на подложке из кремния, а также с наличием просветляющего покрытия

из Co и Pt, имеют одинаковую толщину – 2 нм. Выбор таких значений толщин  $d_{Co} = d_{Pt}$  основывался на оптимальном сочетании критической толщины ферромагнитного слоя  $d_0$  и эффективного коэффициента ослабления ТГц излучения  $S_{THz}$  в обоих металлических слоях. Большинство экспериментальных и теоретических исследований подтверждают, что максимальная генерация ТГц достигается в двухслойной структуре СТЭ с общей толщиной 4 нм [12,29]. Далее, между СТЭ и подложкой высокоомного кремния размещается брэгговское зеркало, представляющее собой свехрешетку типа  $[SiO_2 | TiO_2]_N$ , где  $N$  принимает значения 1, 3, 5 и 10 (Рис. 1б). Подложка из высокоомного кремния была выбрана, так как обладает максимальной пропускной способностью для ТГц излучения ( $n_{Si_{THz}} \approx 3.4 \gg n_{air} \approx 1$ ). На Рис. 1а изображена схема СТЭ без брэгговского зеркала. Схема образца с использованием брэгговского зеркала представлена на Рис. 1б. Для защиты поверхности СТЭ от внешних воздействий и оптимизации прохождения излучения использовано антиотражающее покрытие (АОП).

Для расчета поглощения в СТЭ на основе бислойной структуры Co/Pt использовалась программная платформа мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Физический интерфейс Optics > Wave Optics > Electromagnetic Waves, Frequency Domain позволяет получать распределение электромагнитного поля в среде в ходе решения уравнения Максвелла для электромагнитной волны:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\lambda\sigma}{2\pi c \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0, \quad (2)$$

где  $\mu_r$ ,  $\epsilon_r$  – магнитная и диэлектрическая проницаемость материала,  $\sigma$  – его проводимость,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $k_0$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения накачки,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\vec{E}$  – комплексный вектор электрического поля.

Моделирование электромагнитной волны было выполнено с использованием граничного условия "Port", при этом вектор напряженности электрического поля был ориентирован вдоль оси X. Установленная амплитуда электрического поля составила 1 В/м. К боковым границам

модели было применено граничное условие "Perfect Electric Conductor", с условием  $\vec{n} \times \vec{E} = 0$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе рассматривается простейший вариант структуры, изображенной на Рис. 1а, без брэгговского зеркала и АОП. Стоит отметить, что для подложек кремния всегда характерно наличие тонкого слоя естественного окисла  $SiO_2$  на поверхности. Поглощение оптического излучения с длиной волны 800 нм в слое  $SiO_2$  достаточно мало (коэффициент экстинкции  $k_{SiO_2} = 0.000687$  [32]). В то же время, учитывая, что показатель преломления окисла  $n_{SiO_2} = 1.4574$  [32], а сам слой  $SiO_2$  находится между структурой СТЭ и подложкой кремния с большими показателями преломления в ИК-диапазоне ( $n_{Co} = 4.56$ ,  $n_{Pt} = 6.57$  [33]) и  $n_{Si} = 3.6690$  [34]), это приводит к возникновению явления многолучевой интерференции. Такая структура представляет собой самый простейший вариант оптического резонатора, и может позволить избежать использования усложненных конструкций для умеренного подавления обратного отражения. Контролируя толщину окисла, можно добиться увеличения оптического поглощения, что также может быть использовано для увеличения ТГц сигнала.

Результат, представленный на Рис. 2а,б, демонстрирует карту оптического поглощения в ферромагнитном слое кобальта  $A_{Co}$  в зависимости от толщины  $SiO_2$  и длины волны возбуждающего излучения (500-800 нм). Как видно из рисунка, во всем диапазоне длин

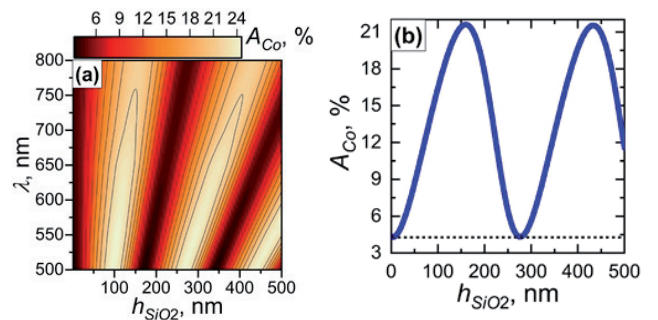


Рис. 2. Влияние толщины слоя  $SiO_2$  на оптическое поглощение в СТЭ на основе структуры Pt(2 нм)/Co(2 нм). (а) Карта распределения поглощения в СТЭ в оптическом и ближнем ИК-диапазонах длин волн накачки. (б) Зависимость поглощения в ферромагнитном слое от толщины  $SiO_2$  на длине волны 800 нм.

волн для случая с минимальной толщиной естественного окисла  $\sim 1-2$  нм поглощение в слое кобальта составляет приблизительно 4.3%. Однако с ростом толщины окисла максимум поглощения смещается в область 500 нм и может достигать 24% от общего количества возбуждающего излучения. Если рассматривать длину волны 800 нм (Рис. 2*b*), на которой работает большинство коммерчески доступных фемтосекундных лазерных систем, используемых для накачки ТГц СТЭ, то на этой длине волны поглощение не превышает 21.6% для толщины окисла  $\sim 160$  нм. При этом суммарное поглощение в структуре  $\text{Co}(2 \text{ нм})/\text{Pt}(2 \text{ нм})$  составляет примерно 52.5%, а доля отраженного света, соответственно – 7.6%. Остальная часть возбуждающего излучения – 39.3% проходит через СТЭ и поглощается в подложке  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

Данный пример указывает на неэффективность одной лишь пленки  $\text{SiO}_2$  между функциональной структурой СТЭ и подложкой кремния в целях обеспечения максимального поглощения. Поэтому на следующем этапе нами была рассмотрена структура СТЭ с брэгговским зеркалом на основе сверхрешетки  $[\text{SiO}_2|\text{TiO}_2]_N$ . Комбинация слоев  $\text{SiO}_2$  со слоями  $\text{TiO}_2$ , с сильно отличающимися показателями преломления на длине волны 800 нм ( $n_{\text{TiO}_2} = 2.0951$ ,  $n_{\text{SiO}_2} = 1.4608$ ) [32,35], позволяет уменьшить долю излучения, пропускаемого в подложку. Ключевая задача для достижения максимального поглощения в СТЭ – определение оптимального периода  $N$  для структуры  $[\text{SiO}_2|\text{TiO}_2]_N$  и оптимальных толщин каждого диэлектрического слоя. На Рис. 3*a-d* представлены результаты расчетов эффективности поглощения в слое кобальта для различных значений  $N$  (1, 3, 5, 10). Рассматривались толщины слоя  $\text{SiO}_2$  в диапазоне 1-300 нм и  $\text{TiO}_2$  – в диапазоне 1-300 нм.

Из анализа представленных данных очевидно, что структура с одним периодом  $[\text{SiO}_2|\text{TiO}_2]$  не дает значительного прироста поглощения в сравнении с рассмотренной ранее конфигурацией  $\text{Pt}/\text{Co}/\text{SiO}_2(160 \text{ нм})/\text{Si}$ . Максимальное поглощение в слое  $\text{Co}$  ограничивается 21.6% (Рис. 3*a*). При

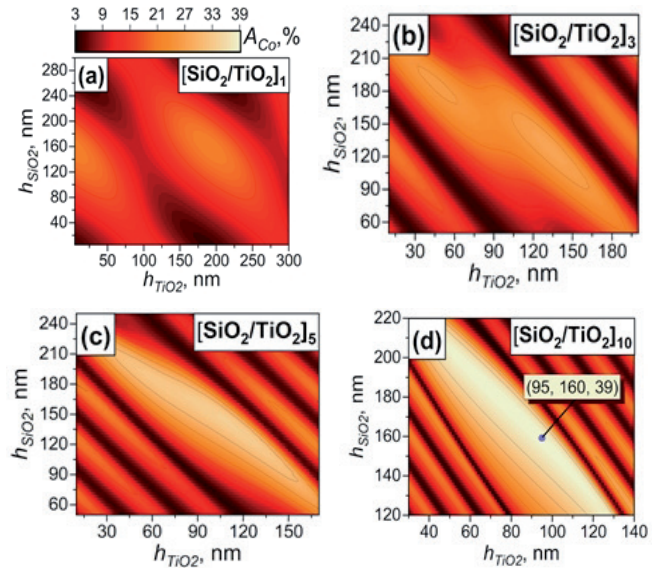


Рис. 3. Зависимость поглощения в слое кобальта в СТЭ с брэгговским зеркалом  $[\text{SiO}_2|\text{TiO}_2]_N$  от толщины диэлектрических слоев  $h_{\text{SiO}_2}$  и  $h_{\text{TiO}_2}$  и периода структуры  $N$ :  $N = 1$  (a),  $N = 3$  (b),  $N = 5$  (c),  $N = 10$  (d).

увеличении периодичности брэгговского зеркала наблюдается усиление поглощения в СТЭ. Для  $N = 3$  (Рис. 3*b*) максимум поглощения смещается к 27.5%. Если же рассматривать структуру  $[\text{SiO}_2(145 \text{ нм})|\text{TiO}_2(105 \text{ нм})]_5$  (Рис. 3*c*), аналогичную той, что была исследована в работе [28], пиковое поглощение в ферромагнитном слое достигает  $\sim 35\%$ . При дальнейшем увеличении числа периодов до 10 в конфигурации  $[\text{SiO}_2(160 \text{ нм})|\text{TiO}_2(95 \text{ нм})]_{10}$ , поглощение в слое  $\text{Co}$  возрастает до  $\sim 39\%$  (см. Рис. 3*d*). Дополнительное увеличение числа периодов сверхрешетки становится нецелесообразным, так как общее поглощение в СТЭ (учитывая слои кобальта и платины) при 10 периодах сверхрешетки достигает  $\sim 97\%$ .

Для достижения максимальной эффективности поглощения в слое кобальта  $A_{\text{Co}}$  были проведены дополнительные расчеты оптимизированной структуры  $[\text{SiO}_2(160 \text{ нм})|\text{TiO}_2(95 \text{ нм})]_{10}$ . В этих расчетах учитывался фактор применения антиотражающего покрытия к структуре СТЭ, как иллюстрируется на Рис. 1*b*. При выборе материала для такого покрытия критически важно правильно подобрать его показатель преломления и оптимальную толщину для эффективной работы на длине волны 800 нм. В рамках нашего

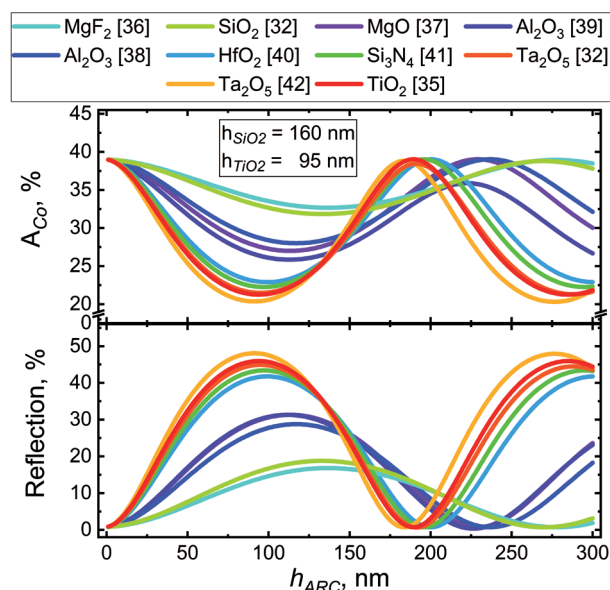


**Таблица 1**  
Материалы для антиотражающих покрытия видимого и ИК-диапазонов длин волн

Материал	$n$	Источник
MgF <sub>2</sub>	1.4194	[36]
SiO <sub>2</sub>	1.4574	[32]
MgO	1.7276	[37]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.6710 1.75	[38] [39]
HfO <sub>2</sub>	1.9809	[40]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.9962	[41]
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.0719 2.1594	[32] [42]
TiO <sub>2</sub>	2.0951	[35]

исследования была рассмотрена широкая серия материалов, широко используемых в качестве антиотражающих покрытий ближней ИК-области спектра. Рассматриваемые материалы и характерные для них значения показателей преломления  $n$  на длине волны 800 нм с указанием литературных источников приведены в **Таблице 1**.

**Рис. 4** представляет результаты комплексного анализа отражения и поглощения излучения с длиной волны 800 нм в СТЭ Pt(2 нм)/Co(2 нм), проведенного в зависимости от типа материала антиотражающего покрытия (см. Табл. 1) и толщины этого покрытия.



**Рис. 4.** Характеристики поглощения и отражения для СТЭ на основе Pt(2 нм)/Co(2 нм) с брэгговской решеткой [SiO<sub>2</sub>(160 нм)|TiO<sub>2</sub>(95 нм)]<sub>10</sub> и с антиотражающим покрытием.

На основе наших расчётов мы пришли к выводу, что применение антиотражающего покрытия не приводит к значительному увеличению поглощения в слое кобальта. Этот результат не удивителен, учитывая ранее полученные результаты, согласно которым эффективность поглощения в СТЭ при использовании брэгговского зеркала с  $N = 10$  приближается к 100%. При минимальной толщине АОП для всех рассматриваемых материалов наблюдается максимум поглощения в слое кобальта (см. Рис. 4). Это подтверждает, что оптимизированной конструкции брэгговского зеркала достаточно для эффективного поглощения излучения, проходящего через структуру.

Несмотря на то, что АОП разных типов неэффективны и не могут быть использованы с точки зрения их основной функции, их высокая устойчивость к различным внешним факторам позволяет использовать их в качестве обычных защитных покрытий. Толщину защитного слоя можно выбрать таким образом, чтобы он не оказывал отрицательного воздействия на оптические свойства и не снижал эффективность поглощения излучения лазера накачки. Анализируя данные, представленные на Рис. 4, можно выделить три ключевые группы материалов, использованных в моделировании: 1) TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и HfO<sub>2</sub>; 2) MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 3) SiO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>. Материалы первой группы демонстрируют наиболее выраженные минимумы поглощения с характерным периодом в 90 нм, достигая поглощения до ~ 20% и отражение ~ 50%. В отличие от них, материалы второй группы показывают более плавные минимумы поглощения, достигая поглощения ~ 25% с характерным периодом по толщине слоев ~ 115 нм. Материалы третьей группы обладают наименьшей чувствительностью к изменению толщины, с минимальным поглощением в ~ 32% и характерным периодом в ~ 137 нм. Таким образом, различные материалы АОП имеют свои уникальные характеристики, которые следует учитывать при выборе наиболее подходящего для конкретных оптических приложений защитного покрытия.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была разработана модель спинтронного терагерцового эмиттера, интегрированного с брэгговскими зеркалами, структурированными в форме сверхрешетки  $[\text{SiO}_2 (160 \text{ нм}) | \text{TiO}_2 (95 \text{ нм})]_N$ , где  $N$  обозначает число периодов. Исследования показали, что при  $N$  равном 10, разработанная модель обеспечивает максимальное оптическое поглощение в слое кобальта, достигающее приблизительно 39%. Одновременно общее поглощение в структуре СТЭ стремится к 100%. Это представляет собой более чем девятикратное увеличение по сравнению с поглощением в неоптимизированной структуре СТЭ  $\text{Co}(2 \text{ нм})/\text{Pt}(2 \text{ нм})$  на подложке из высокоомного кремния, которое изначально составляло всего 4.3%. Эти результаты очень важны, поскольку подчеркивают потенциал использования оптических резонаторов в виде брэгговских зеркал для значительного усиления оптико-терагерцовой конверсии в структурах СТЭ и оптимизации мощностей лазерной накачки. Было также обнаружено, что даже относительно простая система СТЭ/ $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с оптимизированной толщиной оксидного слоя в 160 нм может увеличить поглощение примерно в 5 раз. Дополнительный анализ показал, что применение антиотражающих покрытий не приводит к дополнительному увеличению поглощения в ферромагнитном слое оптимизированной структуры СТЭ с брэгговским зеркалом  $[\text{SiO}_2 (160 \text{ нм}) | \text{TiO}_2 (95 \text{ нм})]$ . Однако важно отметить, что присутствие таких отражающих покрытий, как  $\text{MgF}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , не ухудшает поглощательные и отражательные характеристики структуры, что позволяет рассматривать их применение в качестве защитных слоев в зависимости от специфических требований.

В заключение хочется подчеркнуть важность комплексного подхода в дизайне структур СТЭ, который должен включать не только оптимизацию ферромагнитного слоя, но и интеграцию дополнительных оптических элементов, таких как диэлектрические сверхрешетки и защитные покрытия. Такой многоаспектный подход способствует не только глубокому пониманию процессов

взаимодействия света с этими структурами, но и открывает новые перспективы для разработки высокоэффективных устройств в области терагерцовой электроники и спинтроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kubacka T, Johnson JA, Hoffmann MC, Vicario C, de Jong S, Beaud P, Grübel S, Huang S-W, Huber L, Patthey L, Chuang Y-D, Turner JJ, Dakovski GL, Lee W-S, Minitti MP, Schlotter W, Moore RG, Hauri CP, Koohpayeh SM, Scagnoli V, Ingold G, Johnson SL, Staub U. Large-Amplitude Spin Dynamics Driven by a THz Pulse in Resonance with an Electromagnon. *Science*, 2014, 343(6177):1333-1336.
2. Blank TGH, Grishunin KA, Mashkovich EA, Logunov MV, Zvezdin AK, Kimel AV. THz-Scale Field-Induced Spin Dynamics in Ferrimagnetic Iron Garnets. *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127(3):037203.
3. Mikhaylovskiy RV, Hendry E, Kruglyak VV, Pisarev RV, Rasing T, Kimel AV. Terahertz emission spectroscopy of laser-induced spin dynamics in  $\text{TmFeO}_3$  and  $\text{ErFeO}_3$  orthoferrites. *Phys. Rev. B.*, 2014, 90(18):184405.
4. Zhang W, Maldonado P, Jin Z, Seifert TS, Arabski J, Schmerber G, Beaurepaire E, Bonn M, Kampfrath T, Oppeneer PM, Turchinovich D. Ultrafast terahertz magnetometry. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1):4247.
5. Fülöp JA, Tzortzakis S, Kampfrath T. Laser-Driven Strong-Field Terahertz Sources. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(3):1900681.
6. Bilyk VR, Brekhov KA, Agranat MB, Mishina ED. Dispersion of optical constants of  $\text{Si:PbGeO}$  crystal in the terahertz range. *Russian Technological Journal*, 2023, 11(3):38-45; doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45.
7. Blanchard F, Razzari L, Bandulet HC, Sharma G, Morandotti R, Kieffer JC, Ozaki T, Reid M, Tiedje HF, Haugen HK, Hegmann FA. Generation of 1.5  $\mu\text{J}$  single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture  $\text{ZnTe}$  crystal. *Opt. Express*, 2007, 15(20):13212.
8. Feng Z, Qiu H, Wang D, Zhang C, Sun S, Jin B, Tan W. Spintronic terahertz emitter. *J. Appl. Phys.*, 2021, 129(1):010901.
9. Lepeshov S, Gorodetsky A, Krasnok A, Rafailov E, Belov P. Enhancement of terahertz

- photoconductive antenna operation by optical nanoantennas. *Laser Photon. Rev.*, 2017, 11(1):1600199.
10. Wu X, Ma J, Zhang B, Chai S, Fang Z, Xia C-Y, Kong D, Wang J, Liu H, Zhu C-Q, Wang X, Ruan C-J, Li Y-T. Highly efficient generation of 0.2 mJ terahertz pulses in lithium niobate at room temperature with sub-50 fs chirped Ti:sapphire laser pulses. *Opt. Express*, 2018 26(6):7107.
  11. Leitenstorfer A, Moskalenko AS, Kampfrath T, Kono J, Castro-Camus E, Peng K, Qureshi N, Turchinovich D, Tanaka K, Markelz AG, Havenith M, Hough C, Joyce HJ, Padilla WJ, Zhou B, Kim K-Y, Zhang X-C, Jepsen PU, Dhillon S, Vitiello M, Linfield E, Davies AG, Hoffmann MC, Lewis R, Tonouchi M, Klarskov P, Seifert TS, Gerasimenko YA, Mihailovic D, Huber R, Boland JL, Mitrofanov O, Dean P, Ellison BN, Huggard PG, Rea SP, Walker C, Leisawitz DT, Gao JR, Li C, Chen Q, Valušis G, Wallace VP, Pickwell-MacPherson E, Shang X, Hesler J, Ridler N, Renaud CC, Kallfass I, Nagatsuma T, Zeitler JA, Arnone D, Johnston MB, Cunningham J. The 2023 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2023, 56(22):223001.
  12. Seifert T, Jaiswal S, Martens U, Hannegan J, Braun L, Maldonado P, Freimuth F, Kronenberg A, Henrizi J, Radu I, Beaurepaire E, Mokrousov Y, Oppeneer PM, Jourdan M, Jakob G, Turchinovich D, Hayden LM, Wolf M, Münzenberg M, Kläui M, Kampfrath T. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation. *Nat. Photonics*, 2016, 10(7):483-488.
  13. Seifert TS, Cheng L, Wei Z, Kampfrath T, Qi J. Spintronic sources of ultrashort terahertz electromagnetic pulses. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120(18):180401.
  14. Khusyainov D, Ovcharenko S, Gaponov M, Buryakov A, Klimov A, Tiercelin N, Pernod P, Nozdrin V, Mishina E, Sigov A, Preobrazhensky V. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure. *Sci. Rep.*, 2021, 11(1):697.
  15. Lezier G, Koleják P, Lampin J-F, Postava K, Vanwollegem M, Tiercelin N. Fully reversible magnetoelectric voltage controlled THz polarization rotation in magnetostrictive spintronic emitters on PMN-PT. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120(15):152404.
  16. Khusyainov D, Ovcharenko S, Buryakov A, Klimov A, Pernod P, Nozdrin V, Mishina E, Sigov A, Preobrazhensky V, Tiercelin N. Composite Multiferroic Terahertz Emitter: Polarization Control via an Electric Field. *Phys. Rev. Appl.*, 2022, 17(4):044025.
  17. Buryakov AM, GorbatoVA AV, Avdeev PY, Lebedeva ED, Brekhov KA, Ovchinnikov AV, Gusev NS, Karashtin EA, Sapozhnikov MV, Mishina ED, Tiercelin N, Preobrazhensky VL. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(8):082404.
  18. Chen M, Wu Y, Liu Y, Lee K, Qiu X, He P, Yu J, Yang H. Current-Enhanced Broadband THz Emission from Spintronic Devices. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(4):1801608.
  19. Buryakov A, Avdeev P, Khusyainov D, Bezikonnyy N, Coclet A, Klimov A, Tiercelin N, Lavrov S, Preobrazhensky V. The Role of Ferromagnetic Layer Thickness and Substrate Material in Spintronic Emitters. *Nanomaterials*, 2023, 13(11):1710.
  20. Buryakov A, GorbatoVA AV, Avdeev P, Bezikonnyy N, Abdulaev D, Klimov A, Ovcharenko S, Mishina E. Controlled Spintronic Emitter of THz Radiation on an Atomically Thin WS<sub>2</sub>/Silicon Substrate. *Metals*, 2022, 12(10):1676.
  21. Khusyainov D, Guskov A, Ovcharenko S, Tiercelin N, Preobrazhensky V, Buryakov A, Sigov A, Mishina E. Increasing the Efficiency of a Spintronic THz Emitter Based on WSe<sub>2</sub>/FeCo. *Materials*, 2021, 14(21):6479.
  22. Jin Z, Peng Y, Ni Y, Wu G, Ji B, Wu X, Zhang Z, Ma G, Zhang C, Chen L, Balakin AV, Shkurinov AP, Zhu Y, Zhuang S. Cascaded Amplification and Manipulation of Terahertz Emission by Flexible Spintronic Heterostructures. *Laser Photon. Rev.*, 2022, 16(9):2100688.
  23. Nandi U, Abdelaziz MS, Jaiswal S, Jakob G, Gueckstock O, Rouzegar SM, Seifert TS, Kläui M, Kampfrath T, Preu S. Antenna-coupled spintronic terahertz emitters driven by a 1550 nm femtosecond laser oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(2):022405.
  24. Rathje C, von Seggern R, Meyer N, Denker C, Munzenberg M, Schafer S. Emission Properties



- of Structured Spintronic Terahertz Emitters. *Proc. 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, IEEE, 2019, pp. 1-2.
25. Liu S, Guo F, Li P, Wei G, Wang C, Chen X, Wang B, Zhao W, Miao J, Wang L, Xu Y, Wu X. Nanoplasmonic-Enhanced Spintronic Terahertz Emission. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(2):2101296.
  26. Song B, Song Y, Zhang S, Jin K, Zhu W, Li Q, Zhang Z, Lin X, Dai Y, Yan X, Ma G, Jin Z, Yao J. Controlling terahertz radiation with subwavelength blocky patterned CoFeB/Pt heterostructures. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(12):122003.
  27. Herapath RI, Hornett SM, Seifert TS, Jakob G, Kläui M, Bertolotti J, Kampfrath T, Hendry E. Impact of pump wavelength on terahertz emission of a cavity-enhanced spintronic trilayer. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(4):041107.
  28. Rouzegar R, Chekhov AL, Behovits Y, Serrano BR, Syskaki MA, Lambert CH, Engel D, Martens U, Münzenberg M, Wolf M, Jakob G, Kläui M, Seifert TS, Kampfrath T. Broadband Spintronic Terahertz Source with Peak Electric Fields Exceeding 1.5 MV/cm. *Phys. Rev. Appl.*, 2023, 19(3):034018.
  29. Torosyan G, Keller S, Scheuer L, Beigang R, Papaioannou ET. Optimized Spintronic Terahertz Emitters Based on Epitaxial Grown Fe/Pt Layer Structures. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1):1311.
  30. Yu Y, Cai J, Sun J, Zhang Z, Qin H. Fabrication and characterization of a wide-bandgap and high-Q terahertz distributed-Bragg-reflector micro cavities. *Opt. Commun.*, 2018, 426:84–88.
  31. Raut HK, Ganesh VA, Nair AS, Ramakrishna S. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy Environ. Sci.*, 2011, 4(10):3779.
  32. Rodríguez-de Marcos LV, Larruquert JI, Méndez JA, Aznárez JA. Self-consistent optical constants of SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(11):3622.
  33. Carey R, Newman DM, Sandoval PAG, Thomas BWJ, Grundy PJ, Lacey ETM. Optical, magneto-optical and related properties for Pt and Co multi-layer structures. *J. Magn. Soc. Japan.*, 1991, 15(91):25-28.
  34. Schinke C, Christian Peest P, Schmidt J, Brendel R, Bothe K, Vogt MR, Kröger I, Winter S, Schirmacher A, Lim S, Nguyen HT, MacDonald D. Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon. *AIP Adv.*, 2015, 5(6):067168.
  35. Sarkar S, Gupta V, Kumar M, Schubert J, Probst PT, Joseph J, König TAF. Hybridized Guided-Mode Resonances via Colloidal Plasmonic Self-Assembled Grating. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(14):13752-13760.
  36. Rodríguez-de Marcos LV, Larruquert JI, Méndez JA, Aznárez JA. Self-consistent optical constants of MgF<sub>2</sub>, LaF<sub>3</sub>, and CeF<sub>3</sub> films. *Opt. Mater. Express*, 2017, 7(3):989.
  37. Stephens RE, Malitson IH. Index of refraction of magnesium oxide. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1952, 49(4):249.
  38. Boidin R, Halenkovič T, Nazabal V, Beneš L, Němec P. Pulsed laser deposited alumina thin films. *Ceram. Int.*, 2016, 42(1):1177-1182.
  39. Querry MR. *Optical constants*. MISSOURI UNIVERSITY OF COLUMBIA, MISSOURI, 1985.
  40. Bright TJ, Watjen JI, Zhang ZM, Muratore C, Voevodin AA. Optical properties of HfO<sub>2</sub> thin films deposited by magnetron sputtering: From the visible to the far-infrared. *Thin Solid Films*, 2012, 520(22):6793-6802.
  41. Luke K, Okawachi Y, Lamont MRE, Gaeta AL, Lipson M. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microresonator. *Opt. Lett.*, 2015, 40(21):4823.
  42. Bright TJ, Watjen JI, Zhang ZM, Muratore C, Voevodin AA, Koukis DI, Tanner DB, Arenas DJ. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *J. Appl. Phys.*, 2013, 114(8):083515.
- Горбатова Анастасия Владимировна**  
аспирант  
МИРЭА-Российский технологический университет  
**78/4, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия**  
**E-mail: gorbatova@mirea.ru**
- Буряков Арсений Михайлович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
МИРЭА-Российский технологический университет  
**78/4, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия**  
**E-mail: buryakov@mirea.ru.**

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.111

## Сенсорное покрытие на основе липидного ленгмюровского монослоя с молекулами фермента глюкозооксидазы

Горбачев И.А., Колесов В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Поступила 01.12.2023, рецензирована 12.12.2023, принята 13.12.2023, опубликована 15.03.2024.

**Аннотация:** Создано сенсорное покрытие на основе ленгмюровского монослоя фосфолипидных молекул 1,2-дипальмитоил-sn-глицеро-3-фосфоэтаноламин (DPPE) с иммобилизованными молекулами фермента глюкозооксидазы и исследованы его сенсорные свойства. Методом изотерм сжатия исследован процесс встраивания молекул фермента глюкозооксидазы в ленгмюровский монослой фосфолипидных молекул DPPE. Показано, что адсорбция молекул глюкозооксидазы оказывает расширяющее действие на ленгмюровский монослой DPPE и приводит к увеличению площади на одну молекулу с  $32.5 \text{ \AA}^2$  до  $49 \text{ \AA}^2$  и уменьшению модуля сжатия монослоя с  $133 \text{ мН/м}$  до  $83 \text{ мН/м}$ . Также адсорбция глюкозооксидазы приводит к увеличению коэффициента десорбции монослоя в субфазу  $k_d$  с  $0.5 \cdot 10^{-3}$  до  $1.2 \cdot 10^{-3}$ . Методом атомно-силовой микроскопии охарактеризована морфология пленок с иммобилизованными молекулами фермента при различном времени его адсорбции. Увеличение времени адсорбции фермента приводит к уменьшению шероховатости поверхности формируемой пленки с  $3.6 \text{ нм}$  при  $5 \text{ минутах}$  до  $2.4 \text{ нм}$  при  $60 \text{ минутах}$ . Сформированные монослои DPPE с иммобилизованными молекулами фермента были перенесены на графитовые электроды. Методами циклической вольтамперометрии и импедансометрии изучены их сенсорные свойства. Полученные покрытия обладали чувствительностью к глюкозе в растворах с концентрацией от  $0$  до  $1 \text{ мг/мл}$ . Наличие линейной зависимости тока через измерительную ячейку в указанном диапазоне концентраций глюкозы делает созданные пленки перспективными для использования в качестве сенсорных покрытий.

**Ключевые слова:** амперометрический сенсор глюкозы, ферментативные сенсоры, пленки Ленгмюра-Блоджетт, биосенсоры

УДК 539.23, 544.032.7

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 22-29-20317.

**Для цитирования:** Горбачев И.А., Колесов В.В. Сенсорное покрытие на основе липидного ленгмюровского монослоя с молекулами фермента глюкозооксидазы. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):111-120. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.111.

## Sensor coating based on a lipid Langmuir monolayer with the glucose oxidase enzyme molecules

Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Received December 01, 2023, peer-reviewed December 12, 2023, accepted December 13, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** A sensor coating was created based on a Langmuir monolayer of 1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphoethanolamine (DPPE) with immobilized molecules of the enzyme glucose oxidase and its sensor properties were studied. The process of incorporation of glucose oxidase enzyme

molecules into a Langmuir monolayer of phospholipid DPPE molecules was studied using the compression isotherm method. Adsorption of glucose oxidase molecules has an expanding effect on the Langmuir monolayer of DPPE and leads to an increase in the area per molecule from  $32.5 \text{ \AA}^2$  to  $49 \text{ \AA}^2$  and a decrease in the compression modulus of the monolayer from  $133 \text{ mN/m}$  to  $83 \text{ mN/m}$ . Also, the adsorption of glucose oxidase leads to an increase in the desorption coefficient of the monolayer into the  $k_d$  subphase from  $0.5 \cdot 10^{-3}$  to  $1.2 \cdot 10^{-3}$ . The morphology of films with immobilized enzyme molecules at different adsorption times was characterized by atomic force microscopy. Increasing the enzyme adsorption time leads to a decrease in the surface roughness of the formed film from  $3.6 \text{ nm}$  at 5 minutes to  $2.4 \text{ nm}$  at 60 minutes. The formed DPPE monolayers with immobilized enzyme molecules were transferred to graphite electrodes. Their sensory properties were studied using cyclic voltammetry and impedance measurements. The resulting coatings were sensitive to glucose in solutions with concentrations from 0 to  $1 \text{ mg/ml}$ . The presence of a linear concentration dependence of the maximum and minimum currents and resistances in the specified concentration range makes the created films promising for use as touch coatings.

*Keywords:* amperometric glucose sensor, enzymatic sensors, Langmuir-Blodgett film, biosensors

UDC 534.22.093.3, 539.23

*Acknowledgments:* The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-20317.

*For citation:* Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov. Sensor coating based on lipid Langmuir monolayer with the glucose oxidase enzyme molecules. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):111-120e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.111.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (112)
  2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (113)
    - 2.1. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ (113)
    - 2.2. ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК (114)
    - 2.3. ИЗУЧЕНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ С ИММОБИЛИЗОВАННЫМ ФЕРМЕНТОМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (114)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (114)
    - 3.1. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ (114)
    - 3.2. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ АДСОРБЦИИ ФЕРМЕНТА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК (116)
    - 3.3. ИЗУЧЕНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ СФОРМИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ, ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (117)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (118)
- ЛИТЕРАТУРА (119)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Полисахариды, и в частности, глюкоза активно применяется в пищевой промышленности,

поэтому создание сенсоров глюкозы с повышенными показателями чувствительности и селективности является достаточно актуальной задачей для контролирования содержания ее в технологических процессах, в конечной продукции, а также в отходах производства. Перспективным решением указанной задачи является разработка сенсорного покрытия биосенсора на основе молекул фермента глюкозооксидазы (ГО).

Главной задачей при этом является закрепление молекулы фермента в сенсорном слое и сохранение ее активности на протяжении длительного периода времени. Одним из подходов, позволяющих, в рамках одной технологической операции, сформировать пленку с встроенными в нее молекулами фермента и обеспечить ее защиту от воздействия окружающей среды, является технология Ленгмюра-Блоджетт [1-4]. Ее использование позволяет сформировать бислойную мембраноподобную пленку с встроенными молекулами фермента. В такой пленке молекулы фермента будут защищены от внешнего воздействия тонким гидрофобным слоем липидных молекул. Таким образом, исследование механизма встраивания молекул



фермента в ленгмюровские монослои различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) является важной технологической задачей [5-8]. Подобный подход также может использоваться для допирования монослоев и пленок Ленгмюра-Блоджетт ионами металлов, растворенными в субфазе [9].

Авторами [10] изучалось влияние заряда головной группы молекул ПАВ на процесс встраивания молекул фермента в липидный монослой, при этом не было учтено влияния кислотности субфазы на заряд молекулы фермента. В работе [11] изучено влияние длины гидрофобной части молекулы липида на процесс адсорбции фермента. Также в работе изучалось время адсорбции молекул глюконооксидазы на поверхности воды до начала сжатия на фазовые переходы в монослое и его поверхностные свойства. Изучение влияния времени адсорбции на свойства ленгмюровских монослоев является актуальной задачей, поскольку для изготовления воспроизводимых образцов сенсорных покрытий необходимо точно контролировать количество адсорбированных пленкой молекул фермента. В работе [12] изучалась стабильность монослоев дипальмитоилфосфатной кислоты. Авторы большее внимание уделили поверхностным свойствам монослоев при адсорбции фермента и не акцентировали внимания на изменении морфологии пленок.

Стоит отметить работы, в которых изучался процесс адсорбции глюконооксидазы смешанными монослоями фосфолипидных молекул и наночастиц [13]. Также в этой работе было изучено влияние толщины пленок с иммобилизованным ферментом на чувствительность сенсоров на их основе. Показано, что при толщинах пленки до 10-11 нм концентрационная зависимость параметров сенсоров сохраняет линейность в больших диапазонах концентраций. В то же время, недостаточно информации о стабильности монослоев на поверхности водной субфазы. Этот аспект приобретает особую актуальность при попытке массового производства сенсорных покрытий с использованием технологии Ленгмюра-Блоджетт.

Поэтому в настоящей работе были изучены сенсорные свойства покрытия

на основе сформированного липидного ленгмюровского монослоя с молекулами фермента глюконооксидазы. Для этого методом изотерм сжатия была исследована стабильность монослоев 1,2-дипальмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфоэтаноламин в процессе адсорбции молекул глюконооксидазы и изучена морфология пленок, содержащих два типа молекул.

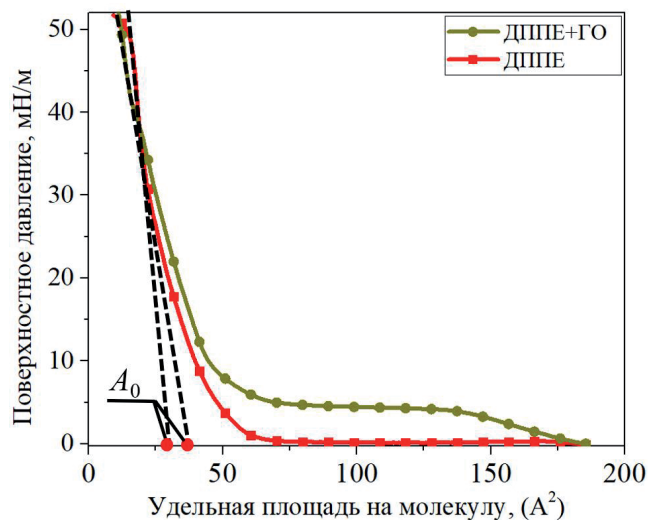
## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ

Для приготовления раствора 1,2-дипальмитоил-*sn*-глицеро-3-фосфоэтаноламин (DPPE, Sigma Aldrich, 99%) порошок DPPE растворяли в хлороформе (Sigma Aldrich, 99%), в результате чего получили раствор с концентрацией  $10^{-3}$  М.

Все эксперименты по формированию и исследованию поверхностных свойств ленгмюровских монослоев DPPE проводились на установке KSV Nima LB Trough KN2001 (Финляндия) с площадью рабочей зоны 243 см<sup>2</sup>. Формирование ленгмюровских монослоев с иммобилизованными молекулами фермента глюконооксидазы проводилось по следующей методике. На поверхность водной субфазы наносили раствор DPPE в хлороформе объемом аликвоты 50 мкл. В качестве субфазы была использована деионизованная вода с удельным сопротивлением 18 МОм×см и раствор глюкозы с концентрацией 0.015 мг/мл. По прошествии 30 минут монослой сжимали подвижными барьерами с постоянной скоростью убыли площади монослоя, равной 0.7 см<sup>2</sup>/мин. В процессе сжатия монослоя подвижными барьерами в автоматическом режиме происходила запись  $\pi(A)$  изотермы – зависимости изменения величины поверхностного давления ( $\pi$ ) от площади, занимаемой одной молекулой в монослое ( $A$ ). Изотермы сжатия монослоев DPPE, сформированных в отсутствие и при наличии в субфазе растворенных молекул ГО, приведены на **Рис. 1**.

В ходе анализа изотерм сжатия были получены такие параметры монослоев, как удельная площадь на молекулу в ненаклонно-конденсированной фазе ( $A_0$ ) и модуль сжатия



**Рис. 1.** Изотермы сжатия монослоя DPPE, сформированного на субфазе при наличии и в отсутствии растворенных молекул фермента глюкозооксидазы. Точки  $A_0$  – площади, занимаемые одной молекулой в ненаклонно-конденсированной фазе.

(к). Величина  $A_0$  совпадает с абсциссой точки пересечения касательной, проведенной к конденсированной фазе графика изотермы сжатия монослоя. Для вычисления модуля сжатия использовали формулу [14]:

$$k = -A_0 \frac{d\pi}{dA}, \quad (1)$$

где  $A_0$  – удельная площадь на молекулу в ненаклонно-конденсированной фазе,  $k$  – модуль сжатия монослоя,  $A$  – площадь, занимаемая монослоем. Величины  $k$ ,  $A_0$  приведены в **Таблице 1**.

Перенос монослоев на твердые подложки осуществлялся по методу Ленгмюра-Блоджетт при равновесном значении поверхностного давления ( $\pi_e$ ). В качестве подложек был использован атомарно-гладкий высокоориентированный пирографит.

**Таблица 1**

Модуль сжатия ( $k$ ) и площадь, занимаемая одной молекулой в ненаклонно-конденсированной фазе монослоя DPPE ( $A_0$ ), сформированного при наличии (DPPE+ГО) и в отсутствии (DPPE) растворенных в субфазе молекул фермента,  $\pi_e$  – равновесное давление

Параметр монослоя	DPPE	DPPE+ГО
$k$	133	87
$A_0$	32.5	49
$\pi_e$	37.5	42

## 2.2 ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК

Изучение морфологии поверхности проводилось с помощью метода атомно-силовой микроскопии на установке NT-MDT Ntegra в гибридной моде со скоростью сканирования одной строки 0.79 Гц. Был использован кантилевер NT-MDT серии NSG10 с радиусом закругления зонда, не превышающим 10 нм. Обработка изображения и вычисление величины средней шероховатости и толщины пленки выполнялось в открытом программном обеспечении Gwyddion 2.63.

## 2.3. ИЗУЧЕНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ С ИММОБИЛИЗОВАННЫМ ФЕРМЕНТОМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Для измерения электрофизических параметров созданных пленок использовался потенциостат Р-45Х. Изучение сенсорных свойств сформированных покрытий происходило по следующей методике. Сформированные ленгмюровские монослои с иммобилизованным ферментом ГО сжимались до давления  $\pi_e$ . Далее монослои методом Ленгмюра-Блоджетт переносились на графитовые электроды диаметром 2 мм со скоростью проноса электродов через поверхность воды 1 мм/мин. Таким образом были сформированы сенсорные покрытия, состоящие из 2 ленгмюровских монослоев с иммобилизованным ферментом глюкозооксидазы. Электроды помещались на расстоянии 5 мм друг от друга в резервуар с 2 мл раствора глюкозы различной концентрации. Для исключения влияния электромагнитных наводок измерительная ячейка помещалась в стальной бокс с металлической крышкой. Вольтамперограммы измеряемых растворов снимались в диапазоне изменения потенциала от  $-1$  В до  $+1$  В со скоростью развертки напряжения 0.2 мВ/с. Измерение полного импеданса проводилось в диапазоне частот от 50 КГц до 4 КГц с напряжением смещения 0.8 В.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ

Из анализа изотерм сжатия, представленных на Рис. 1, видно, что адсорбция молекул фермента приводит к изменению вида изотермы сжатия.

Момент фазового перехода между жидкой фазой и наклонной-конденсированной фазой растягивается. Участок изотермы сжатия II-III появляется в случаях увеличения вклада в рост поверхностного давления от взаимодействия головных групп молекул ПАВ. Адсорбция молекул ГО привела к уменьшению модуля сжатия монослоя  $k$  со 133 мН/м до 87 мН/м и увеличению  $A_0$  с  $32.5 \text{ \AA}^2$  до  $49 \text{ \AA}^2$ . Таким образом, можно сделать вывод, что адсорбция молекул ГО монослоем DPPE оказывает расширяющее воздействие на монослой [15]. Стоит отметить, что после достижения давления коллапса на изотерме сжатия наблюдался излом, после которого величина поверхностного давления оставалась постоянной. Наличие подобного участка объясняется началом формирования мультислойной мембраноподобной структуры [16].

Изучение процесса адсорбции молекул ГО пленкой DPPE происходило в два этапа. На первом этапе устанавливалась величина равновесного давления, при котором впоследствии происходил перенос монослоя на твердые подложки –  $\pi_c$ . Для этого монослой сжимался до величины поверхностного давления, соответствующего середине ненаклонно-конденсированной фазы, после чего процесс сжатия прекращался. Дальнейшее изменение величины поверхностного давления связано с протеканием релаксационных процессов в монослое. Для их анализа в автоматическом режиме происходила запись изменения величины поверхностного давления ( $\pi$ ) от времени ( $t$ ). График зависимости  $\pi(t)$  приведен на Рис. 2. Координата точки пересечения проекции

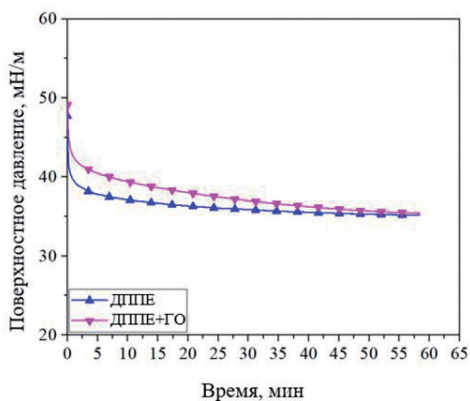


Рис. 2. Графики убыли поверхностного давления монослоев DPPE, полученные на субфазе в присутствии и отсутствии растворенных молекул фермента, при постоянной площади монослоя.

линейной части графика  $\pi(t)$  и оси ординат ( $\pi$ ) соответствует величине равновесного давления  $\pi_c$ , при котором выравниваются скорости адсорбции и десорбции вещества монослоя в субфазу [17]. Значение тангенса угла наклона линейной части графика  $\pi(t)$  соответствует скорости убыли поверхностного давления ( $k_d$ ) вследствие структурной реорганизации молекул в монослое, а также в связи с возможным уходом части вещества монослоя под воду [18,19]. Из Рис. 2 видно, что адсорбция молекул ГО приводила к увеличению  $k_d$  и  $\pi_c$  с  $0.5 \cdot 10^{-3}$  и 37.5 мН/м до  $1.2 \cdot 10^{-3}$  и 42 мН/м, соответственно.

Для определения механизма убыли вещества монослоя в субфазу был использован метод, основанный на анализе кривых десорбции в координатах относительной убыли площади от времени. Для этого были записаны кривые убыли площади монослоя при постоянном поверхностном давлении вблизи точки фазового перехода монослоя двумерная жидкость – конденсированная пленка. На Рис. 3 приведены графики изменения относительной площади монослоя от времени для монослоев DPPE, сформированных на субфазе при наличии и в отсутствии растворенных молекул ГО. На представленных кривых десорбции можно выделить два участка, аппроксимирующихся линейной зависимостью. Это связано с наличием нескольких механизмов десорбции вещества монослоя в приповерхностный слой.

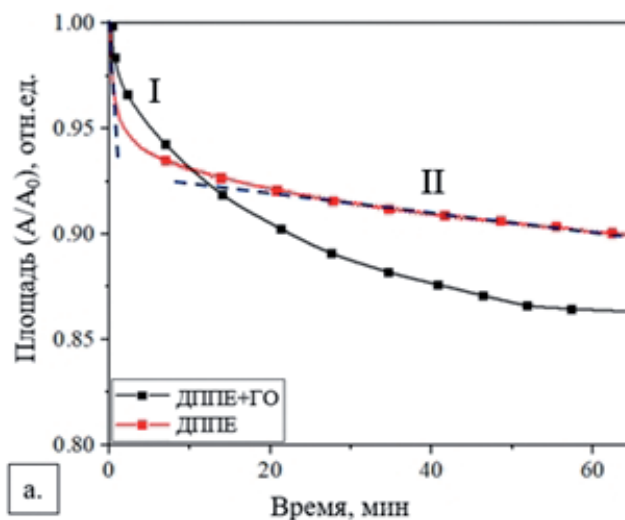


Рис. 3. Графики убыли площади монослоев DPPE, полученные на субфазе в присутствии и отсутствии растворенных молекул фермента, при постоянной площади монослоя.



В литературе выделяют два типа десорбции. Первый это десорбция, контролируемая уходом вещества монослоя в приповерхностный слой конечной толщины. И второй – это диффузионный переход молекул монослоя из статичного приповерхностного слоя вглубь субфазы. На графике десорбции, представленном на Рис. 3, участки с первым и вторым механизмом десорбции отмечены цифрами (I) и (II), соответственно. Для описания процессов десорбции (I) и (II) были использованы выражения (1) и (2) [20,21]:

$$\ln \frac{A}{A_0} = -k_s t, \quad (2)$$

$$\ln \frac{A}{A_0} = -k_v t, \quad (3)$$

где  $A/A_0$  – относительное изменение площади монослоя за время  $t$ ,  $k_v$  и  $k_s$  коэффициенты десорбции и диффузии, соответственно.

Численные значения коэффициентов  $k_s$  и  $k_v$  соответствуют углу наклона линейных участков кривых убыли площади, представленных на Рис. 4. Величины  $k_s$  и  $k_v$  приведены в Таблице 2.

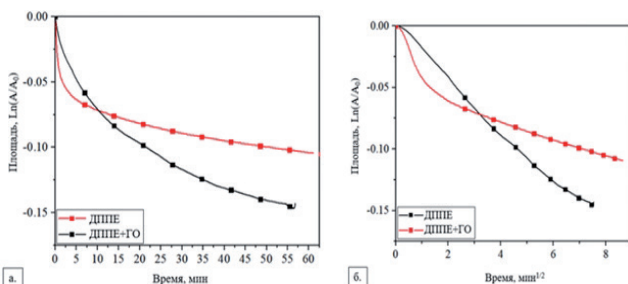


Рис. 4. Кривые убыли площади монослоев DPPE (а,б), сформированных при наличии и в отсутствии растворенных в субфазе молекул фермента.

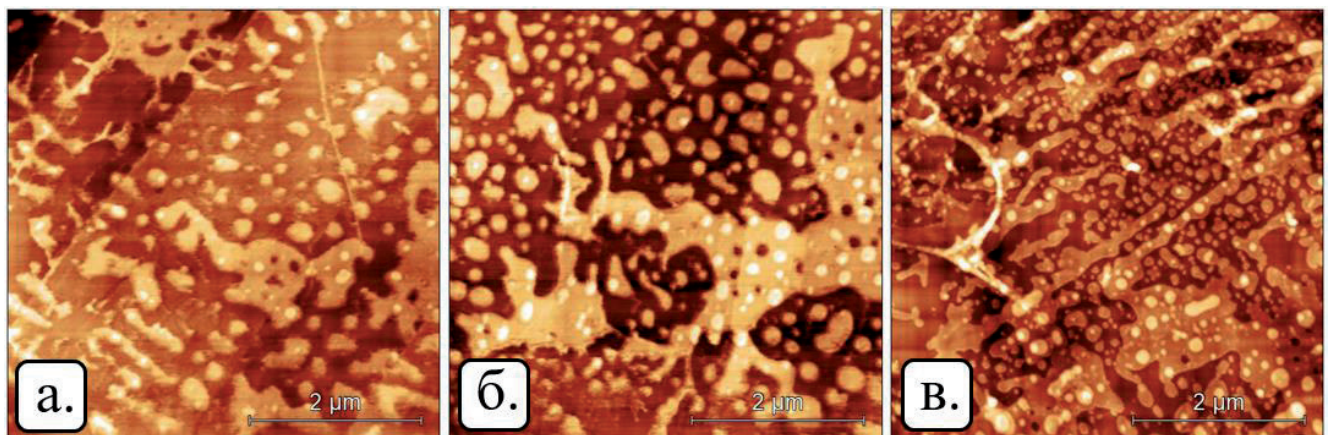


Рис. 5. Изображения морфологии поверхности монослойных пленок DPPE, сформированных на субфазе, содержащей ГО, при временах адсорбции ГО 5 минут (а), 30 минут (б) и 60 минут (в).

Таблица 2

Коэффициенты десорбции монослоев DPPE, сформированных на субфазе при наличии и в отсутствии растворенных молекул ГО

	DPPE	DPPE+ГО
T, мин	3	12
$k_s$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
$k_v$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
$k_d$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Из Таблицы 2 видно, что адсорбция молекул ГО монослоем DPPE приводит к изменению коэффициентов десорбции, контролируемой переходом вещества монослоя в приповерхностный слой и переходом вещества из приповерхностного слоя вглубь субфазы. Коэффициент  $k_s$  увеличивается с  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $6 \cdot 10^{-4}$ , а  $k_v$  уменьшается с  $3.3 \cdot 10^{-2}$  до  $1.1 \cdot 10^{-2}$  при наличии в субфазе молекул фермента. Наличие молекул ГО в субфазе приводит к уменьшению скорости десорбции, контролируемой переходом вещества монослоя в приповерхностный слой и увеличению скорости перехода молекул вещества из приповерхностного слоя вглубь субфазы.

### 3.2 ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ АДсорбЦИИ ФЕРМЕНТА НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК

На Рис. 5 представлены изображения морфологии поверхности монослойных пленок DPPE с адсорбированными агрегатами молекул ГО, перенесенных при различных временах адсорбции. В Таблице 3 приведены значения величин шероховатости сформированных пленок, средней толщины и средней площади поверхности пленок.

Таблица 3

Средняя шероховатость ( $R_a$ ), толщина ( $L$ ) и площадь поверхности ( $S_q$ ) монослойных пленок DPPE, перенесенных при различных временах адсорбции фермента

Время адсорбции	5	30	60
$R_a$ , нм	3.6	3.3	2.4
$S_q$ , мкм <sup>2</sup>	0.3	0.3	0.3
$L$ , нм	10.7	10.4	8.7

Адсорбция ГО монослоями приводит к изменению морфологии пленок, полученных на их основе. При адсорбции ГО монослоем DPPE в течении 5 минут на поверхности пленки образуются области с высотой от 12 до 24 нм. Молекула ГО имеет размеры  $6 \times 5.2 \times 7$  нм [22], в то время как монослой DPPE имеет толщину порядка 3 нм. Таким образом, можно сделать вывод, что данные области представляют собой агрегаты молекул ГО, адсорбированные монослоем молекул DPPE. При увеличении времени адсорбции до 30 минут происходит увеличение площади, занимаемой островками ГО. При этом толщина отдельных участков увеличивается до 25-30 нм. Средняя шероховатость пленки уменьшается с 3.6 нм до 3.3 нм, что можно объяснить увеличением площади, занимаемой агрегатами ГО. Дальнейшее увеличение времени адсорбции до 60 минут приводит к уменьшению шероховатости поверхности и средней толщины пленки. Указанное поведение можно связать с уменьшением скорости перехода вещества монослоя в диффузионный слой. В следствии чего площадь, покрываемая агрегатами молекул ГО, увеличивается. Вместе с этим уменьшается высота отдельных агрегатов до 22-25 нм.

Увеличение времени адсорбции фермента ГО пленкой приводит к изменению ее морфологии. Наиболее развитой морфологией обладает пленка, перенесенная через 5 минут после выдержки монослоя при постоянном давлении (общее время адсорбции, включая время сжатия монослоя подвижными барьерами – 125 минут). Дальнейшая адсорбция приводит к уменьшению средней шероховатости поверхности и средней толщины пленки. Поэтому для формирования сенсорного покрытия был использован монослой, со временем адсорбции 30 минут.

**3.3. ИЗУЧЕНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ СФОРМИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ, ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Сформированные сенсорные покрытия были исследованы методом циклической вольтамперометрии. Циклические вольтамперограммы и графики изменения максимальных токов между электродами при различной концентрации глюкозы в растворе приведены на Рис. 6. Для биопленки с иммобилизованным ферментом ГО наблюдается линейная зависимость тока от концентрации глюкозы в растворе. Увеличение тока при увеличении концентрации до 0.9 мг/мл составляет 0.25 мкА для прямого смещения и 0.35 мкА для обратного. В отсутствие биопленки на электродах концентрационные изменения тока носят случайный характер. Большие значения рабочих токов объясняются отсутствием на электродах пленки из липидных молекул, представляющей из себя диэлектрик.

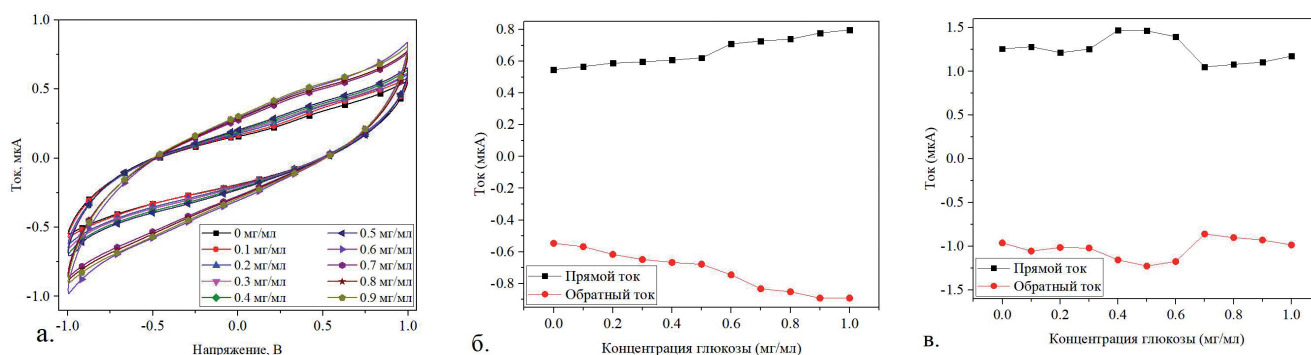
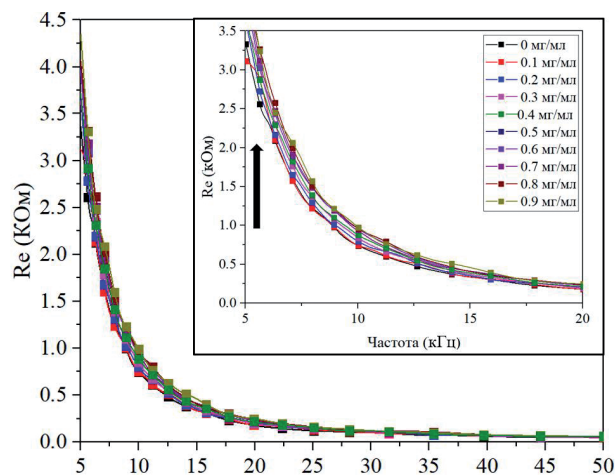
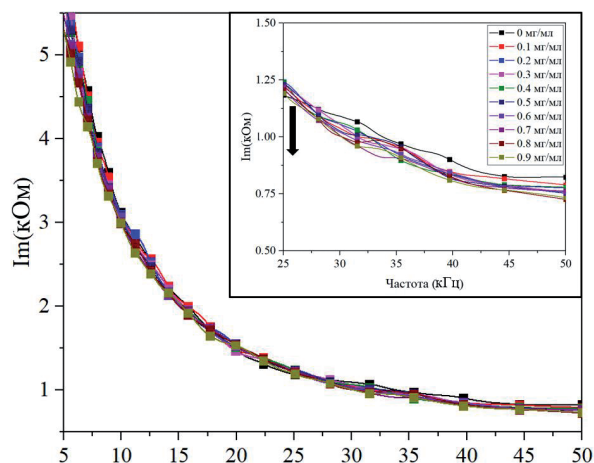


Рис. 6. Циклические вольтамперограммы (а) и изменение максимальных величин прямого и обратного токов при наличии (б) и в отсутствие сенсорной пленки (в) при различной концентрации глюкозы в растворе.



а. Частота (кГц)

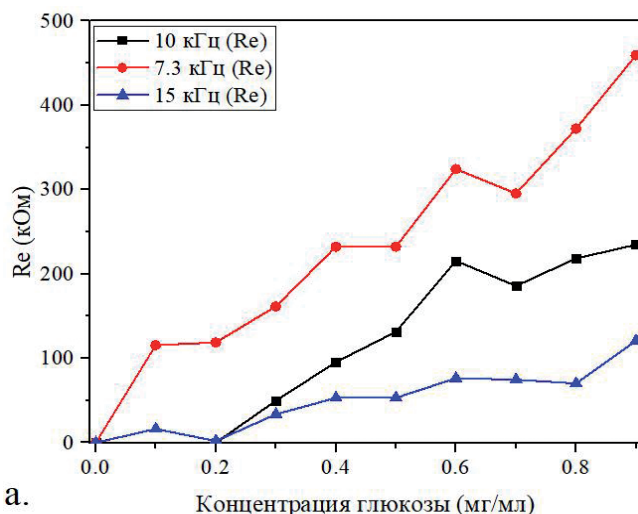


б. Частота (кГц)

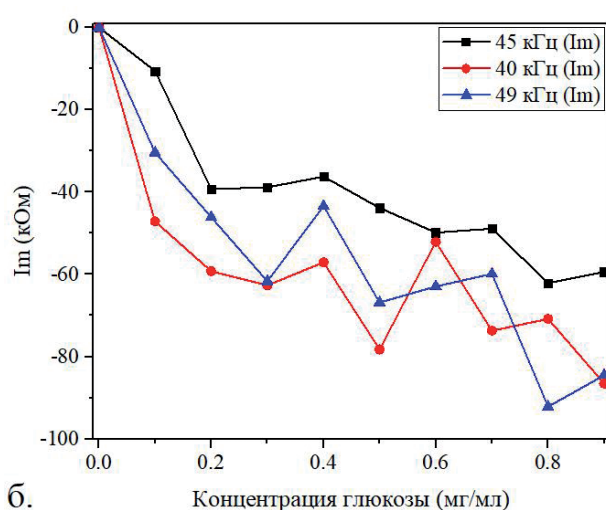
Рис. 7. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей полного импеданса системы при различных концентрациях молекул глюкозы в растворе.

На Рис. 7 представлены частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей полного импеданса измеряемой ячейки при различных концентрациях молекул глюкозы в растворе. В частотном диапазоне от 5 до 20 кГц и от 30 до 50 кГц можно выделить частоты, для которых концентрационная зависимость действительной и мнимой частей импеданса монотонна.

Так, концентрационная зависимость действительной части импеданса на частотах 7.3 кГц, 10 кГц и 15 кГц имеет сублинейный вид. Концентрационная зависимость мнимой части импеданса на частотах 40 кГц, 45 кГц и 49 кГц может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией. Соответствующие концентрационные зависимости приведены на Рис. 8.



а. Концентрация глюкозы (мг/мл)



б. Концентрация глюкозы (мг/мл)

Рис. 8. Концентрационные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей полного импеданса системы для соответствующих частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучено влияние времени адсорбции молекул глюкозооксидазы на поверхностные свойства лентмюровских монослоев DPPE и их морфологию. На основе сформированных монослоев были созданы сенсорные бислойные покрытия. Отличия во времени адсорбции фермента приводит к возникновению отличий в морфологии пленок. Был исследован процесс встраивания молекул фермента глюкозооксидазы в лентмюровский монослой липидных молекул DPPE. Адсорбция молекул  $GO_x$  оказывает расширяющее действие на лентмюровский монослой DPPE. Адсорбция молекул  $GO_x$  приводит к структурной перестройке монослоя, сопровождающейся увеличением удельной площади монослоя, уменьшением скорости



убыли поверхностного давления и увеличения давления  $\pi_c$ . При адсорбции ГО монослоем DPPE уменьшается скорость заполнения приповерхностного диффузионного слоя, но при этом увеличивается скорость перехода молекул из диффузионного слоя в объем субфазы. Увеличение удельной площади на одну молекулу при адсорбции фермента монослоем связано с всплытием фермента и образованием на границе раздела вода-воздух адсорбционного монослоя Гиббса, который в последствии сжимается формирующимся монослоем липидных молекул. В результате при сжатии монослоя происходит смещение положения всех формируемых фаз в область больших площадей. Увеличение времени адсорбции молекул ГО<sub>x</sub> приводит к уменьшению средней шероховатости пленки и ее толщины.

Вольтамперометрия и импедансометрия пленок показала наличие чувствительности сенсорного покрытия к молекулам глюкозы в водных растворах. Наличие линейной концентрационной зависимости максимальных и минимальных токов и сопротивлений в диапазоне концентраций глюкозы от 0 до 1 мг/мл делает подобные сенсорные покрытия перспективными для использования в качестве сенсорных покрытий.

Таким образом, продемонстрирована возможность создания ферментативного биосенсора глюкозы на основе ЛБ-пленки из молекул фосфолипида DPPE с иммобилизованными молекулами фермента глюкозооксидазы. Главным достоинством подобных биосенсоров являются высокие показатели селективности и чувствительности по отношению к детектируемым молекулам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ariga K, Nakanishi T, Michinobu T. Immobilization of Biomaterials to Nano-Assembled Films (Self-Assembled Monolayers, Langmuir-Blodgett Films and Layer-by-Layer Assemblies) and Their Related Functions. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2006, 6:2278-2301.
2. Caseli L. Enzymes immobilized in Langmuir-Blodgett films: Why determining the surface properties in Langmuir monolayer is important?. *An Acad Bras Cienc*, 2018, 90:631-644.
3. Rodrigues RT, Nordi CFS, Siqueira Junior JS, Caseli L. Effect of interfering agents for urease immobilized in Langmuir-Blodgett films of controlled molecular architecture. *Thin Solid Films*, 2020, 704:138043.
4. Gorbachev IA, Smirnov AV. Biosensor based on Langmuir-Blodgett film with alcohol oxidase enzyme. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):307-316. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.307.
5. Zaitsev SY. Functional Langmuir films with glucose oxidase. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, 75:211-216.
6. Wang K-H, Syu M-J, Chang C-H, Lee Y-L. Immobilization of glucose oxidase by Langmuir-Blodgett technique for fabrication of glucose biosensors: Headgroup effects of template monolayers. *Sensors and Actuators B*, 164:29-36.
7. Furtado FAS, Caseli L. Enzyme activity preservation for galactose oxidase immobilized in stearic acid Langmuir-Blodgett films. *Thin Solid Films*, 2020, 709:138253.
8. Saha S, Chowdhury J. Sustained and improved enzymatic activity of trypsin immobilized in the Langmuir Blodgett film of DPPC: A rapid enzyme sensor for the detection of Azocasein. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 243:122647.
9. Gorbachev IA, Smirnov AV, Kuznetsova IE, Kolesov VV. Temperature influence on the formation of Langmuir monolayers with Ni arachidic acid and Ni arachidate clusters. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):295-306. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.295.
10. Li J, Rosilio V, Boissonnade M-M, Baszkin A. Adsorption of glucose oxidase into lipid monolayers: effect of a lipid headgroup charge. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2003, 29:13/20.
11. Zhang J, Rosilio V, Goldmann M, Boissonnade M-M, Baszkin A. Adsorption of Glucose Oxidase into Lipid Monolayers. Effect of Lipid Chain Lengths on the Stability and Structure of Mixed Enzyme/Phospholipid Films. *Langmuir*, 2000, 16:1226-1232.
12. Lee Y-L, Lin J-Y, Lee S. Adsorption Behavior of Glucose Oxidase on a Dipalmitoylphosphatic

- Acid Monolayer and the Characteristics of the Mixed Monolayer at Air/Liquid Interfaces. *Langmuir*, 2007, 23:2042-2051.
13. Ohnuki H, Saiki T, Kusakari A, Endo H, Ichihara M, Izumi M. Incorporation of Glucose Oxidase into Langmuir-Blodgett Films Based on Prussian Blue Applied to Amperometric Glucose Biosensor. *Langmuir*, 2007, 23:4675-4681.
  14. Vu TT, Kharitonova NV, Maiorova LA, Gromova OA, Torshin IY, Koifman OI, Compression Speed as a Parameter Changing the Dimensionality of Corrole Nanostructures in Layers at the Air-Water Interface. *Macrobicycles*, 2018, 11(3):286-292.
  15. ЯНКЛОВИЧ АИ, Регулярные мультимолекулярные структуры ПАВ – пленки Лэнгмюра-Блоджетт. *Успехи коллоидной химии*. Ленинград, Химия, 1991, 262- 291.
  16. Gopal A, Lee KYC. Headgroup Percolation and Collapse of Condensed Langmuir Monolayers. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110:22079-22087.
  17. Sanchez CC, Nino MRR, Patino JMR. Relaxation phenomena in monoglyceride films at the air-water interface. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 1999, 12:175-192.
  18. Rabinovitch W, Robertson RF, Mason AG. Relaxation of surface pressure and collapse of unimolecular films of stearic acid. *Can. J. Chem.*, 1960, 38:1881-1890.
  19. Нас-Вydro К, Wydro P, Dynarowicz-Latka P. Metal ions binding to tri-n-octylphosphine oxide (TOPO) monolayer spread at the air/water interface. *Thin Solid Films*, 2008, 516:8839-8843.
  20. Gorbachev IA, Shtykov SN, Brezesinski G, Glukhovskoy EG. Studying of Quantum Dots Langmuir Monolayers Stability at the Different Subphase Temperature. *BioNanoSci.*, 2017, 7:686-691.
  21. Ter-Minassian-Saraga L. Recent work on spread monolayers, adsorption and desorption. *Journal of Colloid Science*, 1956, 11:398-418.
  22. Hecht HJ, Kalisz HM, Hendle J, Schmid RD, Schomburg D. Crystal Structure of Glucose Oxidase from *Aspergillus niger* Refined at 2.3 Å Reslution. *Journal of molecular biology*, 1993, 229(1):153-172.
- Горбачев Илья Алексеевич**  
к.х.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com)
- Колесов Владимир Владимирович**  
к.ф.-м.н., с.н.с.  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия  
E-mail: [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.121

## Морфология и электрофизические свойства модифицированных ленгмюровских пленок оксида графена

Горбачев И.А., Колесов В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Поступила 01.12.2023, рецензирована 12.12.2023, принята 13.12.2023, опубликована 15.03.2024.

**Аннотация:** Проведено исследование электрофизических свойств и морфологии пленок Ленгмюра-Блоджетт модифицированного оксида графена (ОГ). Методом Ленгмюра-Блоджетт сформированы пленочные структуры на основе ленгмюровских монослоев ОГ, сформированные на субфазе при наличии и в отсутствии растворенной соли хлорида олова. Изотермы сжатия монослоев, сформированных в присутствии ионов олова, сместились в сторону больших занимаемых площадей. Сформированные при различных условиях ленгмюровские монослои оксида графена были перенесены на твердые подложки и исследованы методом атомно-силовой микроскопии и вольтамперометрии. Установлено, что наличие ионов олова в водной субфазе приводит к изменениям морфологии сформированных пленок. Так у таких пленок увеличилась средняя шероховатость и площадь поверхности с 0.2 нм и 0.04 мкм<sup>2</sup> до 5.4 нм и 0.46 мкм<sup>2</sup>, соответственно. Наличие растворенных в водной субфазе ионов олова оказало влияние на вид вольтамперных характеристик исследуемых пленок. Увеличивается максимальный обратный ток с 0.75 нА до -0.3 нА и увеличивается сопротивление с 11 ГОм до 700 ГОм. Температурный отжиг пленки оксида графена при 300°C приводит к уменьшению максимального прямого и увеличению обратного токов с 0.0407 нА и -0.071 нА до 0.0065 нА и 0.0616 нА, соответственно. Для пленки, содержащей ионы в субфазе, отжиг не оказывает влияния на максимальный прямой ток, а ток обратной ветви ВАХ увеличивается с -0.1669 нА до 0.0468 нА.

**Ключевые слова:** пленки оксида графена, ленгмюровские монослои оксида графена, проводимость тонких пленок, гибридные покрытия на основе оксида графена

УДК 539.23, 544.032.7

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-29-20317.

**Для цитирования:** Горбачев И.А., Колесов В.В. Морфология и электрофизические свойства модифицированных ленгмюровских пленок оксида графена. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):121-128. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.121.

## Morphology and electrical properties of modified Langmuir graphene oxide films

Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com), [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

Received December 01, 2023, peer-reviewed December 12, 2023, accepted December 13, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** The work devoted to study of the electrical properties and morphology of Langmuir-Blodgett films of modified graphene oxide (GO). The Langmuir-Blodgett method was used for studying of formation process of Langmuir monolayers formed on the subphase contained dissolved ions of tin chloride salt. The compression isotherms of monolayers formed in the presence of tin ions



shifted towards larger occupied areas. Langmuir monolayers of graphene oxide formed under various conditions were transferred on solid substrates and studied by atomic force microscopy and voltammetry. It has been established that the presence of tin ions in the aqueous subphase leads to changes in the morphology of the formed films. Thus, the average roughness and surface area of such films increased from 0.2 nm and 0.04  $\mu\text{m}^2$  to 5.4 nm and 0.46  $\mu\text{m}^2$ , respectively. The presence of tin ions dissolved in the aqueous subphase influenced the type of current-voltage characteristics of the films under study. The maximum reverse current increases from 0.075 nA to -0.3 nA and the resistance increases from 11 GOhm to 700 GOhm. Temperature annealing of the graphene oxide film at 300°C leads to a decrease in the maximum forward current and an increase in the reverse current from 0.0407 nA and -0.071 nA to 0.0065 nA and 0.0616 nA, respectively. For a film formed in the presence of ions in the subphase, annealing does not affect the maximum forward current, and the current of the reverse branch of the current-voltage characteristic increases from -0.1669 nA to 0.0468 nA.

*Keywords:* graphene oxide thin films, Langmuir graphene oxide monolayers, thin films conductivity, graphene oxide hybrid coatings

UGC 539.23, 544.032.7

*Acknowledgements:* The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, grant № 22-29-20317.

*For citation:* Iliya A. Gorbachev, Vladimir V. Kolesov. Morphology and electrical properties of modified Langmuir graphene oxide films. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):121-128e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.121

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (122)
  2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (123)
    - 2.1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (123)
    - 2.2. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ ОКСИДА ГРАФЕНА (123)
    - 2.3. ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (124)
    - 2.4. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК (125)
  3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ (126)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (126)
- ЛИТЕРАТУРА (127)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обеспечение экологического мониторинга состояния атмосферы является актуальной задачей. Это связано с растущим уровнем загрязнения окружающей среды. Особую актуальность данная задача приобретает в крупных городах с большим количеством автомобильного транспорта. Одним из продуктов выхлопа автомобиля являются угарный и углекислый газ. Разработка сенсорных покрытий,

способных селективно поглощать угарный или углекислый газ является актуальной задачей при разработке газовых сенсоров. Перспективным материалом для таких сенсорных покрытий является оксид графена [1-3].

Несмотря на возможность создания сенсоров с высокой чувствительностью [4,5], главным их недостатком является низкая селективность по отношению к целевым газам. Для решения указанной проблемы пленки на основе оксида графена модифицируют функциональными группами и наночастицами [6,7]. В частности, для создания селективных к угарному и углекислому газу покрытий сенсорные покрытия на основе оксида графена модифицируют наночастицами оксида олова [8], что позволяет существенно увеличить селективность и чувствительность сенсоров [9-11]. Также к недостаткам подобных сенсоров можно отнести низкую воспроизводимость характеристик от устройства к устройству [12,13]. Одним из подходов, позволяющим уменьшить количество дефектов в пленке оксида графена, является технология Ленгмюра-Блоджетт, поскольку при этом сохраняется возможность ориентации частиц оксида графена в пленке [14].

В настоящее время технология Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) широко распространена для формирования тонких пленок различных поверхностно-активных веществ, наночастиц и полимерных молекул [15-18]. Также существуют работы, посвященные формированию и исследованию свойств ленгмюровских монослоев оксида графена [19]. В работе [20] изучено влияние кислотности субфазы на морфологию пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена. Показано, что изменение кислотности позволяет управлять толщиной пленок оксида графена. Одной из перспективных задач в этом направлении является допирование монослоя оксида графена ионами различных металлов. В частности, в работе [21-23] было проведено исследование взаимодействия между коллоидными частицами оксида графена и ионами тяжелых металлов. Наличие подобных работ позволяет сделать вывод о возможности встраивания заряженных частиц в пленки графена. В работе [24,25] изучен процесс встраивания ионов  $Cs^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  и  $Y^{3+}$  в пленку графена на поверхности воды. Авторы продемонстрировали, что адсорбция ионов определяется не только электростатическим взаимодействием с оксидом графена, а носит более сложный характер. Необходимо отметить, что встраивание ионов металлов в ленгмюровские монослои оксида графена может привести к созданию новых типов упорядоченных двумерных материалов. Таким образом, исследование электрофизических свойств ЛБ-пленок оксида графена с адсорбированными ионами, а также влияние на их свойства процесса температурной обработки является достаточно актуальной задачей. Указанная проблема приобретает особую актуальность при попытках сенсбилизации пленок оксида графена оксидными частицами.

Поэтому целью данной работы было изучение влияния ионов металлов, растворенных в водной субфазе на электрофизические свойства и морфологию пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена, а также исследование влияния термической обработки пленок.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления рабочего раствора оксида графена использовался порошок оксида графена

со средним диаметром частиц от 10 до 100 мкм (ООО "Русграфен", Россия). Порошок оксида графена растворялся в смеси вода:метанол с объемным соотношением компонентов 1:5. Полученный раствор с концентрацией оксида графена 0.5 мг/мл подвергался дополнительной обработке ультразвуком в УЗ-ванне (Skymen JP-031S, Китай) мощностью 180 Вт в течение 30 минут. Далее раствор центрифугировался при скорости вращения 4000 об/мин в течении 30 минут. После расслоения раствора и выпадения осадка производился отбор надосадочной части раствора, которая повторно обрабатывалась ультразвуком в течение 40 минут и осаждалась в центрифуге на скорости вращения 13000 об/мин. Далее отбирался осадок, образовавшийся при центрифугировании. Осадок высушивался в вакуумной камере при комнатной температуре в течении 60 минут и повторно растворялся в смеси вода:метанол с объемным соотношением компонентов 1:5. Таким образом, получался водно-метанольный раствор частиц оксида графена с концентрацией 0.1 мг/мл. Перед формированием ленгмюровского монослоя растворы дополнительно обрабатывались ультразвуком в течение 15 минут.

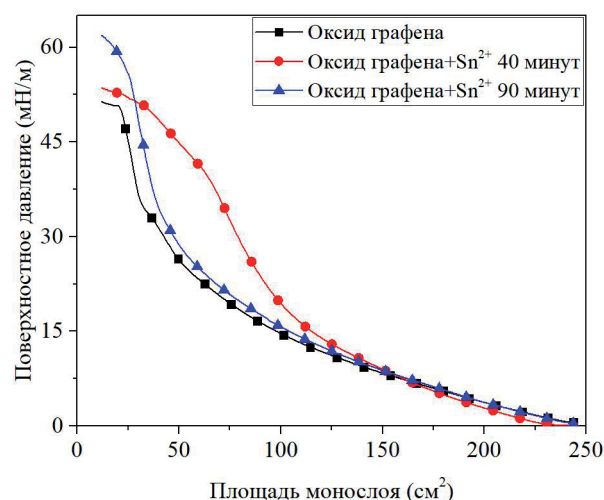
Для приготовления субфазы с растворенным хлоридом олова ( $SnCl_2$ ) использовался сухой порошок хлорида олова, который растворялся в деионизованной воде до получения концентрации 1 Моль/л. Полученный раствор разбавлялся деионизованной водой до получения концентрации  $10^{-2}$  Моль/л, который затем использовался в качестве водной субфазы.

### 2.2 ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКИХ МОНОСЛОЕВ И ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ ОКСИДА ГРАФЕНА

Все эксперименты по формированию и переносу ленгмюровских монослоев на твердые подложки проводились на установке KSV Nima LB Trough KN2002. Температура субфазы на протяжении всего эксперимента поддерживалась постоянной равной  $22^{\circ}C$  при помощи циркуляционного охладителя А300 (ООО "Термэкс", Россия, г. Томск). В качестве субфазы использовалась деионизованная вода с удельным сопротивлением  $18 \text{ МОМ} \times \text{см}$  и водный раствор хлорида олова с концентрацией  $10^{-2}$  Моль/л. Формирование ленгмюровских

монослоев оксида графена проходило по следующей методике. На поверхность водной субфазы наносилась аликвота раствора оксида графена объемом 500 мкл. По прошествии 20 минут для деионизованной воды, 40 минут и 80 минут для субфазы, содержащей ионы олова, монослой сжимался подвижными барьерами ленгмюровской ванны с постоянной скоростью убыли площади, равной  $0.7 \text{ см}^2/\text{мин}$ . В процессе сжатия в автоматическом режиме производилась запись  $\pi$ - $A$  диаграммы – зависимости изменения давления от площади, занимаемой монослоем.

Изотерма сжатия сформированных монослоев приведена на **Рис. 1**. Перенос монослоя на твердую подложку осуществлялся при постоянном поверхностном давлении равном 40 мН/м по методу Ленгмюра-Блоджетт – вертикальный лифт. Скорость движения подложки через монослой была постоянной и составляла 1 мм/мин. Таким образом, были сформированы 5-ти слойные пленки на основе монослоев оксида графена (пленка 1), оксида графена, адсорбировавшего ионы олова 40 минут (пленка 2) и адсорбировавшего ионы олова 90 минут (пленка 3). Поверхностные свойства монослоев можно интерпретировать при помощи анализа полученных изотерм сжатия. Линейные участки на изотерме сжатия соответствуют однородному фазовому состоянию монослоя и характеризуются модулем сжатия монослоя ( $k$ ) и удельной площадью монослоя в фазовом



**Рис. 1.** Изотермы сжатия монослоев оксида графена, сформированные на деионизованной воде и на деионизованной воде, содержащей растворенные ионы олова, при 40 минутах и 90 минутах времени адсорбции ионов монослоем.

**Таблица 1**

Величины модуля сжатия ( $k$ ) и удельной площади монослоев в ненаклонно-конденсированной фазе ( $A_0$ ), сформированные при различных условиях

Состав субфазы	$A_0$ , $\text{см}^2$	$k$ , мН/м
Деионизованная вода	47.5	1.6
Адсорбция 40 минут	32.8	2.3
Адсорбция 90 минут	38.8	2

состоянии ( $A_0$ ). Величина  $A_0$  может быть получена путем экстраполяции линейного участка фазового состояния монослоя на ось  $A$  при величине  $\pi = 0$  мН/м. Для вычисления модуля сжатия монослоя используется формула:

$$k = -A_0 \frac{d\pi}{dA}, \quad (1)$$

где  $k$ ,  $A$  и  $A_0$  это модуль сжатия монослоя, площадь монослоя и удельная площадь монослоя в изучаемом фазовом состоянии. Поскольку величины  $k$  и  $A_0$  изменяются при межфазовом переходе монослоя, то анализ зависимости  $k(A_0)$  позволяет выделить на изотерме сжатия участки, соответствующие газообразной, наклонно-конденсированной фазе и ненаклонно-конденсированной фазе жидкой и конденсированной фазе монослоя [26-28].

Изотермы сжатия монослоев оксида графена, сформированных на водной субфазе в отсутствие и при наличии растворенных ионов олова при различном времени их адсорбции монослоем приведены на Рис. 1.

В **Таблице 1** приведены величины  $k$  и  $A_0$  сформированных при различных условиях монослоев оксида графена.

### 2.3. ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Сформированные ленгмюровские монослои переносились на твердые подложки из атомарно гладкой слюды по технологии Ленгмюра-Блоджетт. Таким образом были сформированы монослойные пленки на основе монослоев оксида графена, сформированных в отсутствие и при наличии в субфазе растворенных ионов олова. Морфология полученных пленочных покрытий была исследована методом атомно-силовой микроскопии на установке NT-MDT Netgra в гибридном режиме. На **Рис. 2** приведены типичные изображения морфологии поверхности полученных пленок.



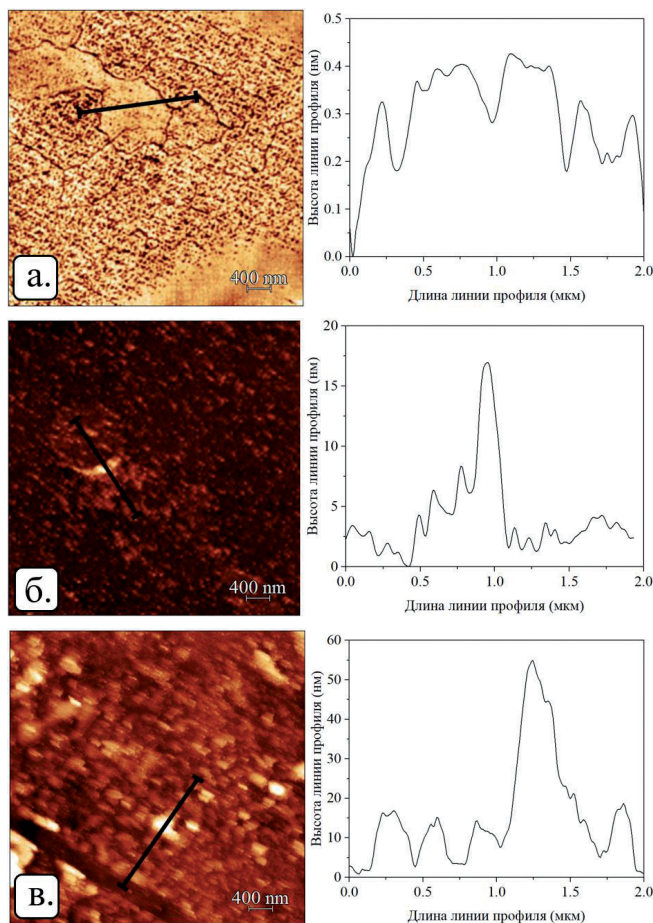


Рис. 2. Изображения поверхности и линии ее профиля пленки оксида графена (а), пленки на основе монослоя, адсорбировавшего ионы олова 40 минут (б) и 90 минут (в).

Математическая обработка полученных изображений в программе Gwyddion 2.63 позволила определить среднюю площадь поверхности пленки ( $S$ ) и величину ее средней шероховатости ( $R_a$ ). Площадь поверхности пленки рассчитывалась методом триангуляции, средняя шероховатость поверхности пленки рассчитывалась по формуле [29,30]:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j|, \quad (2)$$

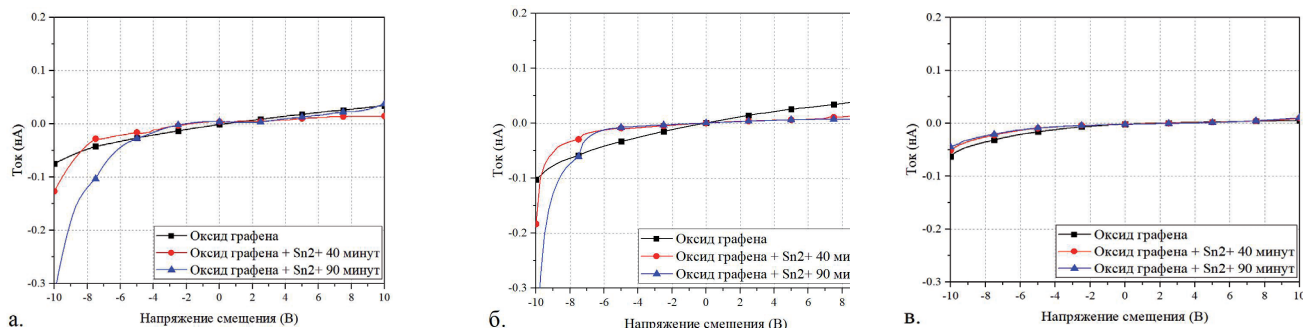


Рис. 3. Вольтамперные характеристики сформированных пленок до отжига (а), после отжига при температуре 150°C (б) и 300°C (в).

Таблица 2

Величины средней шероховатости поверхности ( $R_a$ ) пленки и площадь ее поверхности ( $S$ )

Пленка	$R_a, \text{нм}$	$S, \mu^2$
Оксид графена	0.2	0.04
Оксид графена + SnCl <sub>2</sub> 40 минут	1.4	0.42
Оксид графена + SnCl <sub>2</sub> 90 минут	5.4	0.46

где  $R_a$  это среднее арифметическое отклонение профиля от базовой линии (средняя линия профиля),  $N$  это количество точек, в которых измерялся параметр шероховатости  $R_a$ , а  $r_j$  это абсолютное отклонение значения высоты профиля от средней линии в каждой точке измерения шероховатости.

В Таблице 2 приведены величины средней шероховатости и площади поверхности сформированных при различных условиях пленок.

#### 2.4 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СФОРМИРОВАННЫХ ПЛЕНОК

Ленгмюровские монослои оксида графена, сформированные при различных условиях, были перенесены на твердые подложки из покровного стекла с сформированными встречно-пштыревыми электродными структурами. Расстояние между пштырями составляло 100 мкм. Электрофизические характеристики пленок 1, 2 и 3 исследовались методом вольтамперометрии. Измерение вольтамперных характеристик происходило на пикоамперметре Keithley 6487 в диапазоне изменения напряжений (+10 В, -10 В) с шагом развертки 0.2 В. Отжиг сформированных пленочных покрытий производился при температуре 150°C и 300°C в течении 30 минут в воздушной атмосфере. Вольтамперные характеристики изучаемых пленок приведены на Рис. 3.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Изотерма сжатия монослоев оксида графена, сформированных при различных условиях, приведены на Рис. 1. У монослоя оксида графена можно выделить газовую фазу, соответствующую участку I-II, наклонную конденсированную фазу (участок II-III) и ненаклонно-конденсированную фазу (участок III-IV). На рисунке видно, что при величине поверхностного давления, превышающей 50 мН/м наступает коллапс монослоя, который характеризует резкое изменение угла наклона изотермы сжатия. Добавление ионов олова в субфазу оказывает влияние на вид изотермы сжатия в зависимости от времени взаимодействия ионов олова с частицами оксида графена. При времени взаимодействия 40 минут увеличивается давление коллапса монослоя с 50 мН/м до 60 мН/м. Также увеличивается модуль сжатия монослоя с 1.6 мН/м до 2.3 мН/м. Величина  $A_0$  увеличивается с 49 см<sup>2</sup> до 51 см<sup>2</sup>. На рисунке видно, что изотерма сжатия монослоя, сформированного при времени взаимодействия оксида графена и ионов олова 90 минут, также сдвинулась в сторону больших площадей. Таким образом, можно сделать вывод, что ионы олова оказывают расширяющее действие на монослой оксида графена.

На Рис. 2 представлены изображения поверхности пленок оксида графена, сформированных при наличии и в отсутствие ионов олова в субфазе. Монослой использованных частиц оксида графена имеет толщину порядка 0.2 до 0.4 нм с латеральными размерами отдельных частиц от 1 до 4 мкм. Подобный разброс в высотах позволяет сделать вывод о многослойности отдельных частиц графена. Взаимодействие монослоя оксида графена с ионами олова приводит к изменению морфологии пленки, при этом средняя шероховатость пленки увеличивается с 0.2 до 1.4 нм, а средняя площадь поверхности увеличивается на 0.38 мкм<sup>2</sup>. Из рисунка видно, что на поверхности пленки можно выделить агрегаты с высотами от 3 до 20 нм и площадями до 0.8 мкм<sup>2</sup>. Таким образом, увеличение времени взаимодействия ионов олова с монослоем оксида графена приводит к увеличению средней шероховатости до 5.4 нм и средней

площади поверхности до 0.46 мкм<sup>2</sup>. При этом средние высоты сформировавшихся агрегатов увеличились и находились в диапазоне от 15 нм до 55 нм. Взаимодействие ионов олова и ленгмюровского монослоя оксида графена приводит к формированию агрегатов на поверхности пленки и размеры этих агрегатов увеличиваются при увеличении времени взаимодействия монослоя оксида графена и ионов олова.

На Рис. 3 приведены вольтамперные характеристики мультислойных пленок 1, 2 и 3. Вольтамперная характеристика пленки 1 имеет линейный вид. Ее проводимость составляла величину порядка 0.09 пСм. Наличие агрегатов гидроксида олова в пленке приводит к изменению вида ВАХ. Вольтамперные характеристики пленок 2 и 3 имеют нелинейную форму, увеличение времени адсорбции ионов олова приводит к росту максимального обратного тока с 0.125 нА до 0.3 нА. Максимальный ток прямой ветви ВАХ при с увеличением времени адсорбции ионов олова уменьшается с 0.025 нА до 0.01 нА. Термическая обработка сформированных пленки 1 в течении 30 минут при температуре 150°C приводит к увеличению тока прямой и обратной ветвей ВАХ до -0.1 нА и 0.05 нА, соответственно. Максимальный ток обратной ветви ВАХ пленок 2 и 3 также увеличивается до 0.18 нА и 0.4 нА, соответственно. Увеличение максимальных токов может быть связано с началом процесса восстановления оксида графена и увеличением его проводимости. Вместе с этим высокая дефектность пленок и потеря проводимости на краях частиц восстановленного оксида графена объясняет низкие величины проводимости в пленках. Отжиг пленок при температуре 300°C приводит к увеличению сопротивления пленок до 700 ГОм. После отжига при температуре 300°C ВАХи пленок 2 и 3 приобретают линейный вид. Подобный эффект может быть связан с восстановлением оксида графена и десорбцией частиц диоксида олова с поверхности пленки.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изучены электрофизические свойства и морфология пленок Ленгмюра-Блоджетт на основе оксида графена при их термическом

восстановлении. Показана возможность проведения модификации ленгмюровских монослоев оксида графена ионами металлов в процессе формирования монослоев. Продемонстрирована возможность управления электропроводностью пленок Ленгмюра-Блоджетт оксида графена путем их термической обработки. Определен температурный режим восстановления, при котором вольтамперные характеристики сохраняют нелинейный вид. Подход, использованный в работе, может быть использован для формирования сенсорных покрытий, чувствительных к угарному и углекислому газам, для разработки газовых датчиков с большей чувствительностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Anju M, Renuka NK. Graphene–dye hybrid optical sensors. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2019, 17:194-217.
2. Tiwari SK, Sahoo S, Wang N, Huczko A. Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2020, 5(1):10-29.
3. Kornilov DY. Graphene oxide - a new electrode nanomaterial for chemical current sources. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2021, 13(1):105-108. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.105.
4. Schedin F; Novoselov KS. Detection of Individual Gas Molecules by Graphene Sensors. *Nat. Mater.*, 2006, 6:652-655.
5. Yavari F, Castillo E, Gullapalli H, Ajayan PM, Koratkar N. High sensitivity detection of NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> in air using chemical vapor deposition grown graphene. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100:203120.
6. Koteeswara RN, Devika M, Sungwon L. Functionalization of graphene layers and advancements in device applications. *Carbon*, 2019, 152:954-985.
7. Mehmood A, Mubarak NM, Khalid M, Walvekar R, Abdullah EC, Siddiqui MTH, Baloch HA, Nizamuddin S, Mazari S. Graphene based nanomaterials for Strain Sensor Application A-review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(3):103743.
8. Lee ZY, Fahmi bin Hawari H, Witjaksono bin Djaswadi G, Kamarudin K. A Highly Sensitive Room Temperature CO<sub>2</sub> Gas Sensor Based on SnO<sub>2</sub>-rGO Hybrid Composite. *Materials*, 2021, 14:522.
9. Tai H, Yuan Z, Zheng W, Ye Z, Liu C, Du X. ZnO Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide Bilayer Thin Films for Improved NH<sub>3</sub>-Sensing Performances at Room Temperature. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11:130.
10. Lee J-H, Kang W-S, Najeeb CK, Choi B-S, Choi S-W, Lee HJ, Lee SS, Kim J-H. A hydrogen gas sensor using single-walled carbon nanotube Langmuir–Blodgett films decorated with palladium nanoparticles. *Sensors and Actuators B*, 2013, 188:169-175.
11. Botcha VD, Sutar DS, Major SS. Study of GO-Cu<sub>2</sub>O and RGO-Cu nanocomposite monolayer sheets prepared by modified Langmuir Blodgett route. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, 118:158-165.
12. Massera E, Miglietta ML, Polichetti T, Ricciardella F, Girolamo A, Francia D. Reproducibility of the Performances of Graphene-Based Gas-Sensitive Chemiresistors. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 268, doi: 10.1007/978-3-319-00684-0-26.
13. Schedin F, Geim AK, Morozov SV, Hill EH, Blake P, Katsnelson MI, Novoselov KS. Detection of Individual Gas Molecules Adsorbed on Graphene. *Nat. Mater.*, 2007, 6:652-655.
14. Shi L-F, Liu J-Z, Yang J-H, Cai L-F, Shi L-Y, Qiu H-X. Langmuir-Blodgett assembly of transparent graphene oxide-silver microwire hybrid films with an antibacterial property. *New Carbon Materials*, 2017, 32(4):344-351.
15. Kondalkara VV, Yang SS, Patil PS, Choudhury S, Bhosale PN, Lee KK. Langmuir-Blodgett assembly of nanometric WO<sub>3</sub> thin film for electrochromic performance: A new way. *Materials Letters*, 2017, 194:102-106.
16. Podolskaya EP, Serebryakova MV, Krasnov KA, Grachev SA, Gzgyziane AM, Sukhodolov NG. Application of Langmuir–Blodgett technology for the analysis of saturated fatty acids using the MALDI-TOF mass spectrometry. *Mendeleev Commun.*, 2018, 28:337-339.
17. Xu L, Tetreault AR, Khaligh HH, Goldthorpe IA, Wettig SD, Pope MA. Continuous Langmuir-Blodgett Deposition and Transfer by Controlled



- Edge-to-Edge Assembly of Floating 2D Materials. *Langmuir*, 2019, 35:51-59.
18. Ly TN, Park S. Highly sensitive ammonia sensor for diagnostic purpose using reduced graphene oxide and conductive polymer. *Scientific Reports*, 2018, 8:18030.
  19. Zheng Q-B, Shi L-F, Yang J-H. Langmuir-Blodgett assembly of ultra-large graphene oxide films for transparent electrodes. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, 22:25042511.
  20. Botchaa VD, Narayanama PK, Singha G, Talwar SS, Srinivasa RS, Major SS. Effect of substrate and subphase conditions on the surface morphology of graphene oxide sheets prepared by Langmuir-Blodgett technique. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2014, 452:65-72.
  21. Park S, Lee K-S, Bozoklu G, Cai W, Nguyen SBT, Ruoff RS. Graphene Oxide Papers Modified by Divalent Ions—Enhancing Mechanical Properties via Chemical Cross-Linking. *ACS NANO*, 2008, 2(3):572-578.
  22. Mokoena LS, Mofokeng JP. A Review on Graphene (GN) and Graphene Oxide (GO) Based Biodegradable Polymer Composites and Their Usage as Selective Adsorbents for Heavy Metals in Water. *Materials*, 2023, 16:2527.
  23. Groshkova YuA, Buslaeva EYu, Kraevskii SV, Gubin SP. Preparation of titanium oxide nanoparticles on the surface of reduced graphene oxide in supercritical isopropanol. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(1):43-50. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.043.
  24. Monjezi R, Azadi R, Hamoule T. Design, synthesis, and characterization of thiol-decorated cross-linked graphene oxide framework for high-capacity Hg<sup>2+</sup> ion adsorption. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2024, 28:101786.
  25. Carr AJ, Kumal RR, Bu W, Uysal A. Effects of ion adsorption on graphene oxide films and interfacial water structure: A molecular-scale description. *Carbon*, 2022, 195:131-140.
  26. Vollhardt D, Fainerman VB. Progress in characterization of Langmuir monolayers by consideration of compressibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, 127:83-97.
  27. Khomutov GB, Gainutdinov RV, Gubin SP, Kislov VV, Rakhnyanskaya AA, Sergeev-Cherenkov AN, Tolstikhina AL. Formation and organization of planar polymeric and nanocomposite nanostructures on liquid and solid surfaces. *Surface Science*, 2004, 566(568):396-401.
  28. Vu TT, Kharitonova NV, Maiorova LA, Gromova OA, Torshin IY, Koifman OI. Compression Speed as a Parameter Changing the Dimensionality of Corrole Nanostructures in Layers at the Air-Water Interface. *Macrobicycles*, 2018, 11(3):286-292.
  29. Necas D, Klapetek P, Valtr M. Estimation of roughness measurement bias originating from background subtraction. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31:094010.
  30. Necas D, Valtr M, Klapetek P. How levelling and scan line corrections ruin roughness measurement and how to prevent it. *Scientific Reports*, 2020, 10:15294.

**Горбачев Илья Алексеевич**

к.х.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: [iliyagor36@gmail.com](mailto:iliyagor36@gmail.com)

**Колесов Владимир Владимирович**

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: [kvv@cplire.ru](mailto:kvv@cplire.ru)

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.129

## Предельная дальность обнаружения подводного шумового источника с применением голографической обработки

<sup>1</sup>Кузькин В.М., <sup>2</sup>Пересёлков С.А., <sup>3</sup>Грачев В.И., <sup>2</sup>Рыбьянец П.В., <sup>2</sup>Ткаченко С.А.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>

Москва 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, <http://www.vsu.ru/>

Воронеж 394006, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 12509, Российская Федерация

E-mail: [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru), [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru), [grachev@cplire.ru](mailto:grachev@cplire.ru), [rybyanets.edu@yandex.ru](mailto:rybyanets.edu@yandex.ru), [sega-tk@mail.ru](mailto:sega-tk@mail.ru)

Поступила 29.01.2024, рецензирована 05.02.2024, принята 12.02.2024, опубликована 15.03.2024.

**Аннотация:** Описано формирование голограммы шумового сигнала подводного источника на фоне распределенной помехи. Получено выражение для ширины полосы углового распределения спектральной плотности шумового сигнала на голограмме. Оценена минимальная длительность шумового сигнала, определяющая предельную дальность обнаружения шумового источника звука. Представлен алгоритм определения параметров голографической обработки, реализующей предельную дальность обнаружения. Голографическая обработка шумовых сигналов рассмотрена с применением одиночного векторно-скалярного приемника и линейных антенн.

**Ключевые слова:** голографическая обработка, шумовой подводный источник, приемная система, длительность сигнала, дальность обнаружения

УДК 004.052.34

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.

**Для цитирования:** Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Грачев В.И., Рыбьянец П.В., Ткаченко С.А. Предельная дальность обнаружения подводного шумового источника с применением голографической обработки. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):129-136. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.129.

## Maximum detection range of an underwater noise source using holographic processing

Venedikt M. Kuz'kin

A.M. Prokhorov Institute of General Physics of RAS, <http://www.gpi.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru)

Sergey A. Pereselkov, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko

Voronezh State University, <http://www.vsu.ru/>

Voronezh 394006, Russian Federation

E-mail: [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru); [rybyanets.edu@yandex.ru](mailto:rybyanets.edu@yandex.ru); [sega-tk@mail.ru](mailto:sega-tk@mail.ru)

Vladimir I. Grachev

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [grachev@cplire.ru](mailto:grachev@cplire.ru)

Received January 29, 2024, peer-reviewed February 05, 2024, accepted February 12, 2024, published March 15, 2024.

**Abstract:** The formation of a hologram of a noise signal from an underwater source against the background of distributed interference is described. An expression is obtained for the bandwidth of the angular distribution of the spectral density of the noise signal on the hologram. The minimum duration of the noise signal is estimated, which determines the maximum detection range of the noise sound source. An algorithm is presented for determining the parameters of holographic processing that realizes the maximum detection range. Holographic processing of noise signals is considered using a single vector-scalar receiver and linear antennas.

**Keywords:** holographic processing, underwater noise source, receiving system, signal duration, detection range

**UDC 004.052.34**

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.

**For citation:** Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko. Maximum detection range of an underwater noise source using holographic processing. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):129-136e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.129.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (130)
2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (131)
3. НЕИСКАЖЕННАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА (132)
4. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ГОЛОГРАММЫ (132)
5. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА (133)
6. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ (134)
7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (135)

## ЛИТЕРАТУРА (136)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сценарии поведения широкополосных акустических сигналов в океанических волноводах чрезвычайно разнообразны и сложны, однако они подчиняются одной общей закономерности, впервые установленной в [1]. Она проявляется в том, что интерференция мод таких сигналов, благодаря волноводной дисперсии, формирует устойчивую интерференционную картину (интерферограмму) максимумов спектральной плотности энергетических параметров волнового поля в переменных частота-расстояние (время). Конфигурация локализованных полос определяется частотным диапазоном, параметрами волновода, скоростью и траекторией источника. Данная закономерность применима, – в чем состоит одно из основных ее преимуществ, – и к шумовым сигналам источника, описание которых носит статистический характер. Это позволяет рассматривать интерферограмму

как универсальную детерминированную математическую модель шумового сигнала и среды распространения. Модель отличается достаточной простотой и в то же время содержит в себе большое разнообразие форм поведения. Кроме того, она обладает предсказательной силой, но не требует жестких причинно-следственных ограничений. В сущности, роль моделей в физических построениях определяется тем, насколько хорошо они передают существенные черты реальных процессов.

Опираясь на модель интерферограммы, предложен и реализован голографический метод обнаружения и локализации шумового источника, основанный на записи двумерной частотно-временной интерферограммы с применением двумерного преобразования Фурье [2,3]. Состояние вопроса о голографической обработке шумовых сигналов в гидроакустике отражено в [4].

В данной статье описано формирование голограммы шумового сигнала одиночного источника на фоне распределенной помехи в океаническом волноводе. Приведены условия формирования неискаженной интерферограммы. Обсуждено угловое распределение спектральной плотности голограммы. Сформулирован эвристический критерий дальности обнаружения шумового источника. Оценена минимальная длительность регистрации шумового сигнала, определяющая предельную дальность обнаружения источника.



Рассмотрена голографическая обработка шумовых сигналов с использованием одиночного векторно-скалярного приемника и линейных антенн.

**2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Голографическую обработку шумового сигнала  $s(t)$  на фоне помехи  $n(t)$  рассмотрим на примере звукового давления  $p(t)$ , регистрируемого одиночным приемником. Для векторных компонент векторно-скалярного приемника рассмотрение аналогично. За время наблюдения  $\Delta t$  в частотной полосе  $\Delta f$  накапливаются  $J$  независимых временных шумовых реализаций  $p(t) = s(t) + n(t)$  длительностью  $T$  и с временным интервалом  $\delta T$  между ними

$$J = \Delta t / (T + \delta T). \tag{1}$$

Реализации независимы, если  $\delta T \geq 1/\Delta f$ . Преобразованием Фурье восстанавливается частотно-временное представление шумовых реализаций  $p(f,t) = s(f,t) + n(f,t)$  и формируется интерферограмма звукового давления

$$\begin{aligned} I(f,t) &= p(f,t)p^*(f,t) = \\ &= |s(f,t)|^2 + n(f,t)s^*(f,t) + \\ &+ s(f,t)n^*(f,t) + |n(f,t)|^2, \end{aligned} \tag{2}$$

где верхний индекс «\*» обозначает комплексно-сопряженную величину. Первое и четвертое слагаемые (2) дают в плоскости  $(f,t)$  спектральную плотность сигнала и помехи, а второе и третье слагаемые – взаимные спектральные плотности сигнала и помехи. Так как сигнал и помеха некоррелированы, то взаимные спектральные плотности будут иметь вид слабоконтрастного размазанного фона и его весом в интерферограмме  $I(f,t)$  можно пренебречь. Следовательно, интерферограмму (2) приближенно можно представить в виде линейной комбинации интерферограмм сигнала и помехи

$$\begin{aligned} I(f,t) &\approx |s(f,t)|^2 + |n(f,t)|^2 = \\ &= I_s(f,t) + I_n(f,t). \end{aligned} \tag{3}$$

Голограмма звукового давления с учетом соотношения (3) принимает вид

$$\begin{aligned} F(\tau,\nu) &\approx \int\int_0^{\Delta f} [I_s(f,t) + I_n(f,t)] \exp[i2\pi(\nu t - f\tau)] df dt = \\ &= F_s(\tau,\nu) + F_n(\tau,\nu). \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $\nu$  и  $\tau$  – частота и время голограммы;  $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f / 2)$ : – средняя частота спектра. На голограмме спектральная плотность сигнала  $F_s(\tau,\nu)$  движущегося источника сконцентрирована в двух узких полосах, зеркально перевернутых относительно начала координат, в форме фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров. Они размещены в первом и третьем квадрантах голограммы, если радиальная скорость источника  $w < 0$  (источник приближается к приемнику), и во втором и четвертом квадрантах ( $w > 0$ ) при удалении источника от приемника. Под радиальной скоростью понимается проекция скорости источника в направлении на приемник. При неподвижном источнике и движении по дуге окружности координаты пиков фокальных пятен расположены на оси времени  $\tau$ . Область концентрации содержит  $(M - 1)$  главных максимумов с координатами  $(\tau_\mu, \nu_\mu)$ , расположенными на прямой  $\nu = \varepsilon \tau$  с угловым коэффициентом  $\varepsilon = \nu_\mu / \tau_\mu$  где  $M$  – число мод, формирующих поле,  $\mu = \overline{1, M-1}$  – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат максимум первого фокального пятна обусловлен интерференцией соседних мод и приходится на значения  $(\tau_1, \nu_1)$ . Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров  $(m, m + 2)$ , расположены в точке  $(\tau_2, \nu_2)$  и т.д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, продиктованного интерференцией первой и последней моды –  $(\tau(M-1), \nu(M-1))$ . В точках с координатами  $(\tau_\mu, \nu_\mu)$  суммируются  $(M - \mu)$  главных максимумов. Спектральная плотность помехи  $F_n(\tau,\nu)$  распределена по всей плоскости  $(\tau,\nu)$  голограммы.

При условии  $r_0 \gg |w|\Delta t$ , где  $r_0$  – удаление источника от приемника в начальный момент времени  $t = 0$ , радиальная скорость и расстояние равны

$$\dot{w} = -2\pi \kappa_{w\mu} \nu_\mu, \dot{r}_0 = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \tag{5}$$

$$\kappa_{w\mu} = \left[ \frac{dh_{m(m+\mu)}(f_0)}{df} \right]^{-1}, \kappa_{r\mu} = 2\pi \left[ \frac{dh_{m(m+\mu)}(f_0)}{df} \right]^{-1} \tag{6}$$

– коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [5]. Здесь  $h_{mn} = h_m - h_n$ ,  $h_m$  – горизонтальное волновое число  $m$ -й моды. Восстановленные параметры источника, в отличие от их истинных

значений, отмечены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Для первого ( $\mu = 1$ ) и последнего ( $\mu = M - 1$ ) фокальных пятен, ограничивающих область локализации спектральной плотности сигнала, соотношение (6) упрощается

$$\begin{aligned} \kappa_{w1} &= (M - 1) [h_{1M}(f_0)]^{-1}, \\ \kappa_{r1} &= 2\pi (M - 1) [dh_{1M}(f_0)/df]^{-1}, \\ \kappa_{w(M-1)} &= \kappa_{w1} / (M - 1), \quad \kappa_{r(M-1)} = \kappa_{r1} / (M - 1). \end{aligned} \quad (7)$$

Спектральная плотность сигнала сосредоточена в полосе, ограниченной прямыми  $v_1 = \varepsilon\tau + \delta\nu$ ,  $v_2 = \varepsilon\tau - \delta\nu$ ,

где  $\delta\nu = 1/\Delta t$  – полуширина фокальных пятен в направлении оси  $\nu$ . Вне этой полосы спектральная плотность сигнала практически подавлена. Вдоль оси  $\tau$  полуширина фокальных пятен  $\delta\tau = 1/\Delta f$ . Угловые коэффициенты прямой расположения максимумов фокальных пятен  $\varepsilon$  и интерференционных полос  $\delta f/\delta t$  связаны соотношением

$$\varepsilon = -\delta f/\delta t, \quad (9)$$

где  $\delta f$  – частотный сдвиг максимума волнового поля за время  $\delta t$ .

### 3. НЕИСКАЖЕННАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА

Интерференционная картина, формируемая шумовым источником, характеризуется частотными  $\Lambda_f^{(mn)}$  и временными  $\Lambda_t^{(mn)}$  масштабами изменчивости, обусловленными интерференцией  $m$ -й и  $n$ -й модами [5]:

$$\Lambda_f^{(mn)} = \frac{2\pi}{r |dh_{mn}(f_0)/df|}, \quad \Lambda_t^{(mn)} = \frac{1}{|wh_{mn}(f_0)|}. \quad (10)$$

Регистрируемые интерферограмма и голограмма не искажаются, если полоса  $\Delta f$  и время наблюдения  $\Delta t$  для любой пары  $(m, n)$  мод удовлетворяют условиям

$$\Delta f > \Lambda_f^{(mn)}, \quad \Delta t > \Lambda_t^{(mn)}. \quad (11)$$

Неравенства (11) накладывают снизу ограничения на ширину полосы приема и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и частотно-временных масштабов изменчивости передаточной функции волновода при формировании интерферограммы. Увеличение ширины полосы и уменьшение средней частоты спектра

вызывает уменьшение расстояния, на котором наблюдаемые интерферограмма и голограмма не искажаются. Увеличение времени наблюдения уменьшает допустимые значения радиальной скорости. Нарушение условия (11) приводит к изменению конфигурации и размытию фокальных пятен, сопровождающееся увеличением погрешности восстановления параметров источника (5). Неравенства (11) наиболее критичны по отношению к соседним модам, формирующим первое фокальное пятно. При невыполнении первого (левого) условия локализация полос интерферирующих  $(m, n)$  мод не наблюдается. Иная закономерность проявляется при несоблюдении второго (правого) условия, когда время наблюдения недостаточно для пересечения источником пространственных масштабов изменчивости интерферограммы. В этом случае положение пика фокального пятна таких интерферирующих мод смещается на ось времени голограммы, так что по отношению к ним интерферограмма формируется как бы неподвижным источником. При искажении интерферограммы восстановление параметров источника (5) проводится по отношению к неискаженной конфигурации фокальных пятен.

### 4. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ГОЛОГРАММЫ

Угловое распределение спектральной плотности сигнала  $F_s(\tau, \nu)$  на голограмме (функция обнаружения) описывается выражением

$$G_s(\chi) = \int_0^{\Delta\tau} |F_s(\tau, \chi\tau)| d\tau, \quad (12)$$

где  $\Delta\tau$  – линейный размер области концентрации по оси времени  $\tau$ ;  $\chi$  – варьируемое значение углового коэффициента при интегрировании вдоль прямых  $\nu = \chi\tau$ . При приближении источника к приемнику  $0 \leq \chi < \infty$ , в случае удаления –  $-\infty < \chi \leq 0$ . Максимум функции обнаружения сигнала достигается при значении  $\chi = \varepsilon$ . Для иллюстрации на **Рис. 1** приведены экспериментальные результаты голографической обработки сигнала пневмоисточника при приближении к одиночному векторно-скалярному приемнику. Время накопления  $\Delta t = 10$  мин. Входное отношение сигнал/помеха (с/п)  $q_0 = 25.5$  (14.1 дБ). На **Рис. 1б** пунктиром и квадратиками

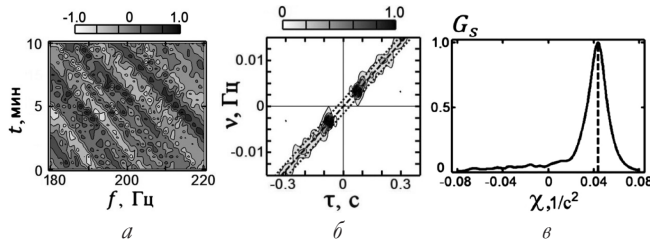


Рис. 1. Нормированные интерферограмма (а), голограмма (б) и функция обнаружения (в) [2].

показаны соответственно прямая  $\nu = \varepsilon\tau$ , на которой расположены пики фокальных пятен, и прямые  $\nu_{1,2}$  (8), ограничивающие спектральную плотность. На Рис. 1в вертикальным пунктиром отмечено значение  $\chi = \varepsilon$ .

Ширина полосы функции обнаружения, согласно Рис. 1в, на уровне 0.1 и 0.5 от максимума равна  $\Delta\chi_{0.1} = 0.048 \text{ с}^{-2}$  и  $\Delta\chi_{0.5} = 0.018 \text{ с}^{-2}$ . Ширину полосы  $\Delta\chi_{0.1}$  можно оценить из условия как разность угловых коэффициентов прямых  $\nu = \chi\tau$ , проходящих через точки  $(\tau_1, \varepsilon\tau_1 + \delta\nu)$ ,  $(\tau_1, \varepsilon\tau_1 - \delta\nu)$ , а ширину полосы  $\Delta\chi_{0.5}$  – через точки  $(\tau_{(M-1)}, \varepsilon\tau_{(M-1)} + \delta\nu)$ ,  $(\tau_{(M-1)}, \varepsilon\tau_{(M-1)} - \delta\nu)$ . В результате получаем

$$\Delta\chi_{0.1} = 2 / \Delta t \tau_1, \Delta\chi_{0.5} = 2 / \Delta t \tau_{(M-1)}. \quad (13)$$

Из Рис. 1б следует, что  $\tau_1 = 0.066 \text{ с}^2$ ,  $\tau_{(M-1)} = 0.22 \text{ с}^2$ . Согласно (13) ширина полосы  $\Delta\chi_{0.1} = 0.050 \text{ с}^{-2}$  и  $\Delta\chi_{0.5} = 0.015 \text{ с}^{-2}$ , что близко к экспериментальным значениям. Ширина полосы  $\Delta\chi$  функции обнаружения, согласно (5) и (13), определяется временем накопления, расстоянием, частотными масштабами изменчивости передаточной функции волновода и не зависит от ширины спектра сигнала и радиальной скорости источника. Она уменьшается с увеличением времени наблюдения  $\Delta t$ , расстояния  $r_0$  и уменьшением средней частоты спектра  $f_0$ . Чем меньше ширина полосы, тем точнее и надежнее оценка углового коэффициента  $\varepsilon$ .

### 5. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

В качестве эвристического критерия дальности обнаружения шумового источника принимается условие, согласно которому максимум функции обнаружения шумовой реализации сигнала на фоне помехи

$$G(\chi, q_0) = \int_0^{\Delta\tau} |F(\tau, \chi\tau, q_0)| d\tau \quad (14)$$

в направлении  $\chi = \varepsilon$  расположения пиков фокальных пятен сигнала в два и более число раз превышает помеховый уровень в направлениях  $\chi \neq \varepsilon$  при входном отношении  $c/\pi q_0$

$$q = G(\varepsilon, q_0) / G(\chi, q_0). \quad (15)$$

За оценку  $\varepsilon$  принимается положение максимального пика,  $\max G(\chi) = G(\varepsilon)$ . При этом восстанавливаемые оценки параметров источника (пеленг, удаленность, радиальная скорость и глубина) близки к реальным значениям [2,3]. Если условие (15) не выполняется, то в функции обнаружения появляются пики помехи, которые усиливаются при уменьшении входного отношения  $c/\pi q_0$  и маскируют пик шумового сигнала. Возрастает неоднозначность в определении углового коэффициента  $\varepsilon$ , отвечающего шумовому сигналу, достоверность обнаружения источника снижается.

При заданных параметрах обработки (время накопления  $\Delta t$ , частотный диапазон  $\Delta f$ , длительность шумовых реализаций  $T$  и интервал между ними  $\delta T$ ) и входном отношении  $c/\pi q_0$  максимальная дальность обнаружения  $r_{\max}$  реализуется при выполнении равенства (15). В качестве примера на Рис. 2, 3 показаны, полученные численным моделированием, результаты голографической обработки в переходной области максимальных расстояний обнаружения движущегося шумового источника на фоне помехи. Параметры обработки:  $\Delta f = 900\text{-}950 \text{ Гц}$ ,  $\Delta t = 30,60 \text{ с}$ ,  $T = 1.5 \text{ с}$ ,  $\delta T = 0.5 \text{ с}$ ,  $J = 15,30$ .

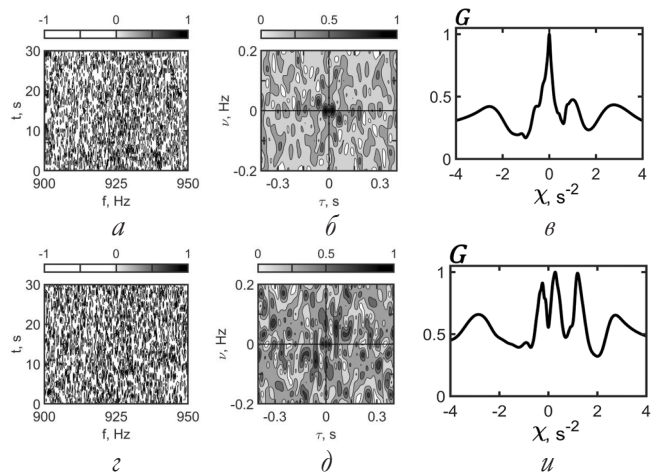
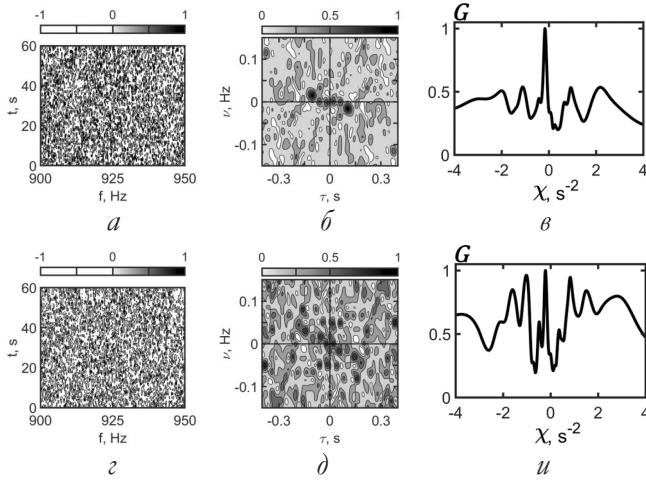


Рис. 2. Нормированные интерферограммы (а, г), голограммы (б, д) и функции обнаружения (в, и). Расстояния: (а-в) –  $r = 6 \text{ км}$ , (г-и) –  $r = 7 \text{ км}$ . Время накопления  $\Delta t = 30 \text{ с}$ , число шумовых реализаций  $J = 15$  [6].





**Рис. 3.** Нормированные интерферограммы (а, з), голограммы (б, д) и функции обнаружения (в, и). Расстояния: (а-в) –  $r = 9$  км, (з-и) –  $r = 10$  км. Время накопления  $\Delta t = 60$  с, число шумовых реализаций  $J = 30$  [6].

При числе временных интервалов  $J = 15, 30$ , согласно критерию (15), максимальные дальности обнаружения оцениваются как  $r_{\max} = 6$  км (Рис. 2) и  $r_{\max} = 9$  км (Рис. 3), которым отвечают входные отношения  $c/\pi q_0 = -8.99, -12.07$  дБ. Рис. 2в и 3в показывают, что увеличение числа временных отсчетов в два раза влечет за собой уменьшение в два раза и ширины полосы  $\Delta\chi_{0.5}$ . При дальнейшем снижении входного отношения  $c/\pi$  сигнал маскируется помехой, возникает неоднозначность в определении положения  $\epsilon$  максимумов функций обнаружения (Рис. 2и, 3и). Обнаружение источника на расстояниях  $r = 7, 10$  км становится невозможным. Расстояниям  $r = 7, 10$  км соответствуют входные отношения  $c/\pi q_0 = -10.14, -12.84$  дБ. В то же время из Рис. 2б, д, 3б, д следует, что конфигурация первых фокальных пятен искажена, поскольку временная координата положения их пика расположена на оси времени, т.е. для соседних интерферирующих мод нарушено правое условие (11).

Под отношением  $c/\pi q$  на выходе голографической обработки, принимая во внимание критерий (15), условимся понимать величину

$$q = G(\epsilon, q_0) / G(\chi, q_0). \quad (16)$$

Тогда, полагая, что частотные смещения интерференционных максимумов волнового поля накапливаются когерентно, а помеха – некогерентно, выражение (16) принимает вид

$$q = Jq_0. \quad (17)$$

При фиксированном значении временных шумовых реализаций  $J$  максимальная дальность обнаружения  $r_{\max}$  шумового источника, согласно (15), (16), определяется неявным выражением

$$2 = Jq_0(r_{\max}), \quad (18)$$

где величина  $q_0(r_{\max})$  определяется законом спадающей средней мощности шумоизлучения источника с расстоянием и уровнем помехи. Таким образом, при фиксированном времени накопления  $\Delta t$  предельная дальность обнаружения  $r_{\lim}$  достигается при минимальной длительности  $T_{\min}$  шумового сигнала, т.е. при максимальном значении  $J$ .

## 6. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

Минимальную длительность шумового сигнала оценим из представления сигнала с помощью частотных выборок передаточной функции волновода. При этом достаточно ограничиться рассмотрением наименьшего частотного масштаба изменчивости поля, обусловленного интерференцией между крайними модами.

В соответствии с (10) наименьший частотный масштаб в окрестности частоты  $f_0$  на расстоянии  $r$  между источником и приемником

$$\min \Lambda_f = \frac{2\pi}{r |dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (19)$$

Период изменчивости сигнала определяется независимыми значениями передаточной функции в пяти точках. Частотный интервал  $\delta f$  между двумя выборками не должен превышать значения  $1/T$ ,  $\delta f \leq 1/T$ , где  $T$  – длительность шумового сигнала, поэтому величина (19) равна также

$$\min \Lambda_f = 5\delta f = 5/T. \quad (20)$$

Из (19), (20) следует, что длительность шумовой реализации должна удовлетворять неравенству

$$T \geq T_{\min} = \frac{5}{2\pi} r |dh_{1M}(f_0)/df|, \quad (21)$$

так что с увеличением расстояния  $r$  и уменьшением средней частоты  $f_0$  спектра минимальное время регистрации шумового сигнала возрастает.

В результате допустимое число независимых временных шумовых реализаций (1) сверху оценивается как

$$J \leq J_{\max} = \frac{\Delta t}{(5/2\pi)r |dh_{1M}(f_0)/df| + (1/\Delta f)}. \quad (22)$$

Выбором ширины спектра  $\Delta f$  практически всегда можно обеспечить выполнение условия

$$J_{\max} \approx \frac{2\pi}{5} \frac{\Delta t}{r |dh_{1M}(f_0)/df|}. \quad (23)$$

Если длительность регистрации  $T$  меньше  $T_{\min}$  (21), это приводит к искажениям в восстановлении спектра сигнала, что влечет за собой возрастание погрешности в определении положения максимумов фокальных пятен и, как следствие, увеличение погрешности в оценках удаленности и радиальной скорости источника. При входном отношении  $c/\pi q_0(r_{\lim})$  для предельной дальности обнаружения шумового источника, согласно (18) и (23), получаем неявную оценку

$$r_{\lim} = \frac{2\pi}{10} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|} q_0(r_{\lim}), \quad (24)$$

Характерной чертой соотношения (24) для предельной дальности  $r_{\lim}$  шумового источника является то обстоятельство, что в него входят параметры передаточной функции волновода, физическое содержание которых различно в зависимости от акватории. Напомним, что выражение (24) связывает предельную дальность обнаружения с входным отношением одиночного приемника.

Обобщим оценку (24) на линейные антенны. Предположим, что на входе элементов антенны помеха не коррелирована. Для выполнения этого условия достаточно потребовать выполнения неравенства  $d \geq \lambda/2$ , где  $d$  и  $\lambda$  – межэлементное расстояние и длина волны. Тогда выражение (24) принимает вид

$$r_{\lim(an)} = \frac{2\pi \eta}{10 b} \frac{\Delta t}{|dh_{1M}(f_0)/df|} q_{0(an)}(r_{\lim}), \quad (25)$$

где  $\eta$  и  $b$  – коэффициент усиления и число элементов антенны,  $q_{0(an)}$  – отношение  $c/\pi$  на входе одиночного элемента антенны [7]. В случае горизонтальной линейной антенны максимальная помехоустойчивость голографической обработки достигается при пеленге, равном углу компенсации, при этом  $\eta = b^2$ . Для вертикальной антенны  $\eta \approx b^2$ . Если положить  $b = 1$ , то формула (25) переходит в соответствующую формулу для одиночного приемника.

Алгоритм реализации параметров голографической обработки при предельной

дальности обнаружения на примере одиночного приемника представлен ниже.

1. Вводится априорная модель волновода. Задается предельная дальность обнаружения  $r_{\lim}$  и выбираются параметры обработки: время накопления  $\Delta t$ , ширина полосы  $\Delta f$  и средняя частота спектра  $f_0$ . Фиксируется уровень помехи  $N_{\Delta f}^2$ . Моделируется зависимость мощности шумового источника  $P_{\Delta f}^2$  от расстояния  $r$ .

2. На основе зависимости  $P_{\Delta f}^2(r)$  для предельной дальности обнаружения  $r_{\lim}$  вычисляется входное отношение  $c/\pi q_0(r_{\lim}) = P_{\Delta f}^2(r_{\lim})/N_{\Delta f}^2$ .

3. Из выражения (24) находится величина  $|(dh_{1M}(f_0)/df|$ , определяющая минимальную длительность шумовой реализации  $T_{\min}$ .

4. Согласно (21), полагая  $r = r_{\lim}$ , определяется минимальная длительность  $T_{\min}$  шумового сигнала.

Описанный алгоритм не требует предварительного знания о числе энергонесущих мод, формирующих поле на предельном расстоянии. Поэтому он применим как для модельных, так и для реальных волноводов. Плодотворность алгоритма рассмотрим на примере численного эксперимента [6]. Исходные данные:  $\Delta f = 50$  Гц,  $f_0 = 925$  Гц,  $\Delta t = 30$  с,  $N_{\Delta f}^2 = -61.01$  дБ,  $r_{\lim} = 15$  км. Зависимость  $P_{\Delta f}^2(r)$  приведена на Рис. 2 [6], из которой следует, что  $q_0(r_{\lim}) = 2.87 \cdot 10^{-2}$  (-15.42) дБ. Согласно (24) имеем  $|(dh_{1M}(f_0)/df| = 3.61 \cdot 10^{-5}$  с/м. Используя (21), получаем оценку  $T_{\min} = 4.31 \cdot 10^{-1}$  с. Заметим, что выражение (23) обосновано, так как неравенство  $T_{\min} \gg (1/\Delta f)$  выполняется.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плодотворность голографического метода обнаружения и локализации шумовых подводных источников объясняется чрезвычайной простотой, с которой двумерное преобразование Фурье осуществляет довольно сложное и запутанное линейное преобразование, необходимое для получения изображения источника. Такая простота определяется в основном тем, что интерферограмма шумового сигнала на фоне помехи представляется в виде линейной комбинации интерферограмм сигнала и помехи, с одной стороны, и сохранением амплитудной и фазовой информации – с другой.

При этом очень важную роль играет функция обнаружения, определяющая частотно-временную фокусировку шумового сигнала, которая позволяет явным образом определить предельную дальность обнаружения источника в зависимости от параметров обработки и входного отношения сигнал/помеха. Выражение для предельной дальности обнаружения получено по отношению к одиночному приемнику и линейным антеннам. Алгоритм определения предельной дальности обнаружения апробирован в рамках численного эксперимента на примере одиночного приемника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чупров СД. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. В: *Акустика океана. Современное состояние*. М.: Наука, 1982, с. 71-82.
2. Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
3. Казначеев ИВ, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. *Акуст. журн.*, 2018, 64(1):33-45.
4. Переселков СА, Кузькин ВМ. *Голографическая обработка широкополосных гидроакустических сигналов*. Воронеж, Издательский дом ВГУ, 2023, 183 с.
5. Бреховских ЛМ, Лысанов ЮП. *Теоретические основы акустики океана*. Л., Гидрометеиздат, 1982, 264 с.
6. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Tkachenko SA, Matvienko YuV, Khvorostov YuA. Range of detection of underwater sound source. *Phys. Wave Phenom.*, 2023, 31(5):339-345.
7. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Ткаченко СА, Казначеев ИВ. Интерферометрическая обработка акустической информации с использованием протяженных антенн в диспергирующих средах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные Технологии*, 2020, 12(4):483-494. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.483.

**Кузькин Венедикт Михайлович**

*д.ф.-м.н., проф.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Москва 119991, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

**Переселков Сергей Алексеевич**

*д.ф.-м.н., проф.*

Воронежский государственный университет  
Воронеж 394006, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

**Грачев Владимир Иванович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
Москва 125009, Россия

E-mail: grachev@cplire.ru

**Рыбьянец Павел Викторович**

*м.н.с.*

Воронежский государственный университет  
Воронеж 394006, Россия

E-mail: rybyanets.edu@yandex.ru

**Ткаченко Сергей Александрович**

*м.н.с.*

Воронежский государственный университет  
Воронеж 394006, Россия

E-mail: sega-tk@mail.ru.



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.137

## Использование сеточно-характеристического метода на химерных сетках для исследования морфометрических характеристик киля тороса

Песня Е.А., Муратов М.В., Фаворская А.В., Кожемяченко А.А.

Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

E-mail: [pesnya.ea@phystech.edu](mailto:pesnya.ea@phystech.edu), [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com), [aleanera@yandex.ru](mailto:aleanera@yandex.ru), [kozhemiyachenko@yandex.ru](mailto:kozhemiyachenko@yandex.ru)

Поступила 24.11.2023, рецензирована 30.11.2023, принята 07.12.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

**Аннотация:** При проектировании инженерных сооружений в арктической зоне необходимо учитывать нагрузки, передаваемые конструкции сооружения, при столкновении с различными ледовыми образованиями: айсбергами, торосами, стамухами. В работе рассматривается использование сеточно-характеристического метода для моделирования прохождения упругих волн в поперечном срезе тороса с учетом его пористости в консолидированном слое и в нижней части киля. Для учета криволинейной формы пор, заполненных воздухом или водой, предложено использовать химерные (наложенные) расчетные сетки. В результате компьютерного моделирования решена прямая задача ультразвукового исследования тороса, получены поля вектора скорости в различные моменты времени, в том числе система переотражений от пор.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, сеточно-характеристический метод, морфометрия тороса, ультразвуковое исследование

УДК 519.63

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 21-71-10015.

**Для цитирования:** Песня Е.А., Муратов М.В., Фаворская А.В., Кожемяченко А.А.. Использование сеточно-характеристического метода на химерных сетках для исследования морфометрических характеристик киля тороса. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):137-142. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.137.

## The grid-characteristic method on chimeric meshes application to study the keel morphometric characteristics of ice ridges

Evgeniy A. Pesnya, Maxim V. Muratov, Alena V. Favorskaya, Anton A.

Kozhemyachenko

Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

E-mail: [pesnya.ea@phystech.edu](mailto:pesnya.ea@phystech.edu), [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com), [aleanera@yandex.ru](mailto:aleanera@yandex.ru), [kozhemiyachenko@yandex.ru](mailto:kozhemiyachenko@yandex.ru)

Received November 24, 2023, peer-reviewed November 30, 2023, accepted December 07, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** Designing engineering structures in the Arctic zone requires to consider the loads transmitted to the structure construction in connection with collisions with various ice formations: icebergs, ice ridges, stamukhs. The paper considers the use of the grid-characteristic method for modeling the passage of elastic waves in a cross-section of the ice ridge together with its porosity in the consolidated layer and in the lower part of the keel. We propose to use chimeric (overlapped) computational meshes for the describing curvilinear shape of pores filled with air or water. As a result of computer simulation, the direct problem of ultrasound investigation of the ice ridge has solved, velocity vector fields have obtained at various moments in time, including a system of reflections from pores.

**Keywords:** computer simulation, grid-characteristic method, ice ridges morphometry, ultrasound investigation

**UDC 519.63**

*Acknowledgments:* The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 21-71-10015..

*For citation:* Evgeniy A. Pesnya, Maxim V. Muratov, Alena V. Favorskaya, Anton A. Kozhemyachenko. The grid-characteristic method on chimeric meshes application to study the keel morphometric characteristics of ice ridges. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):137-142e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.137.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (138)
  2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (139)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (140)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (141)
- ЛИТЕРАТУРА (141)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На безопасность эксплуатации нефтедобывающих сооружений, судоходства в арктических регионах влияют нагрузки при взаимодействии с торосами. Для получения проектных оценок ледовых нагрузок на инженерные сооружения необходимо проводить морфометрический анализ характеристик таких ледовых образований. Торосом называют ледяные гребни, образованные в результате сжатия ледяного покрова, при этом надводная часть тороса называется парусом, а подводная – килем. Например, в [1-2] приведена информация о морфометрии и внутренней структуре тороса первого года образования с помощью электротермического бурения в ледовом лагере Барнео. При этом для исследования нижней части торосов принято использовать гидролокационные подходы [3]. Большой набор статистических данных об осадке льда, глубине килея, собранный направленными вверх гидролокаторами, приведен в [4] для пяти участков Баренцева моря. Другой морфометрический анализ килея торосов первого года формирования с использованием гидролокаторов был проведен в [5], где сделано предположение, что лучшим обобщением формы гребней первого года является трапециевидная форма килея. В [6] проведен мониторинг килей торосов с помощью гидролокаторов, расположенных на мосту в Нортумберлендском проливе. Форма килей была классифицирована как одна из

четырёх форм: треугольная, трапециевидная, w-образная и кили с несколькими пиками. Наблюдаемые распределения величин глубины килея были сравнены с расчетными. В [7] ледяной покров и ледяной гребень моделируются в виде тонких эластичных пластин для рассмотрения взаимодействия волн с круглым телом, захваченным тонким слоем морского льда, проводится аналитический анализ воздействия волн на круговой ледяной гребень, встроенный в ледяной покров. В [8-9] предложен вероятностный метод, основанный на поиске взаимосвязи между уровнями осадки льда, осадки килея тороса и частотой образования гребней, для оценки нагрузок, передаваемых на морские сооружения. Проведенный анализ сезонных данных, полученных с помощью гидролокаторов в море Бофорта, об уровнях осадки льда, килея ледяного гребня, частоте образования гребней позволил получить вероятностные аналитические подходы для моделирования возраста гребня, определения формулы роста консолидированного слоя и исследования его толщины. На основе полевого эксперимента по укреплению искусственной ледяной гряды в [10] получены аналитические и двумерные дискретные численные подходы моделирования для прогнозирования толщины консолидированного слоя при вероятностном анализе воздействия льда на сооружения, требующие в качестве входных данных информации о метеорологических условиях и общих физико-механических свойствах льда. При этом численное моделирование уровня льда и консолидации гряды было выполнено с помощью метода конечных элементов, а положение границы лед-вода определялось из условия энергетического баланса Стефана.

В [11] для изучения строения ледовых гребней различной конфигурации используется

сеточно-характеристический метод на структурированных регулярных расчетных сетках и был проведен сравнительный анализ полученных с помощью полноволнового моделирования сейсмограмм. Для решения уравнений математической физики в последнее время стали использоваться химерные или перекрывающиеся расчетные сетки, которые ранее применялись для решения гидродинамических задач [12-13]. Сеточно-характеристический метод с использованием химерных сеток позволяет описывать границы сложной формы [14-15], в том числе контактные [16] или не сонаправленные с координатными осями [17-19]. В настоящей работе для описания криволинейных полостей, заполненных воздухом или водой, применяется сеточно-характеристический метод с использованием химерных регулярных расчетных сеток.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного моделирования задачи распространения волнового сигнала в торосе совместно рассматриваются системы уравнений для изотропной линейно-упругой среды и для акустической среды, которые в общем случае могут быть сведены к следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

где в (1)  $\mathbf{u}$  – вектор искомых функций.

В случае линейно-упругой среды в качестве вектора искомых функций рассматриваются  $\mathbf{u} = (v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})^T$ , т.е. компоненты скорости распространения возмущения  $\mathbf{v}$  и компоненты симметричного тензора напряжений Коши  $\sigma$ . Матрицы  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$  имеют набор собственных значений  $\{c_p, -c_p, c_s, -c_s, 0\}$ , где  $c_p$  – скорость распространения продольных волн,  $c_s$  – скорость распространения поперечных волн.

В случае акустической среды искомыми функциями являются  $\mathbf{u} = (v_x, v_y, p)^T$ , т.е. компоненты скорости распространения возмущения  $\mathbf{v}$  и давление  $p$ . Матрицы имеют набор собственных значений  $\{c_p, -c_p, 0\}$ .

Таким образом, системы уравнений (1), описывающие линейно-упругое тело и акустическую среду, являются гиперболическими,

а значит в обоих случаях матрицы  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$  могут быть представлены в виде

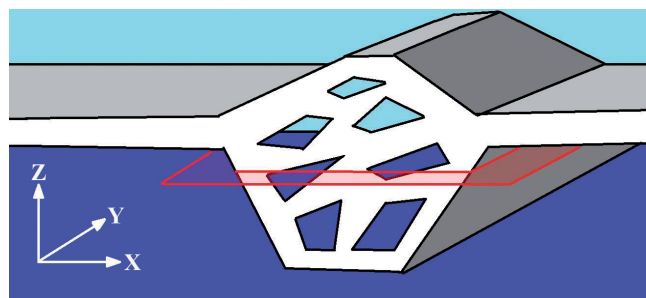
$$\mathbf{A} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Omega}^{-1},$$

где матрица  $\mathbf{\Omega}$  состоит из столбцов, являющимися правыми собственными векторами исходной матрицы, которые, в свою очередь, отвечают собственным значениям, которые являются элементами диагональной матрицы  $\mathbf{\Lambda}$ . Расщепляя систему (1) по пространственным направлениям, переходим к инвариантам Римана  $\omega \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{u}$ , которые переносятся по характеристикам гиперболической системы, получим гиперболическую систему из линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами в инвариантах Римана

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

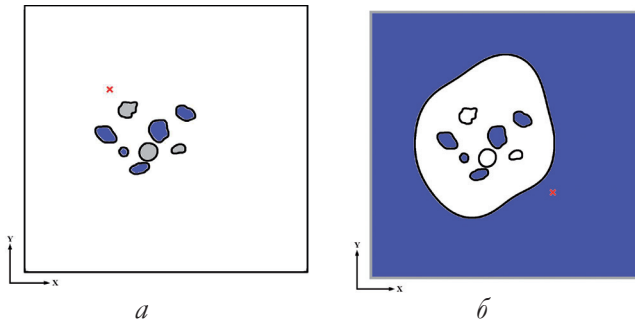
Система в инвариантах Римана (2) на верхнем слое по времени может быть численно проинтегрирована с использованием конечно-разностных схем, например, при помощи схемы Русанова [16], используемой при расчетах в настоящей работе, третьего порядка по времени и пространству. Для перехода к компонентам  $\mathbf{v}$  и  $\sigma$  или  $\mathbf{v}$  и  $p$  соответственно на верхнем слое по времени после расчета инвариантов Римана используется обратное преобразование  $\mathbf{u} = \mathbf{\Omega} \omega$ .

Принципиальная модель устройства ледового гребня приведена на **Рис. 1**, где красным сечением схематично показана расчетная область при рассмотрении нижней части киля тороса. На **Рис. 2** и **Рис. 3** приведены расчетные области 16 на 16 метров, в которых исследовались сейсмические отклики от полостей и пор, заполненных воздухом или водой, для случая задания источника в консолидированном слое тороса и в морской воде при рассмотрении нижней части киля соответственно. Характеристики сред



**Рис. 1.** Принципиальная модель ледового гребня (тороса).





**Рис. 2.** Поперечный срез ледового гребня с полостями, заполненными воздухом (серые области) или водой (синие области): а – в консолидированном слое, б – в нижней части килля.

**Таблица 1**

Параметры моделируемых сред

Среда	Скорость Р-волн, м/с	Скорость S-волн, м/с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Лед	3940	2493	917
Вода	1500	-	1000

приведены в **Таблице 1**. Стоит отметить, что, изменяя соответствующие параметры среды, можно рассматривать ледовые образования с различной соленостью и температурным режимом.

На границах раздела сред лед-воздух, ставились условия свободной границы

$$\sigma \cdot n = 0,$$

где  $n$  – нормаль к соответствующей границе.

На границе раздела сред лед-вода (1 и 2 среды соответственно) ставилось следующее контактное условие:

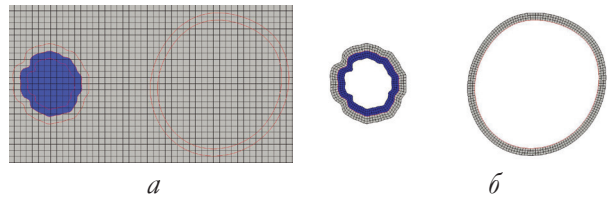
$$v_1 \cdot n = v_2 \cdot n,$$

$$\sigma_1 \cdot n + p \cdot n = 0,$$

здесь  $n$  – нормаль к границе контактирующей среды 1.

На границах расчетной области на Рис. 2 используются неотражающие граничные условия. В качестве начального возмущения использовался импульс Рикера с частотой 25 кГц, местоположение источника отмечено на Рис. 2 красным крестом.

В расчете области интегрирования на Рис. 2 покрывались фоновыми прямоугольными расчетными сетками и криволинейными химерными сетками с характерным пространственным шагом  $10^{-2}$  м, шаг интегрирования по времени составлял  $2.54 \cdot 10^{-7}$  с. Пример расположения фоновой и наложенных сеток для полостей, заполненных воздухом и водой, представлен

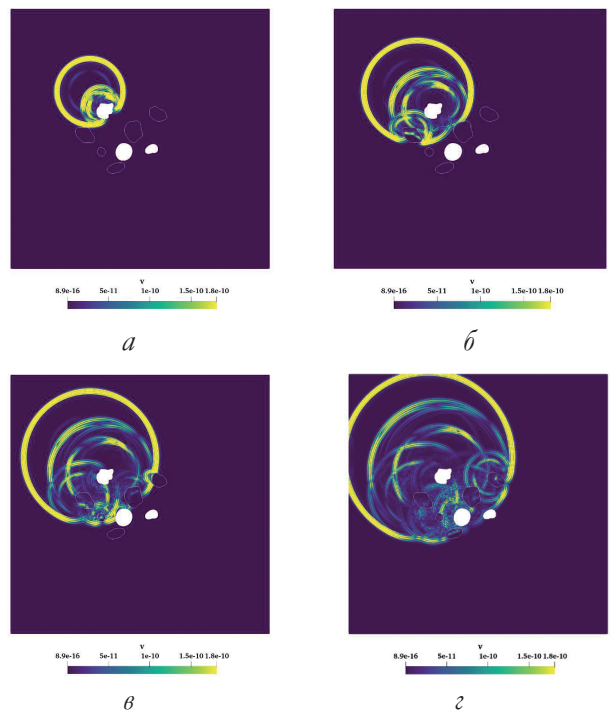


**Рис. 3.** Пример конфигурации расчетных сеток: а – фоновая сетка, б – химерные сетки.

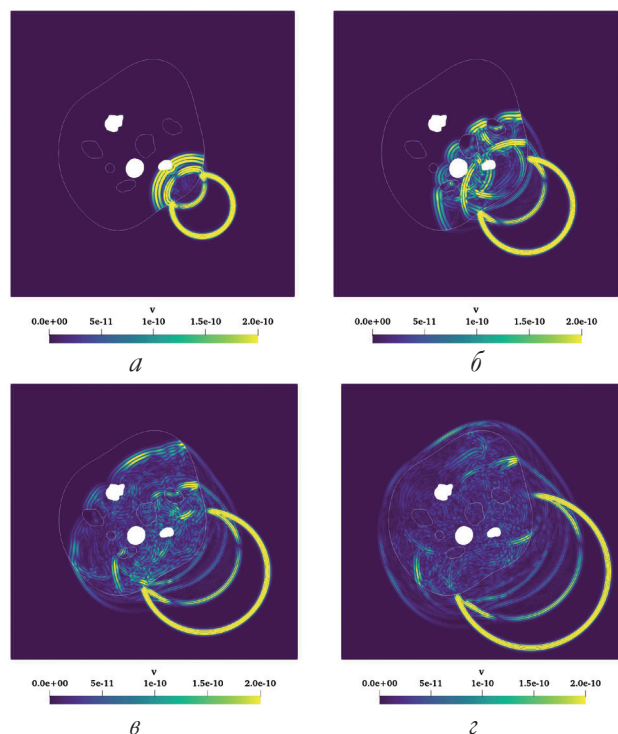
на **Рис. 3**. В узлах фоновой сетки содержится информация о параметрах среды, так на Рис. 3а серым цветом выделен лед, синим цветом – вода. При этом для описания полостей в приграничной области расчет ведется с использованием наложенных сеток согласно Рис. 3б, что с учетом поставленных граничных условий и алгоритма взаимной интерполяции [18] позволяет провести корректный расчет распространения волнового сигнала по водным порам и не учитывать в расчете области, заполненные воздухом.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На **Рис. 4** и **Рис. 5** приведены результаты полноволнового моделирования распространения возмущения и волновых откликов от рассматриваемых полостей в различные моменты времени в случае



**Рис. 4.** Распространение волновых откликов от системы полостей в срезе, расположенном в консолидированном слое: а – 0.014 с, б – 0.021 с, в – 0.027 с, г – 0.034 с.



**Рис. 5.** Распространение волновых откликов от системы полостей в срезе, расположенном в нижней части кия: а – 0.030 с, б – 0.045 с, в – 0.060 с, з – 0.075 с.

рассмотрения расчетной области в консолидированном слое тороса и нижней части его кия соответственно.

На Рис. 4а формируется первый отклик от полости, заполненной воздухом, на Рис. 4б начальный импульс переотражается от поры, заполненной водой, при этом часть волнового фронта проходит сквозь пору. На Рис. 4в и Рис. 4г показана сложная система переотражений от всех оставшихся пор и полостей.

На Рис. 5а происходят первые переотражения от самого кия тороса и первой полости, в дальнейшем формируются новые отраженные сигналы от других полостей, выходящие из ледяной поверхности кия в воду на Рис. 5б и Рис. 5в, а на Рис. 5г исходный сигнал полностью проходит толщину кия.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием сеточно-характеристического метода на структурированных прямоугольных и химерных регулярных расчетных сетках решена прямая задача прохождения ультразвукового сигнала по торосу и получены результаты полноволнового моделирования вектора скорости в различные моменты времени.

Предложенный подход позволяет учитывать сложную геометрию и структуру, пористость ледового гребня. Полученные алгоритмы и модели могут быть использованы для получения и анализа синтетических сейсмограмм, по которым можно определить ряд морфометрических параметров тороса, при решении обратной задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kharitonov VV. Morphometry and unusual internal structure of ice ridge investigated at Barneo ice camp in April 2013. *Polar Science*, 2022, 31:100736.
2. Kharitonov VV, Borodkin VA. On the results of studying ice ridges in the Shoka-I'skogo Strait, part I: Morphology and physical parameters in-situ. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 174:103041.
3. Mironov YU, Guzenko RB, Porubaev VS, Kharitonov VV, Khotchenkov SV and Nesterov AV. Morphometric Parameters of Stamukhas in the Laptev Sea. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2019, 29(4):383-390.
4. Hansen E, Ervik Å, Eik K, Olsson A, Teigen SH. Long-term observations (2014–2020) of level ice draft, keel depth and ridge frequency in the Barents Sea. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 216:103988.
5. Ekeberg O, Høyland K, Hansen E. Ice ridge keel geometry and shape derived from one year of upward looking sonar data in the Fram Strait. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 109:78-86.
6. Obert KM, Brown TG. Ice ridge keel characteristics and distribution in the Northumberland Strait. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 66(2-3):53-64.
7. Mandal S, Law AW, Shen HH. Wave interactions with circular ice ridge embedded in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155:90-99.
8. Samardžija I, Høyland K, Leira BJ, Naess A. Consolidated layer thickness in probabilistic simulation of first-year ice ridges. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 216:104021.
9. Samardžija I, Høyland K. Analysis of the relationship between level ice draft, ridge frequency and ridge keel draft for use in the probabilistic assessment of ice ridge loads on

- offshore structures. *Ocean Engineering*, 2023, 270:113593.
10. Salganik E, Høyland K, Shestov A. Medium-scale experiment in consolidation of an artificial sea ice ridge in Van Mijenfjorden, Svalbard. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 181:103194.
  11. Favorskaya AV, Muratov MV. Ultrasonic Study of Sea Ice Ridges. In: Czarnowski I, Howlett RJ, Jain LC (eds). *Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 309, pp 259–268. Springer, Singapore.
  12. Henshaw WD, Schwendeman DW. Parallel computation of three-dimensional flows using overlapping grids with adaptive mesh refinement. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(16):7469-7502.
  13. Chang XH, Ma R, Wang NH, Zhao Z, Zhang LP. A Parallel Implicit Hole-cutting Method Based on Background Mesh for Unstructured Chimera Grid. *Computers & Fluids*, 2020, 198:104403.
  14. Favorskaya AV, Khokhlov NI, Petrov IB. Grid-Characteristic Method on Joint Structured Regular and Curved Grids for Modeling Coupled Elastic and Acoustic Wave Phenomena in Objects of Complex Shape. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020, 41(4):512-525.
  15. Kozhemyachenko A, Favorskaya A, Pesnya E, Stetsyuk V. Modification of the Grid-Characteristic Method on Chimera Meshes for 3D Problems of Railway Non-Destructive Testing. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023, 44(1):376-386.
  16. Favorskaya A, Khokhlov N. Accounting for curved boundaries in rocks by using curvilinear and Chimera grids. *Procedia Computer Science*, 2021, 192:3787-3794.
  17. Khokhlov N, Favorskaya A, Stetsyuk V, Mitskovets I. Grid-characteristic method using Chimera meshes for simulation of elastic waves scattering on geological fractured zones. *Journal of Computational Physics*, 2021, 446(1):110637.
  18. Mitskovets Ivan A. Application of Chimeric Meshes for Explicit Accounting for Inhomogeneities in Modeling the Propagation of Elastic Waves. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2): 185-192e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.185.
  19. Favorskaya AV, Khokhlov N. Using Chimera Grids to Describe Boundaries of Complex

Shape. In: Czarnowski I, Howlett RJ, Jain LC. (eds). *Intelligent Decision Technologies. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 309, pp 249–258. Springer, Singapore.

**Песня Евгений Александрович***аспирант*

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

**E-mail: pesnya.ea@phystech.edu****Муратов Максим Викторович***к.ф.-м.н.*

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

**E-mail: max.muratov@gmail.com****Фаворская Алена Владимировна***д.ф.-м.н., доцент*

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

**E-mail: aleanera@yandex.ru****Кожемяченко Антон Андреевич***к.ф.-м.н.*

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный 141700, Моск. обл., Россия

**E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru.**



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.143

## Применение физического уровня 5G NR в космических коммуникациях, оценка эффективности

Рогожников Е. В., Дмитриев Э. М., Кондрашов Д. А., Крюков Я. В.,  
Коновальчиков А. В., Мухамадиев С. М.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, <http://tusur.ru/>  
Томск 634050, Российская Федерация

E-mail: [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [edegor1993@mail.ru](mailto:edegor1993@mail.ru), [danila.a.kondrashov@tusur.ru](mailto:danila.a.kondrashov@tusur.ru), [iakov.v.kriukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kriukov@tusur.ru),  
[artem.konovalchikov@tusur.ru](mailto:artem.konovalchikov@tusur.ru), [mukhamadiev@mail.ru](mailto:mukhamadiev@mail.ru)

Поступила 02.09.2023, рецензирована 09.09.2023, принята 16.09.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

**Аннотация:** Канал распространения существенно модифицируется в случае технологии радиодоступа нового радио 5-го поколения (5G NR) в системах космической связи. В частности, возникают большие задержки по отношению к наземному каналу распространения, а затухание сигнала увеличивается, что приводит к снижению отношения сигнал/шум (SNR). Доплеровский сдвиг несущей частоты также существенно увеличивается из-за высокой скорости космического корабля (КА) относительно пользовательского оборудования (АП). Цель работы – исследование возможностей декодирования физических каналов и сигналов системы 5G NR в случае ее применения в системах спутниковой связи (СКС), а также расчет производительности такой системы для оценки применимости. 5G NR в СКС. Способность правильно декодировать сигналы и каналы в зависимости от SNR оценивается с помощью математического моделирования сигнала 5G NR и формирования канала совместно с моделью Quasi Deterministic Radio Channel Generator (QuaDRiGa). В рамках исследования сделаны выводы о применимости технологии радиодоступа 5G NR в среде космической связи.

**Ключевые слова:** 5G NR, системы спутниковой связи, оценка производительности, технология радиодоступа, QuaDRiGa, декодирование сигналов и каналов 5G NR

УДК 621.396.41

**Для цитирования:** Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Кондрашов Д.А., Крюков Я.В., Коновальчиков А.В., Мухамадиев С.М. Применение физического уровня 5G NR в космических коммуникациях, оценка эффективности. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):143-156. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.143.

## Application of the 5g Nr Physical Layer in Space Communications, Performance Evaluation

Evgeniy V. Rogozhnikov, Edgar M. Dmitriev, Danila A. Kondrashov, Yakov V. Kryukov,  
Artem V. Konovalchikov, Semyon M. Mukhamadiev

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, <http://tusur.ru/>  
Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [edegor1993@mail.ru](mailto:edegor1993@mail.ru), [danila.a.kondrashov@tusur.ru](mailto:danila.a.kondrashov@tusur.ru), [iakov.v.kriukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kriukov@tusur.ru),  
[artem.konovalchikov@tusur.ru](mailto:artem.konovalchikov@tusur.ru), [mukhamadiev@mail.ru](mailto:mukhamadiev@mail.ru)

Received September 02, 2023, peer-reviewed September 09, 2023, accepted September 16, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** The propagation channel is significantly modified in the case of 5th Generation New Radio radio access technology (5G NR) in space communication systems. In particular, large delays occur with respect to the terrestrial propagation channel, and signal attenuation increases, resulting in a lower signal-to-noise ratio (SNR). The Doppler shift of the carrier frequency is also significantly

increased due to the high velocity of the spacecraft (SC) relative to the user equipment (UE). The aim of the work is to investigate the decoding capability of the physical channels and signals of the 5G NR system in case of its application in satellite communication systems (SCS), as well as to calculate the performance of such a system to assess the applicability of 5G NR in SCS. The ability to correctly decode signals and channels depending on SNR is evaluated using mathematical modelling of 5G NR signal and channel shaping in conjunction with the Quasi Deterministic Radio Channel Generator (QuaDRiGa) model. The research within the paper draws conclusions on the applicability of 5G NR radio access technology in a space communications environment.

*Keywords:* 5G NR, satellite communication systems, performance evaluation, radio access technology, QuaDRiGa, decoding of 5G NR signals and channels

UDC 621.396.41

*For citation:* Evgeniy V. Rogozhnikov, Edgar M. Dmitriev, Danila A. Kondrashov, Yakov V. Kryukov, Artem V. Konovalchikov, Semyon M. Mukhamadiev. Application of the 5G NR Physical Layer in Space Communications, Performance Evaluation. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):143-156e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.143.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (144)
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (145)
  - 2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ КАНАЛОВ И СИГНАЛОВ (145)
  - 2.2. СПУТНИКОВЫЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ (149)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (150)
  - 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ (150)
  - 3.2. ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ (154)
  - 3.3 ВЛИЯНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ НА ОБРАБОТКУ СИГНАЛА (156)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (156)

## ЛИТЕРАТУРА (156)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Интеграция спутниковой связи и беспроводных наземных сетей активно обсуждается в контексте систем с применением 5G NR. Фактически, преимущества включения космических аппаратов в такие сети 5G заключаются в неоспоримой эффективности спутников для обеспечения повсеместного покрытия, а совместимость между различными интерфейсами радиодоступа изучаются в 3GPP с момента выхода стандарта 3GPP TS 38.300 16 версии.

Рассмотрен ряд работ [1-5], посвященных обзору последних разработок в области процедур случайного доступа и физического уровня для поддержки спутниковой связи в сетях 5G, а также испытаниям некоторых решений.

Основными источниками проблем для 5G NR в космическом канале связи являются большая задержка распространения сигнала,

большее ослабление сигнала и большое доплеровское смещение в спутниковых каналах, относительно Земных. Расстояния между абонентским устройством и базовой станцией, расположенной на КА в ССС может составлять от 500 км для спутников на низкой околоземной орбите (Low Earth Orbit, LEO) до 36 000 км на геостационарной орбите (Geostationary Earth Orbit, GEO) [6], что превышает максимальное расстояние в 5G NR, равное 300 км. Это приводит к тому, что время круговой задержки (round-trip time, RTT) – время распространения сигнала от UE до КА и обратно, составляет от 4 мс, для спутников на LEO, до нескольких сотен мс для спутников на GEO [7]. Спутники движутся со скоростью 7200 км/с, что приводит к смещению несущей частоты более чем на 720 кГц на частоте 30 ГГц [8].

В связи с этим 3GPP представила концепцию неназемных сетей (non-terrestrial network, NTN), в которой планируется использовать для передачи данных воздушные или космические аппараты, и исследовала особенности реализации и возможные варианты архитектуры сети [8]. До сих пор наземные и спутниковые системы разрабатывались независимо друг от друга, а их взаимодействие было возможно только через шлюзовые решения, например, спутниковые системы уже поддерживаются в системах 4G, но с ограниченной совместимостью. Однако с 2018 года началась интеграция этих систем, которая должна осуществляться на всех уровнях. В настоящее время ключевые

технологии, представленные в 5G NR, все еще находятся в процессе интеграции. Одной из целей интеграции является возможность использования 5G NR в спутниковых системах.

В данной статье рассмотрены следующие каналы и сигналы нисходящей линии передачи 5G NR: нисходящий физический широкополосный канал (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) – предназначен для передачи пользовательских данных от dNB к UE; нисходящий физический канал управления (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) – предназначен для передачи управляющей и служебной информации, включая информацию управления нисходящим каналом (Downlink Control Information, DCI); блок сигнала синхронизации (Synchronization Signal Block, SSB) – включает в себя сигналы первичной синхронизации (Primary Synchronization Signal, PSS), вторичной синхронизации (Secondary Synchronization Signal, SSS) и канал физический широкополосный канал (Physical Broadcast Channel, PBCH); CSI-RS. Сигналы и канала восходящей линии передачи: восходящий физический широкополосный канал (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH), восходящий физический канал управления (Physical Uplink Control Channel, PUCCH) и PRACH. Оценка пропускной способности и спектральной эффективности системы необходима для определения возможностей 5G NR в условиях спутникового канала передачи.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки применимости 5G NR необходимо реализовать имитационные модели нисходящего и восходящего каналов связи для спутниковых сетей, используя протокол физического уровня 5G NR. Спутниковая линия связи должна быть реализована с помощью модели QuaDRiGa, в которой учитываются: задержка распространения сигнала, затухание, доплеровское смещение частоты, многолучевое распространение сигнала, модели формирования и обработки описанных выше каналов и сигналов 5G NR.

Оценка производительности радиointерфейса для нисходящей (downlink)

и восходящей (uplink) линий передачи данных должна учитывать различные значения параметров радиointерфейса: ширина полосы канала, несущая частота сигнала, нумерология, мощность передачи, индекс сигнально-кодовой конструкции (индекс QAM модуляции и скорость помехоустойчивого кодирования) и др.

В результате имитационного моделирования должны быть получены характеристики помехоустойчивости сигналов, сформированных по стандарту радиосвязи 5G NR в части физического уровня и используемых в спутниковых сетях широкополосного многопользовательского доступа Ku и Ka диапазонов. Разработанную модель необходимо разделить на 3 функциональные части: модель передачи данных в нисходящем канале, модель передачи данных в восходящем канале и модель спутниковой линии связи. Для всех моделей общая структура выполнения должна соответствовать последовательности выполнения следующих шагов:

1. Ввод входных параметров пользователем.
2. Формирование сигнала и распределение в частотно-временном ресурсе (ЧВР).
3. Расчет параметров спутниковой линии связи согласно траектории движения спутника на орбите в модели QuaDRiGa.
4. Выполнение заданного количества итераций.
  - 4.1. Моделирование прохождения сигнала через канал:
    - 4.1.1. Формирование вектора с шумом.
    - 4.1.2. Свертка передаваемого сигнала с импульсной характеристикой (ИХ) канала.
    - 4.1.3. Доплеровское смещение частоты передаваемого сигнала.
    - 4.1.4. Наложение АБГШ на сигнал в канале передачи.
  - 4.2. Расчет ОСШ на входе приемника.
  - 4.3. Прием и декодирование сигнала. Оценка требуемых параметров.
  - 4.4. Расчет BLER.
  - 4.5. Возвращение к п. 4.

### 2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ КАНАЛОВ И СИГНАЛОВ

*Блок синхронизации SSB.* Структурная схема функционального блока модели имитации передачи сигналов синхронизации



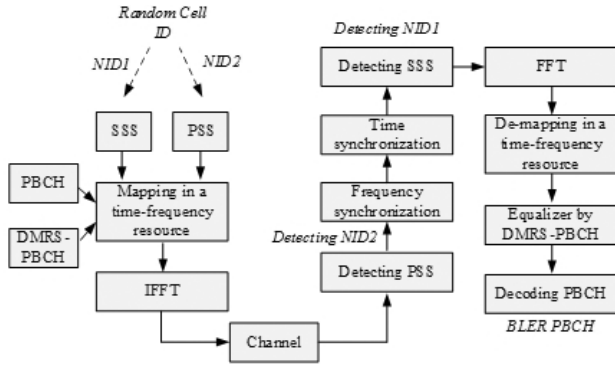


Рис. 1. Структурная схема модели передачи и обработки SBB.

представлена на Рис. 1. Задача модели – оценка вероятности верного декодирования физического идентификатора соты Cell ID, который содержится в сигнале PSS и SSS, а также оценка BLER в канале PBCH. Для формирования и обработки сигналов использованы скрипты из библиотеки MATLAB, внутренние параметры которых предварительно настроены для используемой конфигурации системы. В модели предусмотрена временная и частотная синхронизация по сигналам PSS и SSS вместе с оценкой ошибки синхронизации.

Входные и выходные параметры модели передачи и обработки SBB приведены в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Входные параметры модели передачи и обработки SBB

Входные параметры	Описание
$F_c$	Несущая частота, Гц
$H$	Высота орбиты, км
$G$	Коэффициент усиления приемной антенны, дБ
$T_{sat}$	Индекс точки на траектории спутника
$ItN$	Количество итераций моделирования
$SSC$	Расстояние между поднесущими, Гц
$T_n$	Шумовая температура, К

Таблица 2

Выходные параметры модели передачи и обработки SBB

Выходные параметры	Описание
freqOffset	оценка смещения частоты, Гц
FreqEstimateError	погрешность оценки смещения частоты, Гц
pbchErrorProb	вероятность ошибки декодирования PBCH
CellIDDecodeProb	вероятность верного обнаружения PSS и SSS
SNR	отношение сигнал-шум, дБ

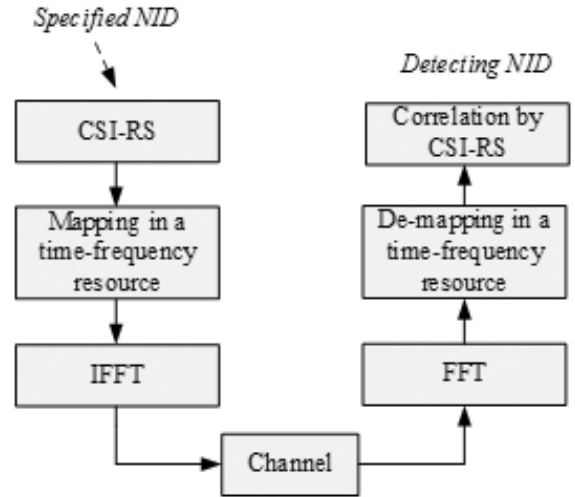


Рис. 2. Структурная схема модели передачи и обработки CSI-RS.

Опорный сигнал CSI-RS. Структурная схема функционального блока модели имитации передачи и обработки опорного сигнала CSI-RS представлена на Рис. 2. Задача модели – оценка вероятности верного детектирования идентификатора NID, который передается в опорном сигнале CSI-RS.

Для формирования и обработки сигналов использованы скрипты из библиотеки MATLAB, внутренние параметры которых предварительно настроены для используемой конфигурации системы.

Входные и выходные параметры модели передачи и обработки CSI-RS приведены в Таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Входные параметры модели передачи и обработки CSI-RS

Входные параметры	Описание
$F_c$	Несущая частота, Гц
$H$	Высота орбиты, км
$G$	Коэффициент усиления приемной антенны, дБ
$T_{sat}$	Индекс точки на траектории спутника
$ItN$	Количество итераций моделирования
$N_{rb}$	Количество ресурсных блоков
$T_n$	Шумовая температура, К

Таблица 4

Выходные параметры модели передачи и обработки CSI-RS

Выходные параметры	Описание
DetectProb	Вероятность верного детектирования параметров CSI-RS
SNR	Отношение сигнал-шум, дБ

*Канал управления PDCCH.* Физический канал управления нисходящим каналом в 5G NR несет информацию управления нисходящей линией. В канале PDCCH для каждого абонентского устройства передаются DCI сообщения, из которых пользователь узнает информацию, необходимую для декодирования широковещательного канала и маппинга полезной информации в восходящем канале PUSCH. PDCCH обладает двумя ключевыми особенностями при формировании: 1) используется ресурсный диапазон для передачи DCI (набор ресурсов управления CORESET); 2) слепое декодирование PDCCH на стороне абонента.

Абонент должен обнаружить DCI, отслеживая CORESET в назначенное время для мониторинга (Monitoring Occasion). Этот процесс реализуется путем выполнения слепого декодирования (Blind Decoding).

Структурная схема модели передачи и обработки PDCCH представлена на Рис. 3. Входные и выходные параметры модели передачи и обработки PDCCH приведены в Таблицах 5 и 6.

*Широковещательный канал PDSCH.* Структурная схема модели передачи и обработки PDSCH представлена на Рис. 4.

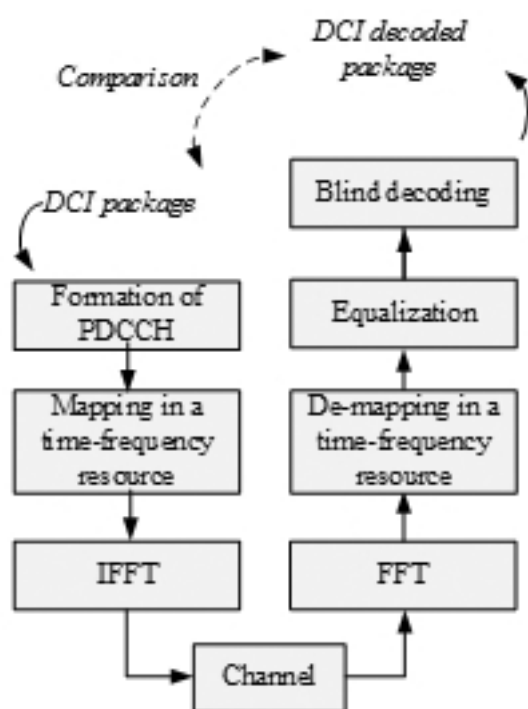


Рис. 3. Структурная схема передачи и обработки PDCCH.

Таблица 5

Входные параметры модели передачи и обработки RDCCN

Входные параметры	Описание
$F_c$	Несущая частота, Гц
$H$	Высота орбиты, км
$G$	Кэффициент усиления приемной антенны, дБ
$T_{sat}$	Индекс точки на траектории спутника
$ItN$	Количество итераций моделирования
$N_{rb}$	Количество ресурсных блоков
$T_n$	Шумовая температура, К
CodeRate	Скорость помехоустойчивого кодирования
dModulation	Тип модуляции

Таблица 6

Выходные параметры модели передачи и обработки PDCCH

Выходные параметры	Описание
DetectProbt	Вероятность верного детектирования параметров CSI-RS
SNR	Отношение сигнал-шум, дБ

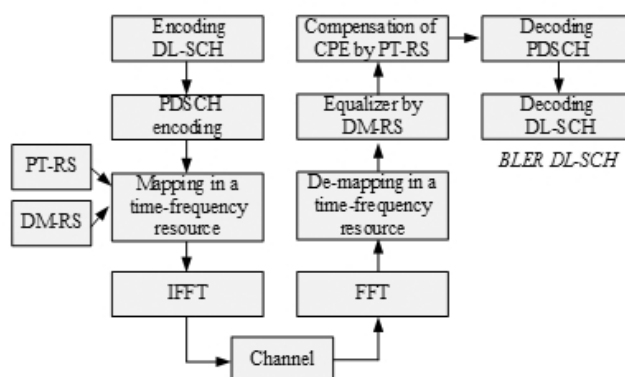


Рис. 4. Структурная схема модели передачи и обработки PDSCH

Данная модель необходима для оценки BLER широковещательного канала PDSCH.

Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PDSCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в Таблицах 5 и 6.

**Каналы и сигналы в восходящей линии**

*Канал случайного доступа PRACH.* Структурная схема модели передачи и обработки канала случайного доступа PRACH представлена на Рис. 5. При формировании канала PRACH на передающей стороне необходимо выбрать индекс псевдослучайной последовательности (ПСП) из доступного банка ПСП. На приемной стороне задача состоит в обнаружении канала PRACH и определении индекса переданной ПСП с помощью корреляционной обработки.

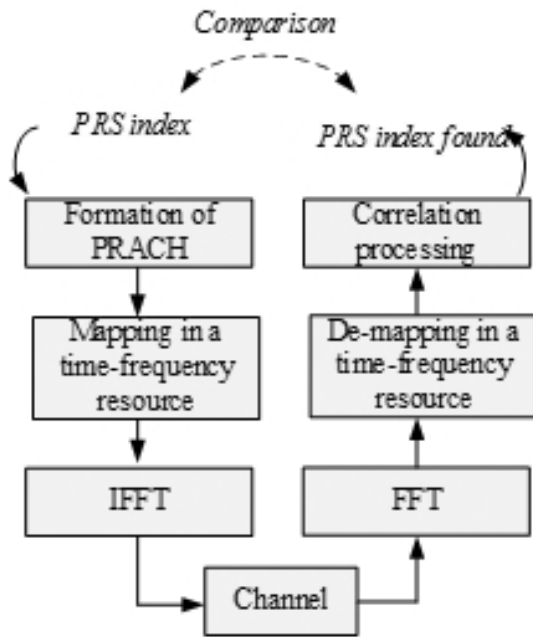


Рис. 5. Структурная схема модели передачи и обработки PRACH.

Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PRACH такие же, как в модели CSI-RS, которые приведены в Таблицах 3 и 4.

**Канал управления PUCCH.** PUCCH – физический канал восходящей линии связи, который переносит информацию управления пользователя (User Control Information, UCI). Так же как DCI передается в PDCCH, UCI передается в PUCCH. Отличие DCI и UCI заключается в том, что UCI может передаваться не только в PUCCH, но и в PUSCH в зависимости от ситуации, тогда как DCI может передаваться только в PDCCH.

Существует 5 различных форматов PUCCH, представленных в Таблице 7, и их выбор обосновывается количеством битов передаваемой информации и длиной символа.

Первым критерием для выбора формата является количество битов UCI. Как видно из Таблицы 7, есть две группы, которые можно выбрать для этого критерия. Если биты UCI

Таблица 7

Форматы PUCCH

Формат	Длина символов	Количество бит	Описание (ts 38.300-5.3.3)
Формат 0	1~2	≤ 2	Короткий PUCCH
Формат 1	4~14	≤ 2	Длинный PUCCH.DMRS
Формат 2	1~2	> 2	Короткий PUCCH
Формат 3	4~14	> 2	Длинный PUCCH.DMRS
Формат 4	4~14	> 2	Длинный PUCCH.DMRS

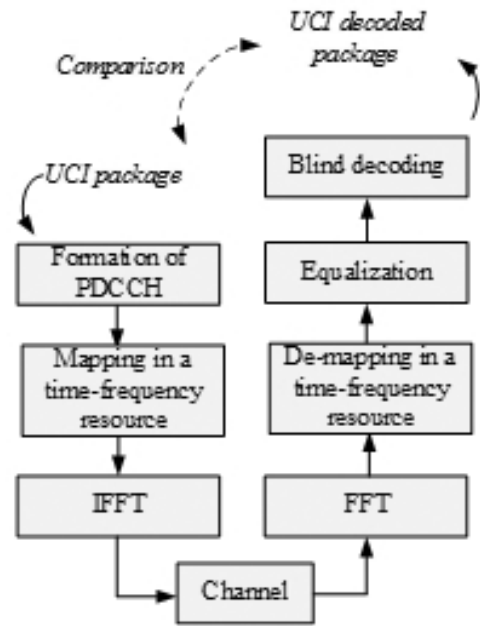


Рис. 6. Структурная схема модели передачи и обработки PUCCH.

равны или меньше 2, можно использовать форматы 0 или 1. Если битов больше 2, можно использовать форматы 2,3,4.

Следующим критерием выбора является возможность мультиплексирования пользователя в тот же PRB. Форматы 0,1,4 допускают мультиплексирование, а форматы 2,3 – не допускают.

Структурная схема модели передачи и обработки канала случайного доступа PUCCH представлена на Рис. 6. Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PUCCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в таблицах 5 и 6.

**Широковещательный канал PUSCH.** На Рис. 7 показана структурная схема модели передачи и обработки канала PUSCH. На выходе модели рассчитывается вероятность блоковой

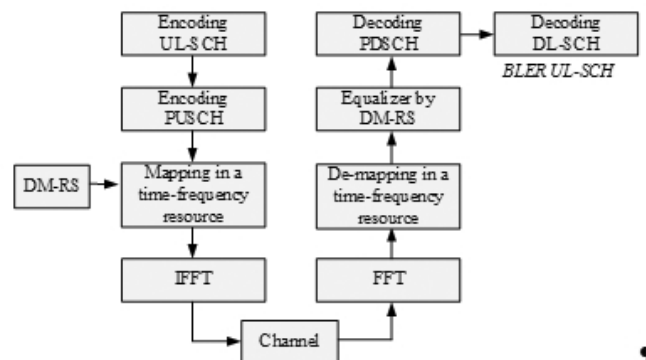


Рис. 7. Структурная схема модели передачи и обработки PUSCH



ошибки данного канала. Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PUSCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в Таблицах 5 и 6.

**2.2. СПУТНИКОВЫЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ**

Расчет характеристик канала выполнялся в универсальном генераторе канальных матриц модели QuaDRiGa, в которой реализована поддержка сценариев Земля-КА. QuaDRiGa – это модель, позволяющая моделировать радиоканалы при различных условиях распространения радиосигнала и их конфигурациях. В рамках исследования модель используется для получения канальных матриц, приближенных к реальности и расчета ослабления сигнала в спутниковом канале распространения КА-UE, в случае, когда UE расположен на поверхности Земли. QuaDRiGa основывается на таких моделях, как WINNER и SCM, с расширением функционала, который позволяет моделировать динамические сценарии. Все возможности модели QuaDRiGa описаны в [9].

Подход QuaDRiGa можно рассматривать как статистическую модель пространственного распределения лучей. В отличие от классического подхода модель не использует геометрическое представление окружающей среды, а распределяет положения рассеивающих кластеров случайным образом.

Описание реализуемого сценария. QuaDRiGa реализован в MATLAB с использованием объектно-ориентированного программирования. Пользовательский интерфейс построен на классах, которыми можно управлять. Каждый класс содержит параметры для хранения данных и методы для управления данными.

Для того чтобы задать сценарий использовались следующие классы и методы QuaDRiGa:

- "qd\_track" описывает траектории движения передающих и принимающих терминалов, характер изменения скорости и сценарий распространения радиоволн;
- "qd\_arrayant" объединяет все функции, необходимые для описания конфигурации антенн;
- "qd\_layout" объединяет траектории пользователей и свойства антенн в общий объект;
- "qd\_channel" содержит итоговые коэффициенты канала для каждого

**Таблица 8**

**Входные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц**

Входные параметры	Описание
az	азимут спутника относительно наземной станции, град
el	угол места спутника относительно наземной станции, град
orbit	высота орбиты спутника над уровнем земли, км
fe	частота сигнала, Гц

описанного сегмента траектории пути. Может формировать матрицу канальных коэффициентов как во временной области, так и в частотной.

Входные параметры модели представлены в **Таблице 8**.

Каждый расчет ослабления и канальной матрицы для определенного положения спутника на орбите относительно наземного терминала задавался статичным сценарием, при котором положение спутника определялось высотой орбиты, азимутом и углом места относительно наземного терминала, расположенного на определенной широте. Перерасчет координат в декартовую систему осуществлялся посредством метода `set_satellite_pos`. Ориентация антенны в пространстве и её направление устанавливалась параметрами, заданными в объекте `track.orientation`. При выполнении расчёта данные параметры задавались таким образом, чтобы и приемная и передающая антенна всегда были направлены друг на друга во всех дискретных точках положения спутника. Посредством класса `qd_arrayant` задавались типы и параметры антенн на приёмной и передающей сторонах. Для спутника была задана параболическая антенна радиусом 3 метра с левой круговой поляризацией (Left-Handed Circular Polarization, LHCP). Для приёмного наземного терминала была задана патч антенна с вертикальной поляризацией и углом раскрытия 90° по азимуту и углу места.

Сценарий распространения радиоволн был выбран `QuaDRiGa_NTN_Urban_LOS`, который соответствует случаю при расположении наземного терминала в городской среде и наличии прямой видимости между спутником и терминалом. Полное описание сценариев для спутников приведены в 3GPP TR 38.811.

Таблица 9

Выходные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц

Выходные параметры	Описание
attenuation	ослабление сигнала, дБ
h_channel	отсчеты ИХ спутникового канала передачи
beam_delay	задержки лучей, с

Расчет канальных матриц и ослаблений выполнялся в классе `qd_channel`, исходя из заданных позиций спутника, наземного терминала и частоты сигнала. Остальные параметры были взяты по умолчанию. Выходные параметры модели представлены в **Таблице 9**.

После создания сценария и добавления в него спутника и наземной станции выполняются следующие расчеты:

- 1) Определяется наличие спутника в видимости наземной станции, все последующие расчеты выполняются только при выполнении этого условия.
- 2) Рассчитываются азимут, угол места и расстояние спутника относительно наземной станции.
- 3) Используя значение расстояния от наземной станции до спутника, рассчитывается задержка.
- 4) Рассчитать ускорение спутника относительно местной системы координат: север, восток, вниз (North, East, Down, NED).
- 5) По значению угла азимута и места рассчитывается направление расположения наземной станции относительно спутника.
- 6) Используя направление и ускорение спутника относительно NED, рассчитывается его ускорение по линии связи между спутником и наземной станцией.
- 7) Используя ускорение относительно наземной станции, рассчитывается сдвиг частоты из-за эффекта Доплера.
- 8) С помощью разработанной имитационной модели проведено модельное исследование и оценка основных характеристик системы.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Это исследование предполагает успешную синхронизацию между UE и спутником. Поэтому здесь мы приводим результаты исследования вероятности корректного приема описанных каналов и сигналов в условиях спутникового канала. Также представлены результаты расчета производительности системы в заданных условиях.

Таблица 10

Основные параметры моделируемой системы

Параметр	Нисходящий канал	Восходящий канал
$f_0$ , ГГц	12,6 / 20,1	14,45 / 29,95
Дуплекс	FDD	FDD
$B$ , МГц	50, 100, 200	50, 100
$\Delta f$	120, 240 (for SSB)	120
$H$ , км	500, 1000	500, 1000
Параметр	600	800
$T_n$ , К	-51 (500 km) -45 (1000 km)	-48
$P_f$	29	26

### 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ

С помощью разработанной имитационной модели произведено модельное исследование и оценка основных характеристик системы. В **Таблице 10** приведены основные параметры системы, где  $f_0$  – несущая частота,  $B$  – полоса сигнала,  $\Delta f$  – расстояние между поднесущими,  $H$  – высота орбиты,  $T_n$  – шумовая температура,  $P_f$  – эффективная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ).

Оценка вероятности верного декодирования PRACH. В **Таблице 11** представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 11

Конфигурация системы для декодирования PRACH

Параметр	Значение
$H$ , км	500
$f_0$ , ГГц	14.45
$B$ , МГц	100
$\Delta f$ , кГц	120
$ltN$	50
$P_f$ , дБ ВТ/Гц	-58...-78

На **Рис. 8** приведена зависимость вероятности верного декодирования параметров сигнала PRACH в зависимости от

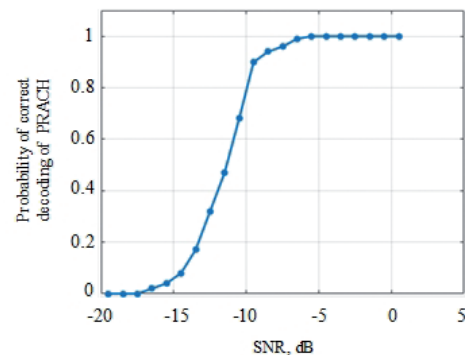


Рис. 8. Зависимость вероятности верного декодирования PRACH от ОСИИ.

Таблица 12

Численные значения вероятности верного декодирования PRACH

$P$	0	0	0	0.02	0.04	0.08	0.17	0.32	0.47
$W$ , dB	-19.49	-18.49	-17.49	-16.49	-15.49	-14.49	-13.49	-12.49	-11.49
$P$	0.68	0.90	0.94	0.96	0.99	1	1	1	1
$W$ , dB	-10.49	-9.49	-8.49	-7.49	-6.49	-5.49	-4.49	-3.49	-2.49
$P$	1	1	1	-	-	-	-	-	-
$W$ , dB	-1.49	-0.49	-0.59	-	-	-	-	-	-

ОСШ в спутниковой линии связи. Предполагается, что абонентская станция устраняет смещение частоты и осуществляет частотную синхронизацию. Для достоверности результатов при передаче как PRACH, так и остальных каналов, ошибка частотной синхронизации внесена преднамеренно, а дисперсия ошибки зависит от ОСШ. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PRACH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 12. На рис. 9 показано расположение PRACH в частотно-временном ресурсе PRACH в частотно-временном ресурсе. Уверенный прием и декодирование PRACH обеспечивается при SNR выше -5 дБ. Пропускная способность системы не влияет на результат обработки PRACH.

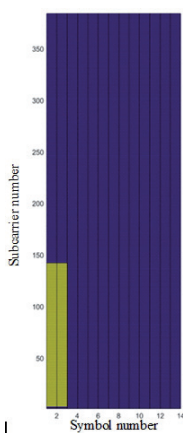


Рис. 9. Расположение PRACH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности верного декодирования CSI-RS. В Таблице 13 представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 13

Конфигурация системы для декодирования CSI-RS

Параметр	Значение
$H$ , км	1000
$f_0$ , ГГц	12.6
$B$ , МГц	50
$\Delta f$ , кГц	120
$l_{tN}$	100
$P_r$ , дБ Вт/Гц	-51...-76

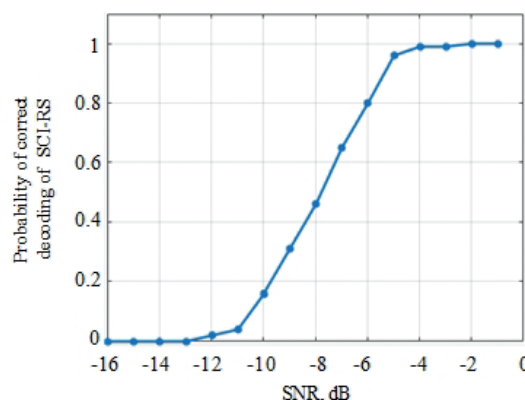


Рис. 10. Зависимость вероятности корректной синхронизации от ОСШ.

На Рис. 10 приведена зависимость вероятности верного декодирования параметров сигнала CSI-RS в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. При моделировании через спутниковую линию связи передавался один под-кадр, содержащий сигнал CSI-RS. Расположение CSI-RS в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 11.

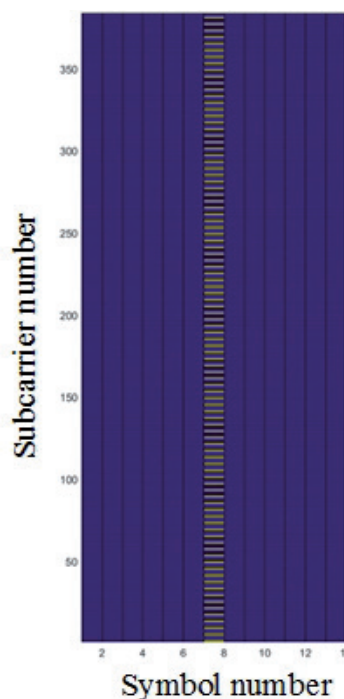


Рис. 11. Расположение CSI-RS в частотно-временном ресурсе подкадра.



Таблица 14

Численные значения вероятности верного декодирования CSI-RS

$P$	0	0	0	0.02	0.04	0.08	0.16	0.31	0.46
$W$ , dB	-15.97	-14.97	-13.97	-12.97	-11.97	-10.97	-9.97	-8.97	-7.97
$P$	0.65	0.80	0.96	0.99	1	1	1	-	-
$W$ , dB	-6.97	-5.97	-4.97	-3.97	-2.97	-1.97	-0.97	-	--

Table 15

Конфигурация системы для каналов PDCCH и PUCCH

Параметр	Значение	
	PDCCH	PUCCH
$H$ , km	1000	500
$f_0$ , GHz	12.6	14.45
$B$ , MHz	50	50
$\Delta f$ , kHz	120	120
$l/N$	100	300
$P_p$ , dBW/H	-51...-75	-43...-63

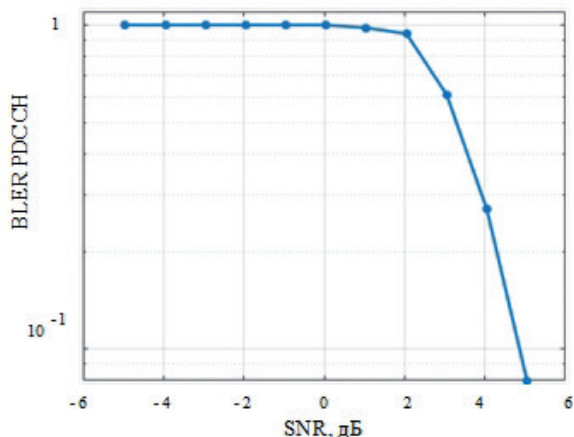


Рис. 12. Зависимость BLER от ОСШ в канале PDCCH.

Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала CSI-RS в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 14. Видно, что при ОСШ выше -4 дБ обеспечивается уверенная обработка сигнала.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PDCCH и PUCCH. В Таблице 15 представлены параметры конфигурации системы. На Рис. 12 приведена зависимость BLER канала PDCCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи.

Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDCCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 16.

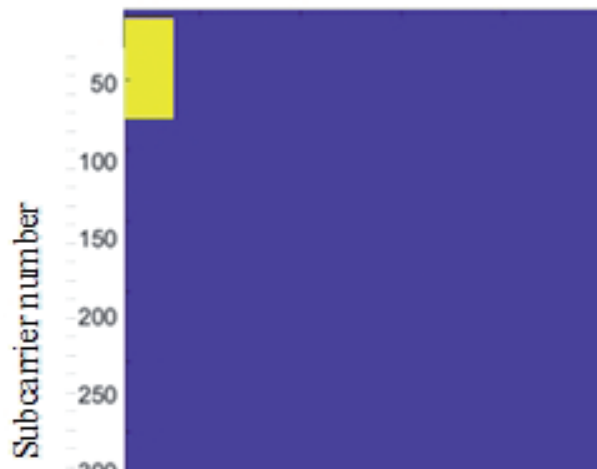


Рис. 13. Расположение данных PDCCH.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один подкадр, содержащий канал PDCCH. Расположение PDCCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 13.

На Рис. 14 приведена зависимость BLER канала PUCCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PUCCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 17.

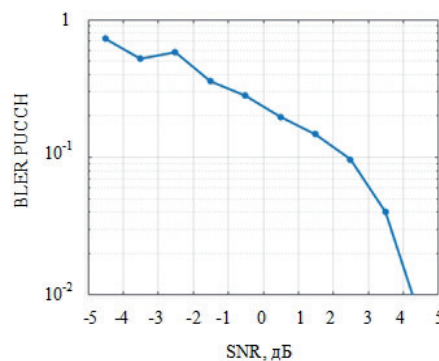


Рис. 14. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUCCH.

Таблица 16

Численные значения BLER PDCCH

$BLER$	1	1	1	1	1	1	0.98	0.94	0.61
$W$ , dB	-4.95	-3.95	-2.95	-1.95	-0.95	0.05	1.05	2.05	3.05
$BLER$	0.27	0.08	0	0	0	0	0	-	-
$W$ , dB	4.05	5.05	6.05	7.05	8.05	9.05	10.05	-	--

Table 17

Численные значения BLER PDCCH

BLER	0.72	0.52	0.58	0.35	0.28	0.19	0.14	0.09	0.04
W, dB	-4.51	-3.51	-2.51	-1.51	-0.51	0.48	1.48	2.48	3.48
BLER	0	0.08	0	0	0	0	0	-	-
W, dB	4.48	5.48	6.48	7.48	8.48	9.48	10.05	-	--

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один подкадр, содержащий канал PUSCH. Расположение PUSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 15.

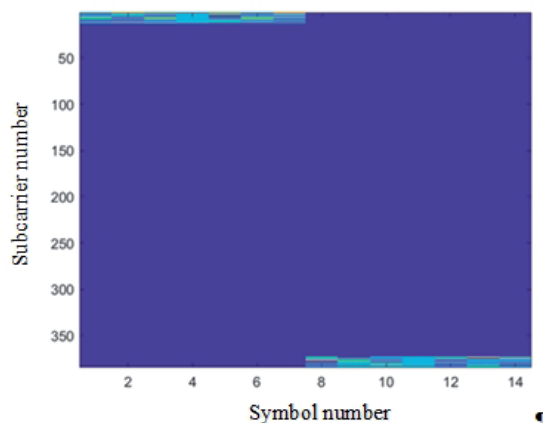


Рис. 15. Расположение данных PUSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PDSCH и PUSCH. В Таблице 18 представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 18

Конфигурация системы для каналов PDSCH и PUSCH

Параметр	Значение	
	PDCCH	PUSCH
H, km	500	500
f <sub>0</sub> , GHz	12.6	14.45
B, MHz	50	50
Δf, kHz	120	120
ltN	100	300
P <sub>f</sub> , dBW/H	-51...-59	-48...-56

На Рис. 16 приведена зависимость BLER канала PDSCH в зависимости от ОСИ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDSCH в зависимости от ОСИ приведены в Таблице 19.

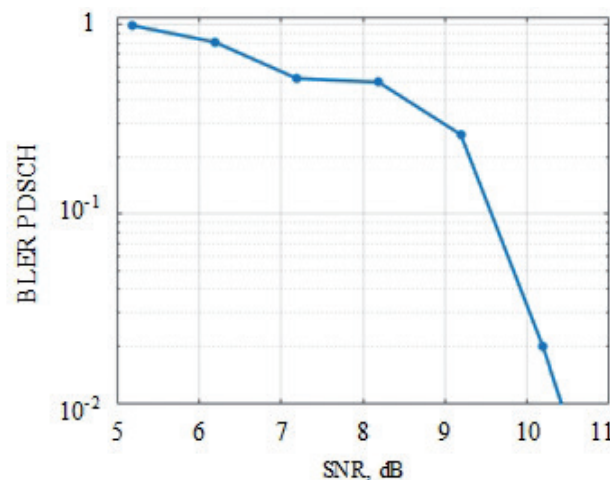


Рис. 16. Зависимость BLER от ОСИ в канале PDSCH.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один слот, содержащий канал PDSCH. Размер транспортного блока 9480 бит. Сигнально-кодовая конструкция QAM-16 и код с малой плотностью проверок на четность (Low-density parity-check code, LDPC-code) – 490/1024. Расположение PDSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 17.

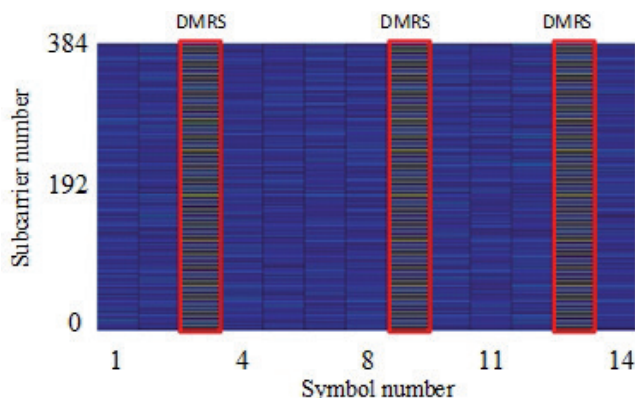


Рис. 17. Расположение данных PDSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Таблица 19

Численные значения BLER PDSCH

BLER	0.99	0.81	0.52	0.49	0.26	0.02	0.001	0	0
W, dB	5.19	6.19	7.19	8.19	9.19	10.19	11.19	12.19	13.19

Таблица 20

Численные значения BLER PUSCH

BLER	1	1	1	1	1	1	0.65	0.018	0
W, dB	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	7.20	8.20	9.20	10.20

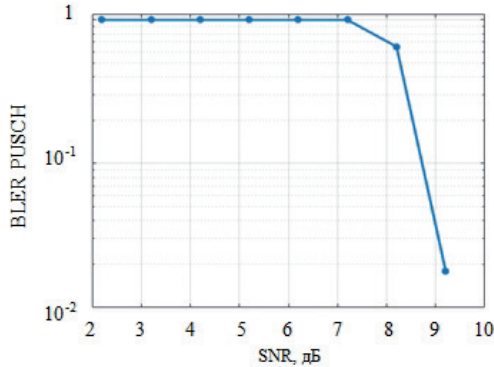


Рис. 18. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUSCH.

На Рис. 18 приведена зависимость BLER канала PUSCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDSCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 20.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один слот, содержащий канал PUSCH. Размер транспортного блока 8712 бит. Сигнально-кодовая конструкция QAM-16 и 490/1024 LDPC. Расположение PUSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 19.

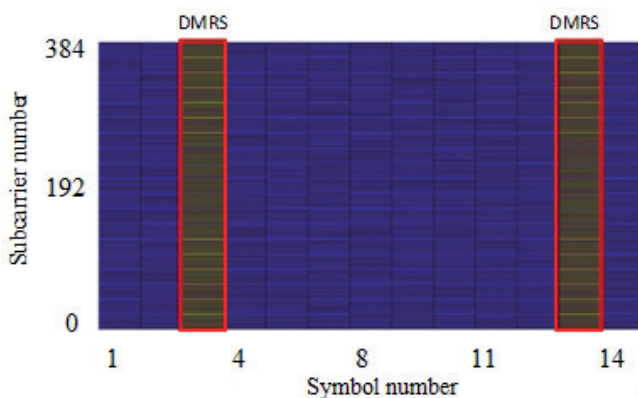


Рис. 19. Расположение данных PUSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PUSCH. В Таблице 21 представлены параметры конфигурации системы.

На Рис. 20 приведена зависимость BLER в канале PUSCH от ОСШ в спутниковой линии связи в условиях Доплеровского смещения частоты в 60.22 кГц.

Частотно-временное расположение PUSCH внутри SSB представлено на Рис. 21. Численные значения BLER для канала PUSCH приведены в Таблице 22.

Таблица 21

Конфигурация системы для канала PUSCH

Parameter	Value
H, km	1000
$f_0$ , GHz	12.6
B, MHz	50
$\Delta f$ , kHz	120
$l/N$	100
$P_p$ , dBW/H	-46...-76

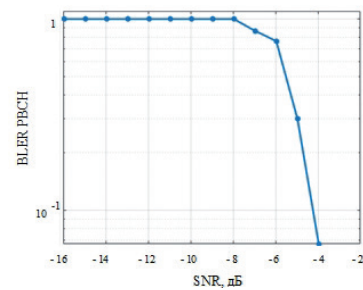


Рис. 20. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUSCH.

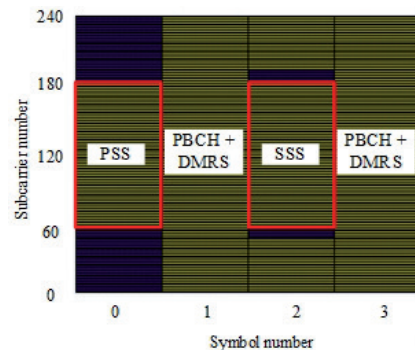


Рис. 21. Частотно-временное расположение PUSCH внутри SSB.

При моделировании PUSCH через спутниковую линию связи передавался блок синхронизации (SSB), содержащий канал PUSCH. Размер транспортного блока 32 бита.

### 3.2 ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Скорость передачи данных в соответствии с стандартом может быть рассчитана с помощью формулы:

$$C = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left[ n_{beams}^{(j)} v_{layers}^{(j)} Q_m^{(j)} f^{(j)} R \frac{12N_{RB}^{(j),\mu}}{T_s^\mu} (1 - OH^{(j)}) \right], \quad (1)$$

где  $J$  – количество агрегированных поднесущих;  $R$  – скорость помехоустойчивого кодирования;  $n_{beams}^{(j)}$  – количество пространственных лучей;  $v_{layers}^{(j)}$  – количество мультиплексируемых слоев MIMO;  $Q_m^{(j)}$  – количество бит в одном символе QAM модуляции;  $f^{(j)}$  – масштабирующий фактор;



Таблица 22

Численные значения BLER от ОСШ в канале РВСН

BLER	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W, dB	-15.96	-14.96	-13.96	-12.96	-11.96	-10.96	-9.96	-8.96	-7.96
BLER	0.866	0.766	0.300	0.0667	0	0	0	0	0
W, dB	-6.96	-5.96	-4.96	-3.96	-2.96	-1.96	-0.96	0.03	1.03
BLER	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W, dB	2.03	3.03	4.03	5.03	6.03	7.03	8.03	9.03	10.03
BLER	0	0	0	0	-	-	-	-	-
W, dB	11.03	12.03	13.03	14.03	-	-	-	-	-

$\mu$  – нумерология, определяющая частотный разнос поднесущих  $\Delta f = 2^\mu \cdot 15$  кГц;  $T_s^\mu$  – длительность OFDM символа, которая может быть получена по формуле  $T_s^\mu = 10^{-3} / (14 \cdot 2^\mu)$ ;  $N_{RB}^{(j),\mu}$  – количество ресурсных блоков в полосе пропускания;  $OH^{(j)}$  – накладные расходы передачи служебной информации.

В рамках рассматриваемой системы следует принять следующие параметры:  $J = 1$ ,  $v_{layers}^{(j)} = 1$ ,  $f^{(j)} = 1$ ,  $n_{beams}^{(j)} = 1$ ,  $\mu = 3$ ,  $OH^{(j)} = 0.18$  (для нисходящего канала) и  $OH^{(j)} = 0.1$  (для восходящего канала),  $T_s^\mu = 8.9286 \cdot 10^{-6}$ .

Учитывая принятые значения параметров, формула (1) для нисходящего канала примет следующий вид:

$$C = 0.82 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}} \quad (2)$$

и для восходящего канала:

$$C = 0.9 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

Тогда, чтобы рассчитать скорость передачи данных необходимо использовать формулы (2, 3), зная параметры  $Q$ ,  $R$ ,  $N_{RB}$ . В свою очередь, параметры  $Q$ ,  $R$  определяются выбранной для передачи сигнально-кодовой конструкцией (СКК), описанных в таблицах 5.1.3.1-1 – 5.1.3.1-3 [10].

Пропуская способность показывает предельную скорость передачи данных, которая может быть достигнута в канале передачи. Пропускная способность для  $N_{RB}$  ресурсных блоков может быть рассчитана по формулам (2, 3), принимая максимальные значения  $Q = 8$  (для QAM-256) и  $R = 948/1024$ , соответственно:

$$C = 6.0731 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}}, \quad (4)$$

для нисходящего канала и

$$C = 6.6656 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}}, \quad (5)$$

для восходящего канала.

Расчетная пропускная способность приведена в **Таблице 23**.

Спектральная эффективность системы напрямую определяется спектральной

Таблица 23

Расчетная пропускная способность

Нисходящий канал			
Полоса, МГц	50	100	200
C, мбит/с	260.11	520.23	1040.47
Восходящий канал			
Полоса, МГц	50	100	-
C, мбит/с	280.66	570.33	-

эффективностью используемой сигнально-кодовой конструкцией, которая выбрана для передачи данных. В современных системах используется принцип адаптивного выбора СКК, позволяющий приспособиться к условиям канала распространения и выбирать СКК с наибольшей спектральной эффективностью, сохраняя при этом требуемый уровень вероятности битовых ошибок при приеме. Как правило, для каждой конкретной системы связи набор доступных СКК формируется исходя из предполагаемых эксплуатационных сценариев и рабочего диапазона ОСШ. Все доступные СКК описаны в стандарте конкретной системы связи, а каждая из них определена типом модуляции, скоростью и методом помехоустойчивого кодирования.

В 5G NR предусмотрено 28 различных СКК, которые приведены в технической спецификации. Всего предусмотрено несколько таблиц СКК, а тип таблицы определяется конфигурацией системы.

В качестве примера можно рассмотреть первую таблицу 5.1.3.1-1 [10]. На **Рис. 22** представлена зависимость спектральной эффективности от ОСШ при адаптивном выборе СКК.

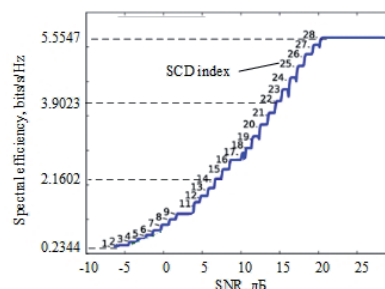
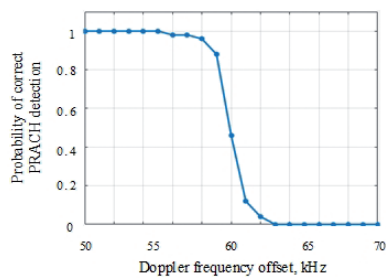


Рис. 22. Зависимость спектральной эффективности от ОСШ.



**Рис. 23.** Зависимость вероятности верного детектирования канала PRACH от доплеровского смещения частоты.

Спектральная эффективность может быть получена по значению пропускной способности из Таблицы 23. Спектральная эффективность в нисходящем канале достигает 5.2 бит/с/Гц и в восходящем канале 5.61 бит/с/Гц.

### 3.3 EFFECT OF DOPPLER FREQUENCY OFFSET ON SIGNAL PROCESSING

На **Рис. 23** показана зависимость вероятности верного детектирования канала PRACH от доплеровского смещения частоты в восходящей линии связи при отношении сигнал-шум 6.65 дБ. При смещении частоты, превышающем половину частотного разнеса поднесущих (60 кГц), невозможно осуществить корректный прием PRACH.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5G NR в части физического уровня может быть использован в спутниковых сетях широкополосного многопользовательского доступа Ku и Ka диапазонов. Для этого необходимо обеспечить отношение сигнал/шум на входе демодулятора приемного устройства не менее минус 5 дБ при опорном уровне BLER > 10%. Максимальная производительность системы достигается при ОСИШ более 20 дБ.

5G NR не применим к ССС с доплеровским смещением несущей частоты более 60 кГц.

В модели не рассмотрен эффект доплеровского рассеяния, который может существенно повлиять на нарушение ортогональности поднесущих и ухудшить прием сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cassiau N, Maret L, Dore J-B, Savin V, Ktenas D. Assessment of 5G NR physical layer for future satellite networks. *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. IEEE Xplore*, 2018, pp. 1020-1024; doi: 10.1109/GlobalSIP.2018.8646358.
2. Völk F, Schwarz RT, Knopp A. Field Trial on 5G New Radio Over Satellite. *Frontiers in Communications and Networks*, 2021, 2:1-10; doi: 10.3389/frcmn.2021.673534.
3. Saarnisaari H, de Lima C. Application of 5G new radio for satellite links with low peak-to-average power ratios. *International Journal of Satellite*

*Communications and Networking*, 2021, 39:445-454; doi: 10.1002/sat.1378.

4. Dahlman E, Parkvall S, Skold J. *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
5. Saarnisaari H, de Lima CM. Integrating 5G NR and satellites systems: Main features needed changes and performance results. *IJSCN Special Issue "Satellite Networks Integration with 5G"*, 2020.
6. Saarnisaari H, de Lima CM. 5G NR over satellite links: Evaluation of synchronization and random access processes. *Proc. 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2019, pp. 1-4.
7. Saarnisaari H, de Lima CM. 5G new radio in SatCom: an overview of physical and medium access layer issues. *Proc. 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, pp. 1-4.
8. 3GPP, "Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces", *3GPP, Tech. Rep. 38.801 (Version 14)*, March 2017.
9. QuaDRiGa: The Next Generation Radio Channel Model. Retrieved from <https://quadriga-channel-model.de/>.
10. ETSI TS 38.214 V15.3.0. 5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.3.0 Release 15), 2018.

**Рогожников Евгений Васильевич**

*к.т.н., доцент*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru)

**Дмитриев Эдгар Михайлович**

*ассистент*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [edegor1993@mail.ru](mailto:edegor1993@mail.ru)

**Кондрашов Данила Александрович**

*аспирант*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [danila.a.kondrashov@tusur.ru](mailto:danila.a.kondrashov@tusur.ru)

**Крюков Яков Владимирович**

*к.т.н., доцент*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [iakov.v.kriukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kriukov@tusur.ru)

**Коновальчиков Артем Владимирович**

*аспирант*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [artem.konovalchikov@tusur.ru](mailto:artem.konovalchikov@tusur.ru)

**Мухамадиев Семен Минисович**

*магистрант*

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники  
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия

E-mail: [sema.fandmc3@mail.ru](mailto:sema.fandmc3@mail.ru)

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.157

## Проблемы управления данными и решения в облачных средах

<sup>1</sup>Намир Хашим Касим, <sup>2</sup>Наталия Боднар, <sup>3</sup>Хайдер Махмуд Салман, <sup>4</sup>Салама

Идрис Мустафа, <sup>1</sup>Фахер Рахим

<sup>1</sup>Университет Джихан-Сулеймания, <https://suliciban.edu.krd/>  
Сулеймания 46001, Курдистан, Ирак

<sup>2</sup>Университетский колледж Аль-Рафидайн, <https://ruc.edu.iq/>  
Багдад 10064, Ирак

<sup>3</sup>Университетский колледж Аль-Турат, <https://turath.edu.iq/>  
Багдад 10013, Ирак

<sup>4</sup>Университетский колледж Аль-Нуор, <https://alnoor.edu.iq/>  
Ниневия 41012, Ирак

*E-mail: rabim.fakher@suliciban.edu.krd, nameer.qasim@suliciban.edu.krd, natalia.bodnar@ruc.edu.iq, haider.mahmood@turath.edu.iq, salama.idris@alnoor.edu.iq*

*Поступила 06.11.2023, рецензирована 13.11.2023, принята 20.11.2023, опубликована 15.03.2024.*

*Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым*

**Аннотация:** Обсуждаются трудности управления динамическими данными, возникающие в облачных средах, и рассматриваются новые подходы к решению этих проблем. Проведено исследование литературы, включая тематические исследования и мнения отраслевых экспертов. Результаты исследования выявили серьезные препятствия в управлении данными, включая проблемы, связанные с безопасностью данных, соблюдением требований конфиденциальности данных, сложности, связанные с передачей данных, а также риск привязки к поставщику. Предложены различные подходы для решения проблем - методологии шифрования, системы обеспечения соответствия, методы передачи данных и мультиоблачные среды. Внедрение эффективных методов управления данными имеет первостепенное значение для использования возможностей облачных вычислений, а также для соблюдения мер безопасности данных и соблюдения требований.

**Ключевые слова:** управление данными; облачные вычисления; безопасность данных; конфиденциальность данных; интеграция данных; масштабируемость; перенос данных; привязка к поставщику; мультиоблачное внедрение

УДК 004.41

*Для цитирования:* Намер Хашим Касим, Наталия Боднар, Хайдер Махмуд Салман, Салама Идрис Мустафа, Фахер Рахим. Проблемы управления данными и решения в облачных средах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(1):157-170. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.157.

## Data Management Challenges and Solutions in Cloud-Based Environments

Nameer Hashim Qasim, Fakher Rahim

Cihan University-Sulaimaniya, <https://suliciban.edu.krd/>  
Sulaimaniya 46001, Iraq

*E-mail: rabim.fakher@suliciban.edu.krd, nameer.qasim@suliciban.edu.krd*

Nataliia Bodnar

Al-Rafidain University College, <https://ruc.edu.iq/>  
Baghdad 10064, Iraq

*E-mail: natalia.bodnar@ruc.edu.iq*



**Hayder Mahmood Salman**

Al-Turath University College, <https://turath.edu.iq/>  
Baghdad 10013, Iraq

E-mail: [haidar.mahmood@turath.edu.iq](mailto:haidar.mahmood@turath.edu.iq)

**Salama Idris Mustafa**

Al-Noor University College, <https://alnoor.edu.iq/>  
Nineveh 41012, Iraq

E-mail: [salama.idris@alnoor.edu.iq](mailto:salama.idris@alnoor.edu.iq)

Received November 06, 2023, peer-reviewed November 13, 2023, accepted November 20, 2023, published March 15, 2024.

**Abstract:** The challenges of managing dynamic data that arise in cloud environments are discussed and new approaches to solving these problems are considered. Literature research was conducted, including case studies and opinions from industry experts. The study findings identified significant barriers to data management, including issues related to data security, data privacy compliance, data transfer challenges, and the risk of vendor lock-in. Various approaches have been proposed to solve problems - encryption methodologies, compliance systems, data transfer methods and multi-cloud environments. Implementing effective data management practices is paramount to harnessing the power of cloud computing while also maintaining data security and compliance measures.

**Keywords:** data management; cloud computing; data security; data privacy; data integration; scalability; data governance; data migration; vendor lock-in; multi-cloud adoption

UDC 004.41

**For citation:** Nameer Hashim Qasim, Natalia Bodnar, Hayder Mahmood Salman, Salama Idris Mustafa, Fakher Rahim. Data Management Challenges and Solutions in Cloud-Based Environments. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):157-170e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.157.

**СОДЕРЖАНИЕ****1. ВВЕДЕНИЕ (158)****1.1 ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ (160)****1.2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (160)****2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ (160)****3. МЕТОДОЛОГИЯ (162)****3.1. ГИПОТЕЗА (162)****3.2. ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ (162)****3.2.1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ (162)****3.2.2 СБОР ДАННЫХ (162)****3.2.3 КЛАССИФИКАЦИЯ ДАННЫХ (162)****3.2.4 КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ (162)****3.3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ КОНКРЕТНЫХ ЗАДАЧ (163)****3.3.1. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ДАННЫХ (163)****3.3.2. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ (163)****3.3.3. УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ (163)****3.3.4. ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ (163)****3.3.5. УСЛУГИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ (163)****3.3.6. АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПИСЯМИ (163)****3.3.7. УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ****РЕСУРСАМИ (163)****3.3.8. ИНТЕГРАЦИЯ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ СБОРА И ОБЛАЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (163)****3.3.9. ЗАЩИТА ДАННЫХ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ (164)****4. РЕЗУЛЬТАТЫ (164)****4.1. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ (164)****4.2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ В ЛИТЕРАТУРЕ (165)****4.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ (165)****4.4. КОРРЕЛЯЦИИ И ПРОБЕЛЫ (166)****5. ОБСУЖДЕНИЕ (167)****6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (168)****ЛИТЕРАТУРА (169)****1. ВВЕДЕНИЕ**

Повсеместное распространение данных стало определяющей характеристикой современной цивилизации в эпоху цифровых технологий. Каждый день создается, собирается и хранится

значительный объем данных в нескольких областях, включая здравоохранение и геопространственные науки. Появление облачных вычислений предоставило уникальную возможность эффективно и результативно использовать и контролировать постоянно растущий объем данных. Тем не менее, растущие объемы, скорость и разнообразие данных создают серьезные проблемы при управлении ими внутри облачных платформ. В этой статье исследуется сложная область трудностей управления данными и представлены новые решения в рамках облачных вычислений.

Важность решения проблем управления данными в облаке невозможно переоценить. Развитие облачных технологий облегчило возможность как предприятиям, так и людям расширять свои возможности для динамического хранения и обработки данных. Облачные сервисы предоставляют ряд преимуществ, включая гибкость, экономичность и доступность, что делает их незаменимыми инструментами для многих приложений в академических кругах, промышленности и науке.

В контексте нашего исследования сложностей и решений, связанных с управлением данными в облачных средах, важно учитывать современные достижения и знания, полученные в этой дисциплине. На этой странице использованы исследования нескольких авторов, чей вклад значительно расширил наше понимание этой сложной области. Примечательно, что исследование, проведенное авторами [1], изучало управление и обмен важной информацией во время пандемии COVID-19, подчеркивая важность эффективного управления данными во время кризиса. Авторы в [2] обратились к проблеме интеграции данных и определения местоположения реплик в географически рассредоточенных облачных средах. Их работа дает ценные перспективы повышения эффективности услуг, которые в значительной степени зависят от обработки данных. В своем исследовании авторы [3] исследовали управление гетерогенными хранилищами данных в облачных вычислениях, уделяя особое внимание реализации методов дедупликации. Авторы предложили несколько решений

для повышения эффективности данных и минимизации избыточности в облачной среде. Авторы [4] провели обширное исследование подходов к управлению ресурсами в облачных вычислениях, предложив хороший обзор нынешнего состояния этой области. В своем исследовании авторы [5] представили ориентированную на пользователя точку зрения на будущие облачные сервисы для данных Большой Земли [6]. Они подчеркнули растущее значение облачных решений для эффективного управления обширными географическими данными. Авторы внесли значительный вклад в системы обслуживания в реальном времени в облаке, подчеркнув практические последствия использования облачных решений [7] для предоставления своевременных и оперативных услуг. Совместные усилия этих экспертов обеспечивают фундаментальную основу для нашего анализа трудностей и решений управления данными в облачных контекстах [8].

В статье обсуждается несколько проблем, возникающих при управлении данными в облачных средах. Анализ начинается с решения основных проблем хранения, поиска и защиты данных. После этого в обсуждении рассматриваются сложности, связанные с дедупликацией данных и управлением ресурсами [9], которые являются важнейшими компонентами оптимизации эффективности данных в облачных вычислениях. Кроме того, в документе углубляется в развивающуюся область облачных сервисов для геопространственных данных и приложений реального времени, подчеркивая их потенциал, способный привести к значительным изменениям.

В этом исследовании мы хотим всесторонне изучить сложные препятствия, с которыми сталкиваются профессионалы и ученые, представляя новые подходы и тактики для эффективного преодоления этих проблем. В этой статье делается попытка осветить динамическую природу управления данными в облачных системах путем использования коллективных знаний академического сообщества и интеграции практических примеров. Таким образом, наши усилия направлены на предоставление соответствующих точек зрения и рекомендаций профессионалам, ученым и политикам,

занимающимся облачными вычислениями, наукой о данных и информационными технологиями.

### 1.1 Цели исследования

Основная цель статьи – изучить сложные трудности, связанные с управлением данными на облачных платформах. Проведя методический анализ этих препятствий, наша цель состоит в том, чтобы всесторонне понять важные проблемы, с которыми сталкиваются предприятия, ученые и практики, когда дело доходит до эффективного управления и использования данных в облачной парадигме.

Исследование направлено на разъяснение новых и прагматичных подходов к преодолению этих препятствий. Используя объединенные знания и опыт научного сообщества, а также практические иллюстрации из реальных сценариев, цель состоит в том, чтобы предоставить ценное хранилище информации для тех, кто занимается разработкой политики и научным подходом в областях, связанных с облачными вычислениями, данными науки и информационными технологиями.

Основная цель нашего исследования – внести ценный вклад в существующий массив знаний по управлению данными в облачных средах. Цель состоит в том, чтобы способствовать более полному пониманию меняющейся ситуации и предложить практические рекомендации по повышению эффективности, безопасности и доступности данных в рамках облачных вычислений.

### 1.2 Постановка задачи

Оперативное распространение данных и широкое внедрение технологий облачных вычислений открыли новую эпоху в управлении данными. Однако эти достижения одновременно создали множество препятствий, которые требуют скорейшего рассмотрения. Актуальность проблем, связанных с безопасностью, доступностью, избыточностью и эффективностью данных, возросла, поскольку предприятия и люди все больше зависят от облачных сред для хранения, обработки и извлечения своих данных. Одной из главных задач в облачном управлении данными является обеспечение

безопасного хранения и передачи конфиденциальной информации, особенно в свете постоянно меняющегося ландшафта угроз кибербезопасности. Кроме того, значительную трудность представляет оптимизация хранения данных для уменьшения избыточности и повышения доступности и эффективности поиска. Более того, с постоянным расширением облачных сервисов растет потребность в обслуживании услуг с интенсивным использованием данных и эффективном удовлетворении потребностей в режиме реального времени.

Чтобы успешно решить эти проблемы, крайне важно изучить новые технологии и тактики, которые могут улучшить управление данными в облачных средах. Целью данной работы является анализ сложных проблем и предоставление практических решений для создания более эффективной, безопасной и надежной экосистемы данных в облаке.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Облачные вычисления привели к значительным изменениям в управлении данными, предоставив предприятиям в нескольких секторах масштабируемые и экономичные решения. Тем не менее, это изменение парадигмы создало препятствия и возможности в управлении данными на облачных платформах. Настоящий обзор литературы направлен на интеграцию и оценку предыдущих исследований, чтобы дать представление об основных препятствиях и новых подходах в этой динамичной области.

Сохранение безопасности и конфиденциальности имеет первостепенное значение в сфере облачного управления данными. Гао и др. [1] подчеркивают необходимость безопасного управления данными, особенно касающимися конфиденциальных материалов о пандемии COVID-19. Подчеркивается важность внедрения надежных систем обмена данными и мер контроля доступа для защиты конфиденциальных данных.

В своем исследовании Атри и др. [2] предоставили комплексную методологию стратегического распределения данных и реплик между географически распределенными облачными средами. Исследование автора



сосредоточено на оптимизации распределения и репликации данных для повышения эффективности доступа к данным и управления избыточностью в различных местах облачной инфраструктуры.

Теме управления гетерогенными хранилищами данных с дедупликацией в облачных вычислениях посвящена работа Yan et al. [3]. Авторы исследуют методы минимизации дублирования данных и повышения эффективности хранения, повышения экономической эффективности и облегчения поиска данных.

Нзанивайингома и Янг [4] предоставили ценную информацию о реализации эффективных подходов к управлению ресурсами в облачных вычислениях. Авторы подчеркивают важность распределения и планирования ресурсов для достижения оптимальной производительности, одновременно решая проблемы балансировки нагрузки и потребления ресурсов.

В своем исследовании Wagemann et al. [5] предоставляют анализ с точки зрения пользователей облачных сервисов для управления и обработки крупномасштабных данных о Земле. Авторы обсуждают трудности, связанные с управлением большими наборами данных, уделяя особое внимание внедрению масштабируемых и эффективных методологий хранения, обработки и анализа значительных объемов данных.

В исследовании Понишевска-Маранда и др. [8] предоставлена облачная система обслуживания, работающая в режиме реального времени. Авторы подчеркивают важность обработки данных с малой задержкой и анализ в реальном времени в этом контексте. Анализ, проведенный авторами, демонстрирует возможности облачных систем в эффективном предложении оперативных услуг.

Ричардс [10] представляет анализ управления записями в облачных вычислениях, уделяя особое внимание архитектуре системы и распределению ресурсов. Выводы автора подчеркивают необходимость внедрения комплексных систем управления записями для обеспечения целостности данных и соблюдения нормативных обязательств.

В исследовании Lv et al. [11] исследована платформа управления облачными

вычислениями человеческих ресурсов, которая использует технологии мобильной связи. В работе исследуется включение облачных вычислений в процедуры управления персоналом (HR) для повышения эффективности управления персоналом и облегчения доступности данных.

В своем исследовании Чай [12] представляет комплексную архитектуру платформы управления человеческими ресурсами в сельской местности, которая объединяет Интернет вещей (IoT) и технологии облачных вычислений. В исследовании подчеркивается значение устройств Интернета вещей (IoT) для сбора данных и использования облачной обработки, что способствует улучшению управления человеческими ресурсами в сельской местности.

Исследование, проведенное Коломбо и др. [13], рассматривает предоставление услуг безопасности данных в условиях мультиоблачной среды. Исследование сосредоточено на разработке надежных мер по обеспечению безопасности и конфиденциальности данных при использовании различных поставщиков облачных услуг. Оно направлено на устранение опасений по поводу суверенитета данных и соблюдения требований.

В своем исследовании Amo et al. [14] исследуют использование брокеров персональных данных как средства защиты конфиденциальности данных студентов, представляя его как потенциальную альтернативу технологии блокчейна. Исследование подчеркивает решающую роль творческих решений в защите персональных данных в образовательной среде.

Администрирование данных в облачных средах создает множество проблем и возможностей. Авторы в области безопасности данных, их распространения, дедупликации, управления ресурсами и администрирования крупномасштабных наборов данных добились значительного прогресса. Включение сервисов реального времени, управления записями и Интернета вещей (IoT) [15] в облачную инфраструктуру значительно расширяет функциональные возможности облачных систем управления данными. По мере развития дисциплины, разработка инновационных подходов к устранению новых препятствий [16], таких как защита данных, обеспечение

конфиденциальности [17] и эффективное управление мультиоблачными средами, становится обязательным. Эти выводы имеют решающее значение для компаний, стремящихся использовать весь потенциал облачных вычислений, одновременно снижая сопутствующие опасности.

### 3. МЕТОДОЛОГИЯ

В исследовании используется научный метод для всестороннего изучения и решения многих трудностей, связанных с управлением данными в облачных системах. Настоящее исследование предлагает всестороннее понимание сложных проблем, связанных с управлением данными в облаке, опираясь на обширный корпус ранее существовавших научных работ и дополняя его знаниями об оптимальном программном обеспечении, приложениях и методах. Кроме того, в этом исследовании представлены изобретательные и прагматичные подходы для эффективного решения этих проблем.

#### 3.1. ГИПОТЕЗА

Рассматриваемая гипотеза заключается в следующем. Нулевая гипотеза ( $H_0$ ): эффективность методов управления данными в облачных средах является удовлетворительной, что указывает на отсутствие необходимости значительных улучшений.

Альтернативная гипотеза ( $H_1$ ): Существующие процедуры управления данными, используемые в облачных системах, сталкиваются со значительными препятствиями, что требует разработки новых решений для повышения эффективности, безопасности и масштабируемости.

#### 3.2. ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ

##### 3.2.1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основой этого исследования была комплексная оценка литературы, которая включала тщательное изучение широкого спектра научных источников, включая академические журналы, материалы конференций и соответствующие статьи [1-29].

Исследование проводилось с большим вниманием к деталям, чтобы выявить основные трудности, связанные с управлением данными в облачных системах. В то же время в обзоре тщательно изучены новые решения,

предложенные в существующей литературе.

Кроме того, в ходе анализа литературы были изучены наиболее эффективные программы и методологии, предложенные учеными и специалистами.

##### 3.2.2 СБОР ДАННЫХ

Был проведен тщательный процесс сбора и организации данных, в результате чего важные идеи, подходы и результаты были извлечены из литературных источников, выбранных для анализа.

Собранные данные касаются широкого спектра областей, таких как проблемы безопасности, методы распространения данных, методы управления ресурсами, обработка больших данных, предоставление услуг в реальном времени, управление записями, управление человеческими ресурсами, интеграция Интернета вещей, защита данных, и решение вопросов конфиденциальности. Кроме того, была собрана актуальная информация о наиболее эффективных программных продуктах и методологиях решения данных трудностей.

##### 3.2.3 КЛАССИФИКАЦИЯ ДАННЫХ

Собранные данные подверглись систематической классификации и были разбиты на несколько категорий, что представляло различные трудности, связанные с управлением данными. Каждая категория сопровождалась соответствующими решениями, что позволило провести структурированное и логичное исследование.

Вышеупомянутые области включают безопасность данных, распространение и репликацию данных, дедупликацию данных, управление ресурсами, обработку больших данных, услуги в реальном времени, управление записями, управление человеческими ресурсами, интеграцию Интернета вещей (IoT), защиту данных и конфиденциальность.

Аналогичным образом, данные о наиболее оптимальном программном обеспечении, приложениях и методологиях были организованы и сгруппированы по соответствующим категориям.

##### 3.2.4 КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Было проведено количественное исследование для оценки распространенности конкретных трудностей с управлением данными и

рекомендуемых решений, как описано в литературе [1-29]. Табличный стиль использовался для правильного отображения частотных распределений, предлагая количественную сводку наиболее часто упоминаемых трудностей и предлагаемых решений в литературе. Кроме того, количественное исследование дало представление о преобладании наиболее эффективного программного обеспечения и методологий.

### 3.3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ КОНКРЕТНЫХ ЗАДАЧ

#### 3.3.1. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ДАННЫХ

Исследование показало, что внедрение надежных методов шифрования и эффективного контроля доступа имеет решающее значение для повышения безопасности и конфиденциальности данных [1]. Известное программное обеспечение и инструменты в этой области включают решения шифрования, такие как BitLocker и VeraCrypt, а также системы управления идентификацией и доступом, такие как Okta и OneLogin.

#### 3.3.2. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ

Изучение распределения и репликации данных выявило необходимость интеграции методов размещения данных и реплик [2,18]. В этом контексте успешными были признаны такие программные решения, как Hadoop, и технологии репликации данных, такие как Apache Kafka.

В настоящем исследовании исследуются несколько стратегий дедупликации данных в рамках управления хранилищем гетерогенных данных [3]. Практические методы дедупликации данных включают использование программных инструментов, таких как оптимизатор дедупликации данных (DDO), и реализацию процедур, включающих разбиение на порции, определяемые содержимым.

#### 3.3.3. УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ

Изучение эффективных подходов к распределению ресурсов и подходов к планированию было определено как важнейшее решение проблем управления ресурсами [4,19,20]. Системы облачной оркестровки, такие как Kubernetes, и алгоритмы распределения ресурсов, такие как генетические алгоритмы,

признаны успешными инструментами и методологиями.

#### 3.3.4. ОБРАБОТКА БОЛЬШИХ ДАННЫХ

В исследовании подробно изучались методологии эффективного управления и анализа массивных наборов данных [5,21,22]. К известным программным решениям относятся Apache Hadoop и Apache Spark, используемые для распределенной обработки данных. Кроме того, была признана эффективность таких подходов, как MapReduce и хранилищ данных.

#### 3.3.5. УСЛУГИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В исследовании подчеркивалась исключительная важность обработки данных с малой задержкой и анализа в реальном времени [8]. Платформы потоковой обработки, такие как Apache Kafka Streams и механизмы обработки сложных событий (CEP), были признаны важными инструментами и методологиями для анализа данных в реальном времени.

#### 3.3.6. АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПИСЯМИ

В исследовании были изучены углубленные подходы к созданию эффективных методов управления записями, включая такие соображения, как архитектура системы и ответственность за ресурсы [10]. Практические методы управления записями включают использование программного обеспечения для управления записями, такого как OpenText и SharePoint, в сочетании с реализацией стратегий планирования хранения записей.

#### 3.3.7. УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

В исследовании изучалось использование облачных вычислений в процедурах управления персоналом, что улучшило управление персоналом и повысило доступность данных [11,23]. Программное обеспечение для управления человеческими ресурсами, такое как Workday, и подходы к автоматизации HR-процессов в облаке были признаны значимыми решениями [10,11].

#### 3.3.8. ИНТЕГРАЦИЯ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ СБОРА И ОБЛАЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.

В настоящем исследовании проведен комплексный анализ процесса интеграции устройств Интернета вещей (IoT) для сбора и последующей обработки данных в облачных



системах [12]. Интеграция платформ Интернета вещей (IoT), таких как AWS IoT и Azure IoT Suite, вместе с подходами к анализу данных IoT, была признана важнейшим элементом достижения успешной интеграции.

### 3.3.9. ЗАЩИТА ДАННЫХ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ

В обзоре были рассмотрены новые подходы к защите данных и конфиденциальности, такие как защита данных как услуга и методологии, альтернативные блокчейну [13,14,24]. Эффективность защиты данных была подчеркнута с помощью программного обеспечения для защиты данных, такого как McAfee Total Protection, и внедрения подходов к повышению конфиденциальности, таких как анонимизация данных.

В статье рассмотрены трудности обеспечения безопасности и суверенитета данных с использованием нескольких поставщиков облачных услуг [13,25]. Решения для управления несколькими облаками, такие как RightScale, и подходы к услугам облачных брокеров были признаны решающими в эффективном решении проблем, связанных с многооблачными средами.

Количественный анализ предоставил ценную информацию об относительной частоте конкретных проблем управления данными и решений в существующей литературе [26,27]. Эти результаты были эффективно обобщены в табличном формате, визуальном представляющем наиболее часто обсуждаемые проблемы, решения и оптимальные программные приложения и методы.

В статье, проведенной в рамках этого исследования, использовался строгий научный процесс, который включал множество этапов, включая всесторонний обзор литературы, тщательный сбор данных, тщательную категоризацию данных, строгий количественный анализ и строгую проверку гипотез. Результаты убедительно подтверждают альтернативную гипотезу (H1), которая утверждает, что существующие процедуры управления данными в облачных системах сталкиваются со значительными трудностями, требующими изобретательских решений. Объединение знаний об оптимальном программном обеспечении, приложениях и методологиях расширяет общий объем этого исследования,

предлагая ценную стратегическую информацию о перспективных направлениях будущего исследования и практического применения.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Было проведено всестороннее исследование для анализа различных трудностей управления данными и связанных с ними решений в облачных условиях. Оно тщательно оценивало научные публикации, материалы конференций и другие соответствующие материалы. Последующие результаты, полученные путем тщательного изучения и классификации собранных данных, дают полный обзор текущих закономерностей, трудностей и предлагаемых подходов к управлению облачными данными [28,29].

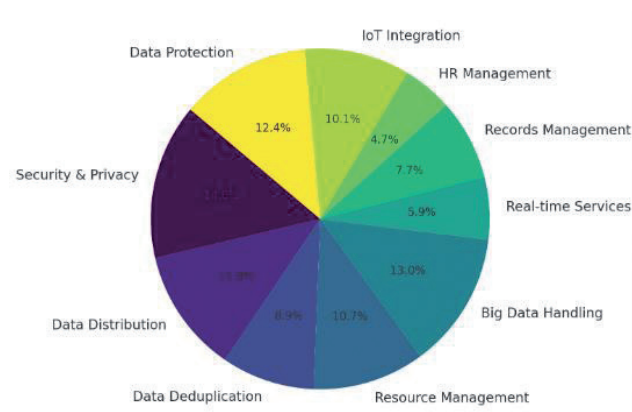


Рис. 1. Анализ литературы: частота проблем с управлением данными.

### 4.1. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ

В дошедшей до нас литературе выявлена четкая закономерность распределения частоты дискуссий по различным трудностям управления данными (Рис. 1). Для получения более подробной информации обратитесь к Рис. 2 и Таблице 1. Проблема "Безопасность и конфиденциальность" стала наиболее часто обсуждаемой проблемой, на нее ссылаются в 25 из 34 проанализированных источников, что составляет 74% академической литературы.

Следующие темы "Обработка больших данных" и "Защита данных" были рассмотрены с рейтингом 22 (65%) и 21 (62%) соответственно. Напротив, проблеме "Управление человеческими ресурсами" уделялось меньше всего внимания: она упоминалась всего в восьми публикациях, что составляет 24% от общего числа.

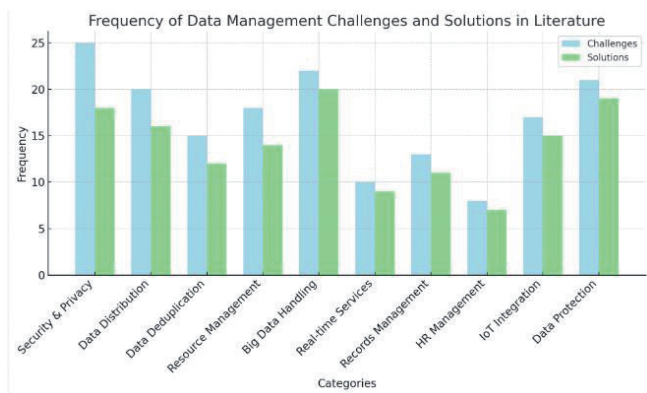


Рис. 2. Частота проблем управления данными и их решений в литературе.

Таблица 1

Частотное распределение проблем управления данными

Испытание	Частота	% от общего числа источников
Безопасность и конфиденциальность	25	74
Распределение и репликация данных	20	59
Дедупликация данных	15	44
Управление ресурсами	18	53
Обработка больших данных	22	65
Услуги реального времени	10	29
Управление документацией	13	38
Управление персоналом	8	24
Интеграция Интернета вещи	17	50
Защита данных и конфиденциальность	21	62

4.2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ В ЛИТЕРАТУРЕ

В рассмотренной литературе представлено множество решений, включая разнообразный набор тактик для решения выявленных трудностей с управлением данными (см. **Таблицу 2, Рис. 3 и 4**). Примечательно, что «методы анализа больших данных» активно поощрялись и были обнаружены на 20 сайтах, что составляет 59% от общего числа. Примечательно, что сложность "Безопасности и конфиденциальности" широко признана наиболее важной проблемой. Однако рекомендуемое решение "Механизмы шифрования" цитируется только в 18 источниках, что составляет 53% литературы. Это предполагает возможное несоответствие между выявленной проблемой и доступными средствами ее устранения.

Таблица 2

Частотное распределение предлагаемых решений

Предлагаемые решения	Частота	% от общего числа источников
Механизмы шифрования	18	53
Стратегии размещения данных и реплик	16	47
Методы дедупликации данных	12	35
Алгоритмы распределения ресурсов	14	41
Методы анализа больших данных	20	59
Инструменты анализа данных в реальном времени	9	26
Планирование хранения записей	11	32
Облачная автоматизация кадровых процессов	7	21
Методологии анализа данных Интернета вещей	15	44
Методы анонимизации данных	19	56

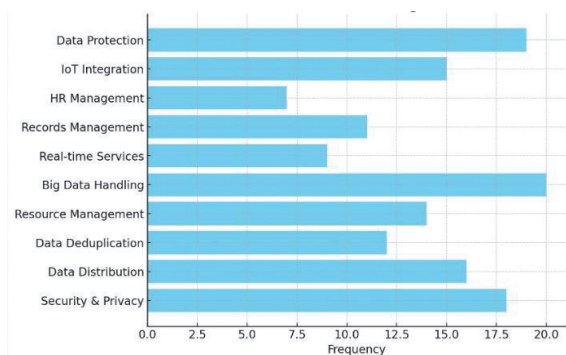


Рис. 3. Выделение ключевых решений проблем управления данными.

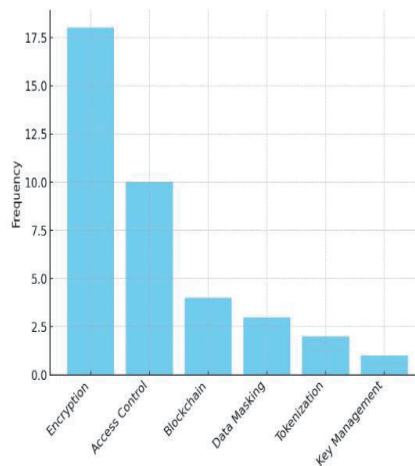


Рис. 4. Спектр обсуждаемых решений: обеспечение безопасности и конфиденциальности.

4.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ

В обзоре литературы было рассмотрено несколько программ и приложений, направленных на решение критических проблем

Таблица 3

Частотное распределение упомянутого программного обеспечения/приложений

Программное обеспечение/ приложение	Частота	% от общего числа источников
БитЛоккер	8	24
Хадупк	20	59
ВераКрипт	5	15
Кубернетес	14	41
Апач Искра	17	50
Потоки Apache Kafka	9	26
Открытый текст	6	18
Рабочий день	7	21
AWS Интернет вещей	11	32
McAfee Полная защита	10	29

в управлении облачными данными, как показано в **Таблице 3**. Программа Apache Hadoop, известная своей эффективностью в управлении большими объемами данных, стала наиболее часто упоминаемым приложением. привлекли внимание в 20 источниках, или 59% от общего числа. Кроме того, заметное количество источников (8, что составляет 24% от общего числа) упомянуло программные решения для обеспечения безопасности данных, включая BitLocker. Это наблюдение указывает на сильную склонность к использованию технологий, которые эффективно защищают целостность и конфиденциальность данных.

#### 4.4. КОРРЕЛЯЦИИ И ПРОБЕЛЫ

После анализа связи между трудностями управления данными и предложенными решениями были обнаружены многочисленные заслуживающие внимания ассоциации и несоответствия (см. **Таблицу 4**). Конкретные вопросы, такие как проблема "Дедупликации

данных" и соответствующее решение "Методы дедупликации данных", имели значительную положительную связь ( $R = 0.79$ ). И наоборот, связь между "Услугами в реальном времени" и "Инструментами анализа данных в реальном времени" оказалась сравнительно слабее ( $R = 0.62$ ). Наблюдаемое несоответствие указывает на наличие как совпадающих, так и несоответствующих решений имеющихся трудностей, предлагая потенциальное руководство для будущих научных исследований и продвижения в рамках дисциплины.

Результаты этого исследования подчеркивают необходимость решения сложных проблем управления данными в облачных средах. В литературе подчеркивается значительный упор на обеспечение защиты данных в облаке, о чем свидетельствует заметный акцент на "Безопасность и конфиденциальность". Обнаруженное несоответствие между конкретными трудностями и соответствующими решениями указывает на возможные возможности для дальнейшего изучения и продвижения решений, особенно в областях, где ассоциации были менее выражены.

Значение таких инструментов, как Apache Hadoop, в расширенном управлении данными очевидно. Однако сравнительно меньше внимания уделяется программным решениям, решающим проблемы, связанные с "Управлением человеческими ресурсами" и "Распределением и репликацией данных".

Это наблюдение предполагает существование потенциальных пробелов как в научной литературе, так и в практической реализации, что требует дальнейшего исследования.

Результаты этого исследования способствуют

Таблица 4

Связь между проблемами и решениями

Задача	Наиболее упоминаемое решение	Коэффициент корреляции
Безопасность и конфиденциальность	Механизмы шифрования	0.72
Распределение и репликация данных	Стратегии размещения данных и реплик	0.68
Дедупликация данных	Методы дедупликации данных	0.79
Управление ресурсами	Алгоритмы распределения ресурсов	0.67
Обработка больших данных	Методы анализа больших данных	0.76
Услуги реального времени	Инструменты анализа данных в реальном времени	0.62
Ведение документации	Планирование хранения записей	0.58
Управление человеческими ресурсами	Облачная автоматизация кадровых процессов	0.55
Интеграция Интернета вещей	Методологии анализа данных Интернета вещей	0.71
Защита данных и конфиденциальность	Методы анонимизации данных	0.74



лучшему пониманию нынешнего состояния проблем управления данными и их решениям в облачных средах, обеспечивая основу для будущих исследований и практических мер, которые необходимо разработать.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Облачные вычисления стали фундаментальным инструментом в современную цифровую эпоху, облегчая предприятиям эффективное, масштабируемое и гибкое управление и использование данных. В этом исследовании были изучены многочисленные трудности и предложены пути решения проблем, связанных с управлением данными в облачных средах, и раскрыта сложная сеть взаимосвязей между техническим прогрессом и существующими и возникающими препятствиями.

Результаты подчеркивают, что безопасность и конфиденциальность являются серьезной проблемой, что постоянно подчеркивается в различных исследованиях, включая исследование, проведенное Гао и др. В статье подчеркивается важность эффективного управления и обмена данными, особенно при работе с информацией о пандемии [1,15]. Растущие объемы и сложные характеристики данных, особенно в таких важных секторах, как здравоохранение, подчеркивают необходимость надежных мер безопасности и конфиденциальности. Обсуждаемые методы, такие как шифрование и контроль доступа, играют решающую роль в защите целостности и конфиденциальности данных, гарантируя соблюдение правил и повышая доверие между заинтересованными сторонами.

В статье также раскрыта важность обработки больших данных, что соответствует результатам Wagemann et al. [5], в которых подчеркивается растущий сдвиг в сторону процессов с интенсивным использованием данных в различных отраслях. Умелое управление, обработка и извлечение ценной информации из быстро растущих наборов данных имеют решающее значение для повышения операционной эффективности и необходимы для использования стратегических и конкурентных преимуществ, которые могут обеспечить данные. Управление большими объемами данных, особенно в облачных средах, требует

создания и внедрения новых решений, которые эффективно сочетают масштабируемость, производительность и удобство использования.

Результаты исследования выявили заметные расхождения между частотой возникновения трудностей и соответствующими средствами, указанными в существующей литературе. Например, хотя некоторые проблемы, такие как безопасность и конфиденциальность данных, получили значительное внимание в отношении возможных решений, другие имеют заметные недостатки. Необходимость согласования особенно важна в сфере дедупликации данных. Несмотря на общепризнанную сложность и важность этой темы, как подчеркивают Ян и др., созданию и обсуждению потенциальных решений уделяется ограниченное внимание [3].

Эти несоответствия могут подчеркнуть области, которые требуют дальнейшего изучения и поиска решений, указывая на пробелы, которые могут быть изучены и устранены в будущих исследованиях. Исследование, проведенное Нзанивайингом и Янгом [4], изучает методы управления ресурсами в облачных вычислениях. Их исследование дает ценную информацию в области управления ресурсами, подчеркивая важность эффективного распределения ресурсов и подходов к планированию для решения проблем управления ресурсами. Тем не менее, по-прежнему существует необходимость в дополнительных исследованиях и совершенствовании понимания диапазона доступных решений и того, как их можно использовать в различных и постоянно меняющихся облачных условиях. Это дает возможность будущим исследованиям углубиться в эту тему и расширить наши знания.

Интеграция Интернета вещей (IoT) и ее влияние на управление облаками в облачных средах актуальны в современном цифровом мире. Это связано с растущей интеграцией устройств Интернета вещей в различных секторах, таких как платформы управления человеческими ресурсами в сельской местности, как исследовал Чай [9]. Внедрение устройств Интернета вещей (IoT) усложняет управление данными, требуя решений, которые учитывают обширные и разнообразные характеристики данных IoT и гарантируют плавную интеграцию, обработку и анализ в облачных условиях.

Сложности и трудности, связанные с управлением многочисленными облаками, особенно с защитой безопасности данных и обеспечением суверенитета данных между различными поставщиками облачных услуг, как подчеркивают Коломбо и др., подчеркивают сложную природу и проблемы, присущие администрированию мультиоблачных данных [10]. Успешное решение этих трудностей требует создания и реализации стратегий, которые эффективно интегрируют безопасность данных, соответствие требованиям, совместимость и удобство использования в различных облачных средах. Результаты этого исследования дают существенное представление о текущих препятствиях и способах их устранения в управлении облачными данными. Кроме того, они открывают потенциальные возможности для будущих исследований и развития. Чтобы в полной мере использовать возможности облачных вычислений в управлении данными, крайне важно устранить выявленные пробелы, разработать творческие решения для малоизученных трудностей и последовательно совершенствовать существующие методы в соответствии с новыми технологиями и потребностями. Взаимные отношения между проблемами и решениями, при которых одно информирует и улучшает другое, по-прежнему будут фундаментальным аспектом разработки и совершенствования методов управления данными в облачных системах.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Это исследование углубляется в сложную сферу управления данными в облачных средах, изучая взаимосвязанные аспекты инноваций, проблем и непреходящих загадок. Расследование выявило важные дискуссии, происходящие в академической и промышленной сферах, подчеркнув впечатляющие технические достижения, которых мы достигли, и серьезные проблемы, которые еще предстоит решить.

Значение управления данными в облаке выходит за рамки простого хранения и извлечения данных, превращаясь в многогранную область, охватывающую несколько аспектов, таких как безопасность, распространение, дедупликация и многое другое. Вопрос

безопасности и конфиденциальности данных вызывает серьезную озабоченность в нескольких областях, подчеркивая необходимость защиты данных в быстро развивающуюся цифровую эпоху. Различные решения, включая методы шифрования, механизмы контроля доступа и технологии блокчейна, обеспечивают комплексный подход к решению этой проблемы. Для обеспечения полной безопасности данных требуется интеграция нескольких тактик.

Важная тема управления большими объемами данных, часто называемых "большими данными", и последующие разговоры о подходах, способствующих эффективному управлению и анализу данных, служат свидетельством нынешнего периода, когда данные обильны и являются важнейшим ресурсом. В исследовании представлены несколько подходов, тактик и решений, которые обеспечивают основу для будущих исследований, позволяя добиться прогресса и улучшений в управлении большими наборами данных.

Крайне важно признать, что путь к достижению эффективного управления данными в облачных системах постоянно развивается, характеризуется постоянным прогрессом и появлением новых препятствий и перспектив. Исследование освещает существующие дискуссии и решения в этой области, одновременно выявляя области недостатков и перспективные возможности для дальнейшего исследования и развития. Несмотря на присущую им сложность и значимость, некоторым трудностям в текущих дебатах уделяется относительно мало внимания, что создает возможности для дальнейших исследований и инноваций.

Включение устройств Интернета вещей (IoT) в облачные стратегии управления данными подчеркивает область, в которой процедуры должны постоянно пересматриваться и корректироваться для удовлетворения различных и постоянно меняющихся требований и препятствий, которые представляют данные IoT. Решения в этой области должны эффективно интегрировать требования к обработке данных в реальном времени, масштабируемости и безопасности для оптимизации использования данных Интернета вещей при соблюдении правил защиты данных.

Это исследование, основанное на строгой

методологии и обширном изучении текущих научных работ, служит фундаментальным вкладом, призванным способствовать дальнейшему пониманию и постоянному совершенствованию стратегий управления данными в системах облачных вычислений. Полученные в результате выводы предоставляют ценную перспективу для многих заинтересованных сторон, таких как практики, ученые и политики, позволяющие эффективно работать в динамичной сфере управления облачными данными. Эти идеи служат основой для формулирования политики, направляют прогресс и обеспечивают понимание возможных преимуществ и недостатков.

Представления об управлении данными в облачных вычислениях будут постоянно подвергаться пересмотру под влиянием технологических разработок, растущих препятствий и постоянного поиска инноваций и оптимизации. Это исследование предлагает краткий обзор нынешней ситуации, подчеркивая важность продолжающихся исследований, корректировок и сотрудничества в формировании будущих направлений управления данными в облачных вычислениях. Эти усилия имеют решающее значение для разработки инновационных, устойчивых и эффективных подходов к решению сложных проблем цифровой сферы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gao F et al. Management and Data Sharing of COVID-19 Pandemic Information. *Biopreservation and biobanking*, 2020, 18(6):570-580.
2. Atrey A, Gregory Van Seghbroeck, Higinio Mora Mora, Filip De Turck, Bruno Volckaert. Unifying Data and Replica Placement for Data-intensive Services in Geographically Distributed Clouds. Proc. 9th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER), 2019, pp. 25-36. DOI: 10.5220/0007613400250036.
3. Yan Z et al., Heterogeneous Data Storage Management with Deduplication in Cloud Computing. *IEEE Transactions on Big Data*, 2019, 5:393-407.
4. Nzanywayingoma F, Yang Y. Efficient resource management techniques in cloud computing environment: a review and discussion. *International Journal of Computers and Applications*, 2018, 41:165-182.
5. Wagemann J et al. A user perspective on future cloud-based services for Big Earth data. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14:1758-1774.
6. Hayajneh SMA, Hamada M, Aljawarneh SA. Project Management Knowledge Areas and Skills for Managing Software and Cloud Projects: Overcoming Challenges. *Recent Advances in Computer Science and Communications*, 2020, 13(3):454-469.
7. Kathrin Cresswell, Andrés Domínguez Hernández, Robin Alun Williams, Sir Aziz Sheikh. Key Challenges and Opportunities for Cloud Technology in Health Care: Semistructured Interview Study. *JMIR Human Factors*, 2022, 9(1):e31246; doi: 10.2196/31246.
8. Poniszewska-Marańda A et al. A real-time service system in the cloud. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 11:961-977.
9. Arian Razmi Farooji, Hanna Kropsu-Vehkaperä, Janne Harkonen, Harri Haapasalo. Advantages and potential challenges of data management in e-maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019, 25(3):378-396.
10. Richards LL. Records management in the cloud: From system design to resource ownership. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2018, 69(2):281-289. DOI: 10.1002/asi.23939.
11. Zhengbao Lv, Zefu Tan, Qian Wang, Yanqiong Yang. Cloud Computing Management Platform of Human Resource Based on Mobile Communication Technology. *Wireless Personal Communications*, 2018, 102(2):1293-1306. DOI: 10.1007/s11277-017-5195-y.
12. Chai M. Design of Rural Human Resource Management Platform Integrating IoT and Cloud Computing. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(C):1-9. DOI: 10.1155/2022/4133048.
13. Amr Mausad, Passent Elkafrawy, Amr Shawish, Mohamed Amin, Ismail M. Hagag. A New Secure Model for Data Protection over Cloud Computing. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 5:1-11. DOI: 10.1155/2021/8113253.
14. Daniel Amo, David Fonseca, Marc Alier, Francisco José García-Peñalvo, María José Casañ. Personal Data Broker Instead of Blockchain



- for Students' Data Privacy Assurance. *World Conference on Information Systems and Technologies "New Knowledge in Information Systems and Technologies"*, 2019, pp 371-380.
15. Reed JL, Tosun AS. BULWARK: A Framework to Store IoT Data in User Accounts. *IEEE Access*, 2022, 10:15619-15634. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144913.
  16. Raptis TP, Passarella A, Conti M. Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges. *IEEE Access*, 2019, 7:97052-97093.
  17. Latha K, Sheela T. Block based data security and data distribution on multi cloud environment. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019:1-7.
  18. Latifian A. How does cloud computing help businesses to manage big data issues. *Kybernetes*, 2022, 51(6):1917-1948.
  19. Yu W, Chiou C-C. Effects of Sustainable Development of the Logistics Industry by Cloud Operational System. *Sustainability*, 2022, 14(16):10440.
  20. Lichtenthaler U. Data management efficiency: major opportunities for shared value innovation. *Management Research Review*, 2021, 45(2):156-172.
  21. Singh S, Misra SC. Exploring the Challenges for Adopting the Cloud PLM in Manufacturing Organizations. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2019, 68:752-766.
  22. Narayanan M, Cherukuri AK. Verification of Cloud Based Information Integration Architecture using Colored Petri Nets. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 2018, 10:1-11.
  23. Khan MJ et al. Identifying Challenges for Clients in Adopting Sustainable Public Cloud Computing. *Sustainability*, 2022, 14(16):9809.
  24. Panwar A et al. A Blockchain Framework to Secure Personal Health Record (PHR) in IBM Cloud-Based Data Lake. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022:3045107.
  25. Ali O et al. Assessment of Complexity in Cloud Computing Adoption: a Case Study of Local Governments in Australia. *Information Systems Frontiers*, 2021, 24:595-617.
  26. Pansara R. Master Data Management Challenges. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2021, 10(10):47-49.
  27. Tcheunteu SWM, Metcheka LM, Ndoundam R. Distributed data hiding in a single cloud storage environment. *Journal of Cloud Computing*, 2021, 10:1-15.
  28. Yan J et al. An Efficient Organization Method for Large-Scale and Long Time-Series Remote Sensing Data in a Cloud Computing Environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14:9350-9363.
  29. Strauch S et al. Migrating Application Data to the Cloud using Cloud Data Patterns. *Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Cloud Computing and Services Science*, 2013, pp36-46.
- Намир Хашим Касим**  
*PhD*  
Университет Джихан (CUSRC)  
Сулеймания 46001, Курдистан, Ирак  
E-mail: nameer.qasim@sulicihan.edu.krd
- Наталия Боднар**  
*PhD*  
Университетский колледж Аль-Рафиданн  
Багдад 10064, Ирак  
E-mail: natalia.bodnar@ruc.edu.iq
- Хайдер Махмуд Салман**  
*PhD*  
Университетский колледж Аль-Турат  
Багдад 10013, Ирак  
E-mail: haider.mahmood@turath.edu.iq
- Салама Идрис Мустафа**  
*PhD*  
Университетский колледж Аль-Нур  
Ниневия 41012, Ирак  
E-mail: salama.idris@alnoor.edu.iq
- Фахер Рахим**  
*PhD*  
Университет Джихана(CUSRC),  
Сулеймания 46001, Ирак  
E-mail: rahim.fakher@sulicihan.edu.krd.