



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ,
НАНОФИЗИКИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

РЭНСИТ:

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА.
НАНОСИСТЕМЫ.
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ.**

2024, том 16, № 2

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

Главный редактор

Грачёв 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

Бупуев 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

Окозуб А.В., д.ф.-м.н., ИНХ СО РАН

Орешко А.П., д.ф.-м.н., МГУ

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

Пересёлков С.А., д.ф.-м.н., ВГУ

Потапов А.А., д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Русаков В.С., д.ф.-м.н., МГУ

Сипов 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

Лицэн Цзяо, Ph.D, Китай

Сангаа Дэлэг, DrSci, Монголия

Скиртач А., DrSci, Бельгия

Энхтор Л., 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 Грачеву В.И.

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ФУРЬЕ-
ОПТИКА И КРИПТОГРАФИЯ: НОВЫЕ НАУЧНЫЕ
ГОРИЗОНТЫ

Потапов А.А. 173
ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В
ОДНОМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННЫХ
СТРУКТУРАХ

Недоспасов И.А., Пупырёв П.Д., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е. .. 207
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В МНОГОКРИСТАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОННОМ МОДУЛЕ
Ходаков А.М., Смирнов В.И., Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Гавриков А.А. ... 215

МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

МИКРОЧИП ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭКЗОСОМ С
ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОДНОВРЕМЕННОЙ ИМПРЕГНАЦИИ
ЕГО ИМАТИНИБОМ: АНАЛИЗ IN VITRO

Амир Монфаредан, Фахер Рахим, Кожобеков К.Г., Голамреза
Тавусидана, Мохаммад Хоссейн Модарресси, Алавинесадат
Хоссейнинасаб, Али-Акбар Агаджани-Афрузи, Махди Шафи
Сабет, Элахе Мотевасели 223

ДИАГНОСТИКА СИГНАЛОВ ЭКГ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ
ОБРАБОТКИ И ОПТИМИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ
ТРАНСФОРМЕРА

Анас Фуад Ахмед, Халида С. Риджаб, Талал К. Ахмед 239

НАНОСИСТЕМЫ

ВНУТРИЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ С ОПТИЧЕСКИМ ФОНОННЫМ
УЧАСТИЕМ В СВЕРХРЕШЕТКАХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
Ибрагимов Г.Б., Ибаева Р.З. 249

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОТОКОЛОВ КВАНТОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ
ПЕРЕМЕННЫХ

Бурлаков Е.В., Коробов А.В. 255
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ГРУППОВОЙ НАВИГАЦИИ
НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Щербатюк А.Ф., Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Переселков С.А.,
Грачев В.И. 267
АКУСТИЧЕСКИЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ТВЁРДОЙ
АБСОЛЮТНО ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Легуша Ф.Ф., Кузькин В.М., Разрезова К.В., Переселков С.А. 275
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО
СТОЛКНОВЕНИЯ СТАЛЬНОГО ШАРА С ЛЕДЯНОЙ ПЛИТОЙ

Халид Валид, Голубев В.И., Гусева Е.К. 291

РАДИОПОКРЫТИЕ ПРИБРЕЖНОЙ МОРСКОЙ ЗОНЫ С
ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО
ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ
ИНТЕНСИВНОГО СУДОХОДСТВА

Афонин И.Л., Головин В.В., Ткаченко М.О., Тыщук Ю.Н., Поляков
А.А., Слезкин Г.В. 297

КРИТЕРИИ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В
ДУХКАМЕРНОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ
Диязитдинова А.А. 307

CONTENTS

RADIOELECTRONICS

INTELLIGENT METASURFACES, FOURIER OPTICS AND CRYPTOGRAPHY: NEW SCIENTIFIC HORIZONS

Alexander A. Potapov 173

LOCALIZED ACOUSTIC WAVES IN ONE-DIMENSIONAL PERIODICALLY MODULATED STRUCTURES

Ilya A. Nedospasov, Pavel D. Pupyrev, Andrey V. Smirnov, Iren E. Kuznetsova .. 207

MODELING AND ANALYSIS OF TEMPERATURE AND THERMOMECHANICAL STRESS DISTRIBUTIONS IN A MULTI-CHIP ELECTRONIC MODULE

Alexander M. Khodakov, Vitaliy I. Smirnov, Viacheslav A. Sergeev, Ruslan G. Tarasov, Andrey A. Gavrikov 215

MEDICAL PHYSICS

DESIGNING A MICROCHIP FOR EXOSOME ISOLATION WITH THE ABILITY TO SIMULTANEOUSLY IMPREGNATE IT WITH IMATINIB: AN IN VITRO ANALYSIS

Amir Monfaredan, Fakher Rahim, Kudaiberdi G. Kozhobekov, Gholamreza Tavoosidana, Mohammad Hossein Modarressi, Alaviyehsadat Hosseininasab, Ali-Akbar Aghajani-Afrouzi, Mahdi Shafiee Sabet, Elahe Motevaseli 223

A NOVEL AND EFFICIENT FRAMEWORK FOR DIAGNOSING ECG SIGNALS BASED ON THE OPTIMIZED TRANSFORMER MODEL

Anas Fouad Ahmed, Khalida S. Rilab, Talal K. Ahmed 239

NANOSYSTEMS

INTRABAND ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY ELECTRONS WITH OPTICAL PHONON PARTICIPATION IN QUANTUM DOT SUPERLATTICES

Guseyn B. Ibragimov, Raida Z. Ibaeva..... 249

INFORMATION TECHNOLOGIES

KEY FEATURES OF CONTINUOUS-VARIABLE QUANTUM KEY DISTRIBUTION PROTOCOLS

Evgenii V. Burlakov, Alexander V. Korobov 255

ONE APPROACH FOR GROUP NAVIGATION OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES

Alexander F. Scherbatyuk, Yury V. Matvienko, Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev 267

ACOUSTIC BOUNDARY LAYER OF A SOLID ABSOLUTELY THERMALLY CONDUCTIVE SURFACE

Fedor F. Legusha, Venedikt M. Kuz'kin, Kseniya V. Razrezova, Sergey A. Pereselkov . 275

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STEEL BALL-ICE PLATE LOW-SPEED COLLISION

Walid Khalid, Vasily I. Golubev, Evgeniya K. Guseva 291

PROVISION OF RADIO COVERAGE OF THE COASTAL MARINE ZONE WITH THE USE OF A WIRELESS BROADBAND OPTICAL CHANNEL FOR THE ORGANIZATION OF INTENSIVE NAVIGATION

Igor L. Afonin, Vladislav V. Golovin, Mikhail O. Tkachenko, Yury N. Tyschuk, Alexander L. Polyakov, Gennady V. Slyozkin 297

CRITERIA FOR IMAGE SUPERPOSITION IN A TWO-CAMERA TECHNICAL VISION SYSTEM

Alfiya A. Diyazitdinova 307



RUSSIAN ACADEMY
OF NATURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF
RADIOELECTRONICS,
NANOPHYSICS AND
INFORMATION TECHNOLOGIES
PROBLEM

RENSIT:

**RADIOELECTRONICS.
NANOSYSTEMS.
INFORMATION
TECHNOLOGIES.**

2024, Vol. 16, no. 2

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 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

Lkhamsuren Enkhator, 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.2024.16.173

Интеллектуальные метаповерхности, Фурье-оптика и криптография: новые научные горизонты

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

Поступила 29.09.2023, рецензирована 02.10.2023, принята 09.10.2023, опубликована 25.04.2024

Аннотация: Рассматривается современное состояние программируемых и интеллектуальных метаповерхностей (МП) и возникающие их применения в передовых интегрированных устройствах. Например, интеллектуальная МП может адаптировать каналы распространения радиоволн и усиливать их различия. Рассмотрены основные стратегии проектирования интеллектуальных МП. Раскрывается необходимость совмещения таких интеллектуальных МП с многочисленными методами топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей.

Ключевые слова: фотоника; радиофотоника; метаоптика; искусственный интеллект; радиофизика; наноструктуры; информационная метаповерхность; интеллектуальная метаповерхность; обработка многомерных сигналов; фрактал; 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 за период 2019–2023 гг.: 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, Jin Yuan, Xin Zhang, Wei Zhang, а также всем тем ученым из Китая, которые оперативно присылают автору через ResearchGate свои недавно выпущенные оригинальные работы.

Для цитирования: Потапов А.А. Интеллектуальные метаповерхности, Фурье-оптика и криптография: новые научные горизонты. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):173-206. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.173.

Intelligent Metasurfaces, Fourier Optics and Cryptography: New Scientific Horizons

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

Received September 29, 2023, peer-reviewed October 02, 2023, accepted October 09, 2023, published April 25, 2024

Abstract: Reviews the current state of programmable and intelligent metasurfaces (MS) and their emerging applications in advanced integrated devices. For example, intelligent MS can adapt radio wave propagation channels and enhance their differences. The main strategies for designing

intelligent MSs are considered. The necessity of combining such intelligent MSs with numerous methods of topological texture-fractal processing of signals and fields 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

UDC 519.24+ 537.86+621.396.96

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 for the period 2019–2023: 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, Jin Yuan, Xin Zhang, Wei Zhang, as well as all those scientists from China who promptly send to author their recently published original works.

For citation: Alexander A Potapov. Intelligent Metasurfaces, Fourier Optics and Cryptography: New Scientific Horizons. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):173-206e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.173.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (175)
2. ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ (175)
3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ (176)
 - 3.1. СВОЙСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ (176)
 - 3.2. АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МП (177)
 - 3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧТИ БЕЗ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (178)
 - 3.4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (178)
 - 3.5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (179)
4. МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ЦИФРОВОЕ КОДИРОВАНИЕ И КРИПТОГРАФИЯ (179)
5. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" ЧЕРЕЗ ПЛАТФОРМУ МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП (181)
 - 5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПЛАТФОРМА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ (182)
 - 5.2. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" МЕЖДУ ДВУМЯ ОПЕРАТОРАМИ (183)
 - 5.3. РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ (185)
 - 5.4. СИНТЕЗ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ ЕВСМ (186)
 - 5.5. К НОВЫМ ПОКОЛЕНИЯМ БИОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТНЫХ СИСТЕМ (188)
6. ПРОГРАММИРУЕМАЯ МП ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ (188)
 - 6.1. НЕБОЛЬШОЕ ПРЕДИСЛОВИЕ (188)
 - 6.2. СХЕМА ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МП (188)
 - 6.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (189)
 - 6.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ (191)
 - 6.5. МЕТАКЛЮЧ НА ОСНОВЕ МП РОМ (193)
 - 6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С РОМ-ШИФРОВАНИЕМ (194)
 - 6.7. ОСОБЕННОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ (195)
7. ОПТИЧЕСКОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ С ПОМОЩЬЮ МП (197)
 - 7.1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ (197)
 - 7.2. РАБОЧИЕ ПРИНЦИПЫ (198)
 - 7.3. ШИФРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛА В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ (199)
 - 7.4. ФАЗОВОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ (201)
 - 7.5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ЧАСТОТНОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ШИФРОВАНИЯ (202)
 - 7.6. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ШИФРОВАНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ (203)
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (204)
- ЛИТЕРАТУРА (204)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появились многообещающие приложения искусственного интеллекта (ИИ) во многих дисциплинах, включая оптику, инженерию, медицину, экономику и т.д. В частности, синергия ИИ и метаоптики приносит большую пользу обеим областям. Метаоптика – это усовершенствованная плоская оптика с новыми функциями и способностями управления светом [1]. Метаматериалы позволяют точно адаптировать взаимодействия света и материи в субволновом масштабе, обеспечивая доступ ко всему спектру электромагнитных реакций, закодированных в уравнениях Максвелла и работающих в огромной полосе электромагнитного спектра. Метаповерхности (МП) представляют собой плоские оптические субволновые устройства, которые могут манипулировать светом (электромагнитными волнами). МП состоит из специально расположенного массива метаатомов. Искусственные метаатомы спроектированы и рассчитаны для управления фазой, амплитудой и поляризацией падающих электромагнитных волн. Новый волновой фронт может быть реконструирован МП. Многочисленные функции мета-устройств могут быть реализованы с помощью нескольких этапов, таких как выбор материала, проектирование метаатомов, проектирование фазового распределения, конфигурация макета, изготовление, характеристика и демонстрация приложений. Эти шаги были подробно представлены в предыдущих обзорах [2-8].

На **Рис. 1** показана тенденция развития ИИ (красный цвет) и метаоптики (синий цвет) [1]. По совпадению, обе области начали быстро расти примерно в 2012 году. Развернутое пояснение основных этапов развития ИИ и метаоптики на **Рис. 1** приведено в [1]. Главным образом, в обзоре [1] классифицируются и обсуждаются последние разработки, интегрированные двумя темами, а именно ИИ для метаоптики и метаоптика для ИИ. Первая описывает, как применять ИИ к исследованиям метаоптики для проектирования, моделирования, оптического анализа информации и применения. Вторая сообщает о развитии оптических систем и вычислениях с помощью метаоптики.

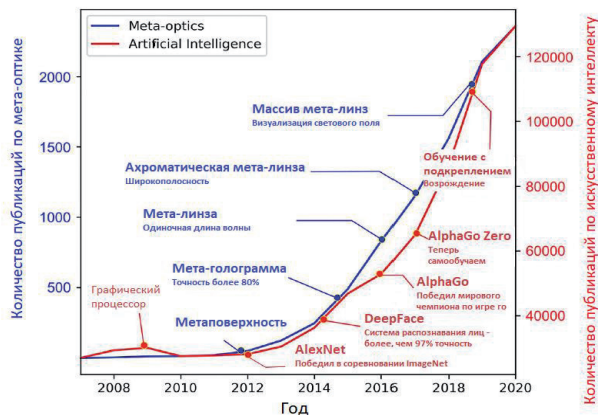


Рис. 1. Тенденции развития ИИ и метаоптики (количество публикаций в год собрано из поиска в Web of Science [1]).

Данная работа является непосредственным продолжением предыдущего авторского обзора по физике и дизайну основных вычислительных диэлектрических МП и их применениям [9], в которой учтены исследования с китайскими учеными в совместной лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов в Китае за период 2022–2023 гг. [10–17].

2. ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МП

Перед лицом все более сложных информационных технологий вопрос о том, как улучшить производительность обработки, скорость работы и эффективные вычислительные возможности, становится важной проблемой в информационной и инженерной сфере. По сравнению с традиционными аналоговыми вычислениями оптическая аналоговая операция реализуется посредством модуляции света. Таким образом, этот процесс является параллельным и пассивным, а его преимуществами являются низкое энергопотребление и высокая скорость работы. Историческое обозрение оптических аналоговых вычислений приведено в обзоре [18] и показано на **Рис. 2**, а их физика – на круговой диаграмме (**Рис. 3**, с дополнениями).

Как наиболее интуитивно понятный метод восприятия объектов, обнаружение краев изображения является неотъемлемой частью распознавания изображений, ИИ и машинного обучения [10–18]. Обнаружение



Рис. 2. Развитие оптических аналоговых вычислений [18].

краев изображения можно просто рассматривать как процесс фильтрации высоких частот, усиливающий полезную высоко пространственную информацию о пространственных частотах и подавляющий нерелевантную низко пространственную информацию о пространственных частотах. Оптические аналоговые вычисления привлекли большое внимание в последнее время. Кроме того, оптические аналоговые вычисления также продемонстрировали уникальный потенциал в работе свертки и решении сложных математических уравнений. Высокая интеграция, высокая скорость отклика и точное управление оптическими аналоговыми операциями делают их перспективным инструментом для реализации конкретных задач обработки многомерных сигналов.

Функция МП состоит в том, чтобы манипулировать волновым фронтом падающего света путем адаптации фазового профиля заданной рабочей длины волны. Метод

достижения полной 2π фазовой модуляции является ключом к обеспечению полного управления волновым фронтом. Диэлектрические метаатомы поддерживают различные локальные резонансы сильного электрического и магнитного рассеяния, которые описываются с помощью теории Ми. Когда частота падающего света ниже или вблизи частоты запрещенной зоны диэлектрического материала, электрический диполь и магнитный дипольные резонансы возбуждаются. Диэлектрический резонатор Ми включает различные электрические и магнитные компоненты, которые позволяют создавать электромагнитные волны [1].

Когда определенные резонансы возбуждаются в МП электромагнитными волнами, могут наблюдаться резкие фазовые изменения. Эти резонансы можно разделить на электрический резонанс и магнитный резонанс в зависимости от дипольного момента соответствующей структуры. Простейший класс МП состоит из субволновых периодических массивов диэлектрических или металлических включений, обладающих чисто электрическим дипольным откликом, тогда как МП Гюйгенса включают электрический отклик и магнитный отклик [10,12,15,18]. Поверхность Гюйгенса – МП, используемая для достижения определенного волнового фронта с использованием принципа Гюйгенса. Общий отклик МП регулируется принципом Гюйгенса, где каждая точка на волновом фронте является источником вторичных волн. Модуляция электрических и магнитных диполей на МП Гюйгенса может контролировать рассеянное поле. В частности, в [19] демонстрируется путь к формированию высококачественного факторного волнового фронта в двух пространственных измерениях на основе полностью диэлектрических МП Гюйгенса с использованием резонансов Ми более высокого порядка в ближнем ИК диапазоне.

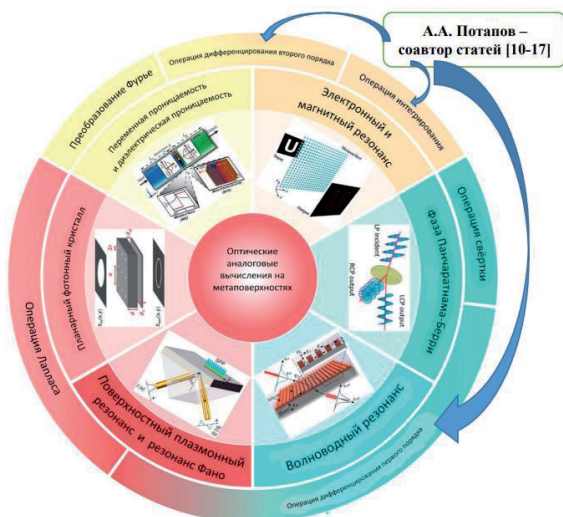


Рис. 3. Различные физические основы оптических аналоговых операций [18] (адаптировано).

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ

3.1. Свойства интеллектуальных метаповерхностей

Одновременное управление электромагнитными волнами и информацией с помощью

информационных МП имеет центральное значение в современном мире. Метаматериалы эволюционировали от инженерных структур до интеллектуальных волновых агентов, добились огромных успехов в управлении взаимодействием волны, информации и материи, чего нельзя было достичь с природными материалами [20]. В последнее время обычные структурные или пассивные МП сделали значимый шаг вперед к интеллектуальным МП за счет интеграции с алгоритмами и нелинейными материалами или активными устройствами [1,6,20-23]. Метаатом интеллектуальной МП интегрирован с перестраиваемыми функциональными материалами или активными устройствами и предназначен для перепрограммирования *in-situ* под управлением соответствующих алгоритмов.

В отличие от обычных МП, интеллектуальная МП обладает тремя важными свойствами: цифровизацией, программируемостью и интеллектом, предоставляя нам возможность контролировать взаимодействие волны, информации и материи без вмешательства человека. Здесь цифровизация позволяет интеллектуальной МП кодировать/декодировать и хранить цифровую информацию на физическом уровне. Программируемость означает, что интеллектуальная МП способна реализовывать различные функции с одной физической сущностью, и переключение между которыми путем изменения последовательностей управляющего кода. В то время как интеллект указывает на то, что интеллектуальная МП имеет локальные или облачные алгоритмы в качестве своего мозга и способна принимать решения, самопрограммироваться и выполнять ряд последовательных задач без контроля человека [20]. Поэтому реконфигурируемые и перепрограммируемые МП можно отнести к стадии младенчества разумной МП, поскольку они строго не являются разумными согласно приведенному выше определению.

Одним словом, интеллектуальные МП могут предоставить нам интеллектуальные платформы для манипулирования волново-информационными взаимодействиями материи, которые обладают многообещающими потенциалами в установлении прямой связи между физическим миром и цифровым миром и

служат естественной ролью слияния физической сущности с ее цифровым двойником. Интеллект является ядром интеллектуальных МП, и алгоритмы (особенно методы глубокого обучения) могут хорошо взять на себя эту роль.

Исторически сложилось так, что в ходе эволюции интеллектуальных МП произошло два важных события: активные МП и программируемые МП кодирования. В отличие от пассивных (т.е. только структурных) МП, активные МП представляют собой гибридные структуры, встроенные перестраиваемые функциональные материалы (например, халькогенидное соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) и активные элементы (PIN-диоды, варакторы и MEMS-переключатели), позволяющие нам динамически управлять взаимодействием волна-информация-материя за счет энергопотребления. В программируемых МП каждый строящийся метаатом имеет конечное число квантованных физических состояний и может быть использован для кодирования цифровой информации на физическом уровне, соединяя цифровой мир и физический мир. Интеллектуальная МП состоит из управляемых метаатомов, и каждый метаатом имеет ряд квантованных физических состояний.

Большинство современных вариантов проектирования интеллектуальной МП, способов преобразования падающего на МП пучка освещения в пучок с желаемым волновым фронтом и/или формой волны, беспроводная передача энергии и сбор энергии в обществе Интернета вещей (IoT) и методов формирования динамических голограмм с помощью интеллектуальных МП приведено в [20,23].

3.2. АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МП

Беспроводная связь стала важным инструментом решения постоянно растущих потребностей в беспроводной передаче информации в современном обществе. Основные архитектуры беспроводной связи с помощью интеллектуальной МП (или реконфигурируемая интеллектуальная поверхность) были предложены недавно, и их в [20] классифицируют на три основных типа: (А) немодулированные метаповерхностные обратные рассеянные коммуникации (NMMBC), (В) модулированные метаповерхностные обратные рассеяния

(ММСС) и (С) окружающие модулированные метаповерхностные коммуникации обратного рассеяния (АММВС)

3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧТИ БЕЗ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Интеллектуальное зондирование почти без цифровых вычислений представлено в [20]. В настоящее время для большинства практических сенсорных систем наиболее важной, но сложной проблемой является работа с многомерными данными или «кризисом данных». К счастью, многомерные данные имеют некоторые структурированные представления во многих практических сценариях. Известная лемма Джонсона-Линденштрауса (Johnson–Lindenstrauss) утверждает, что структурированные высокоразмерные данные могут быть спроецированы в низкоразмерное пространство признаков с почти пренебрежительной потерей информации через правильно спроектированное линейное преобразование [24]. Другими словами, существенная информация о многомерных данных может быть получена из их удивительно сокращенных измерений в большинстве практических условий. К настоящему времени существует множество популярных линейных преобразований встраивания с так называемым свойством ограниченной изометрии. Среди них некоторые встраиваемые преобразования, например, принципиальный компонентный анализ (ПКА), позволяют создавать низкоразмерные представления с математически или физически значимыми признаками, подразумевая, что целевая информация может быть хорошо извлечена из этих низкоразмерных признаков почти без цифровых вычислений.

В [25] рассмотрено использование методов линейного встраивания в интеллектуальные метаповерхностные датчики. Интеллектуальная МП способна генерировать почти произвольно диаграммы излучения или режимы измерения методами машинного обучения. Была предложена концепция перепрограммируемого тепловизора машинного обучения [25], в котором интеллектуальная МП обучается с помощью огромного количества обучающих данных с использованием ПКА, так что желаемые машинным обучением диаграммы излучения могут быть достигнуты на физическом уровне.

Затем интеллектуальная МП служит физическим вычислительным устройством, которое выводит низкоразмерные функции ПКА из входных данных высокоразмерных необработанных данных аналоговым вычислительным способом. Таким образом, результирующая стратегия зондирования почти свободна от цифровых вычислений. Интеллектуальная МП предназначена для работы на частоте около 3 ГГц. Можно заключить, что стратегия зондирования с помощью машинного обучения позволяет получать высококачественные изображения в режиме реального времени с почти игнорируемыми цифровыми вычислениями, и такая стратегия зондирования предоставит нам многообещающий маршрут для интеллектуального зондирования на различных частотах и за их пределами.

3.4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В последнее время использование беспроводных сигналов в области зондирования, особенно зондирования человеческого поведения, приобрело у исследователей интенсивную привлекательность, но эти стратегии страдают от ограниченного пространственно-временного разрешения изображения и точности распознавания из-за ограниченного размера области обзора. В отличие от этих методов, здесь следует выделить трехаспектные критические роли интеллектуальной МП [20]. Во-первых, интеллектуальная МП используется для зондирования людей в режиме реального времени в сцене полного просмотра с высоким временно-пространственным разрешением. Во-вторых, интеллектуальная МП управляет электромагнитными волновыми полями (например, окружающими беспроводными сигналами) в направлении локальных точек, представляющих интерес, для эффективного распознавания мелкозернистых признаков тела, с помощью которых нежелательные помехи от окружающей среды и других частей тела могут быть значительно подавлены. Наконец, признаки тела (например, тонкий язык жестов) и физиологическое состояние нескольких не контактирующих друг с другом людей, могут быть четко идентифицированы в режиме реального времени.

3.5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами интеллекта во всей цепочке зондирования, три составляющих компонента интеллектуального зондирования – сцена в физическом мире, данные в цифровом мире и мера, соединяющая два мира – должны быть совместно рассмотрены в уникальном обучаемом конвейере [20].

Интеллектуальная МП, развернутая в физических средах, имеет очень сильную электромагнитную связь с окружающей средой и целями. Однако к настоящему времени окружающая среда в значительной степени рассматривается как свободное пространство, например, в области беспроводной связи, что, очевидно, нереально и оказывает значительное негативное влияние на производительность сбора и обработки информации. Поэтому требуется моделировать реалистичное взаимодействие между интеллектуальными МП и окружающей средой. Интеллектуальная МП может адаптировать каналы распространения и усиливать их различия.

4. МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ЦИФРОВОЕ КОДИРОВАНИЕ И КРИПТОГРАФИЯ

Информационная безопасность является важной темой, она всегда занимает значительное место в повседневной жизни современного общества и тем самым порождает различные современные методы шифрования. Сообщалось о нескольких интересных работах по голографическому шифрованию, основанных на технологии МП [26-28], которые продемонстрировали большую потенциальную ценность в системах оптического шифрования. Модулируя как спектральные, так и поляризационные реакции, метаповерхностная голография была успешно применена для сокрытия различной информации в разных цветах и поляризационных каналах.

Оптическое шифрование использует обильные степени свободы света (например, амплитуду, фазу, поляризацию, длину волны, орбитальный угловой момент и динамическое управление, а также, их комбинации) для кодирования и декодирования целевой

информации, что открывает новые возможности для передачи и хранения информации. В недавно опубликованной статье [29] предлагается цифровая программируемая МП с элементарно-независимым зондированием видимого света; МП может быть адаптивно перепрограммирована для достижения различных электромагнитных функций путем восприятия цветовых изменений падающего света. Данная МП интегрирована с трехцветными датчиками цвета (TCS3200), микроконтроллерами и алгоритмом кодирования предварительной загрузки. Благодаря установлению обратной связи с программируемым вентиляемым массивом (FPGA) МП формирует полную интеллектуальную систему адаптивного и реконфигурируемого кодирования. МП состоит из 16×16 метаклеток, с четырьмя метаатомами в группе, каждая группа интегрирует трихроматический датчик и микросхему.

Алгоритм связывает процесс светочувствительных МП от обнаружения к сенсорным данным, сравнения данных и, наконец, формирования различных моделей распределения напряжения на МП. В частности, когда информация о частоте света воспринимается трихроматическими датчиками и выводится на высокоскоростной АЦП, тот определяет, превышен ли порог, а затем FPGA определяет пороговое решение и управляет PIN-диодом на МП для выполнения кодирования цветов, соответствующих текущему пороговому значению. Например, когда FPGA определяет, что падающий свет красный, МП выполняет кодирование двойного луча; когда падающий свет горит зеленым, МП выполняет кодирование четырехлучевой схемы; и когда падающий свет синий, МП выполняет кодирование режима рассеяния волн (radar cross-section – RCS).

В [29] дано описание созданной метаповерхностной архитектуры для модуляции электромагнитного поля – **Рис. 4.** Метаячейка имеет три слоя. Первый слой представляет собой металлическую пластину (patch) толщиной 0.1 мм, средний слой представляет собой слой FR-4 с $\epsilon = 4.3$ и $\text{tg}\delta = 0.025$, а нижний слой представляет собой металлический экран. Для достижения динамической настройки устройства установлен PIN-диод (Skyworks SMP1320) между двумя

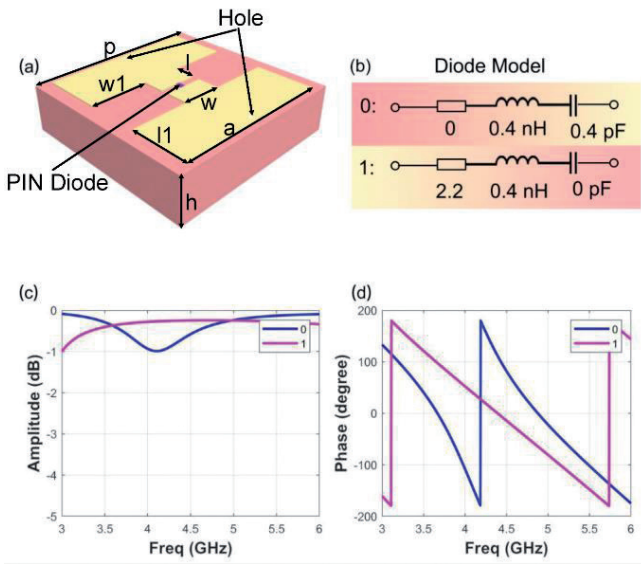


Рис. 4. Описание структуры и ЭМ-отклика метаатома [29]: а) Трехмерный вид суперячейки. б) Эквивалентная схема PIN-диода в состоянии OFF/ON, в) амплитудная реакция элемента, д) фазовая реакция элемента.

симметричными металлическими патчами в первом слое. Кроме того, для подключения цепи управления на блоке есть два сквозных отверстия диаметром 0.15 мм. В процессе имитационной верификации с использованием системы моделирования СВЧ трехмерных структур CST Microwave Studio была установлена модель блока метаматериала (показанная на Рис. 4а) с периодом $p = 14 \text{ мм}$, толщиной среды $h = 3.5 \text{ мм}$. Другие параметры: $a = 12 \text{ мм}$, $w = 3 \text{ мм}$, $w_1 = 4.5 \text{ мм}$, $l_1 = 1.7 \text{ мм}$ и $l_1 = 4.5 \text{ мм}$.

Эквивалентные схемы PIN-диода на основе модели R-L-C показаны на Рис. 4б. Код "0" указывает, что PIN-диод находится в состоянии "ВЫКЛ", при этом $R_1 = 0$, $L_1 = 0.4 \text{ нГн}$ и $C_1 = 0.4 \text{ пФ}$. Код "1" указывает, что PIN-диод находится в состоянии "ВКЛ", где $R_2 = 2.2$, $L_2 = 0.4 \text{ нГн}$ и $C_2 = 0 \text{ пФ}$. Амплитудные и фазовые кривые элемента метаматериала при y -поляризации показаны на Рис. 4с,д ($n = 0$ и 1). В точке частоты 4.1 ГГц разность фаз между двумя состояниями элемента π , а амплитуды двух состояний составляют -0.27 дБ и -0.99 дБ соответственно, показывая, что метаповерхностный волновой фронт хорошо управляется.

Возвращаясь к истории вопроса, следует особо отметить, что в 2014 г. была опубликована одна из первых работ по

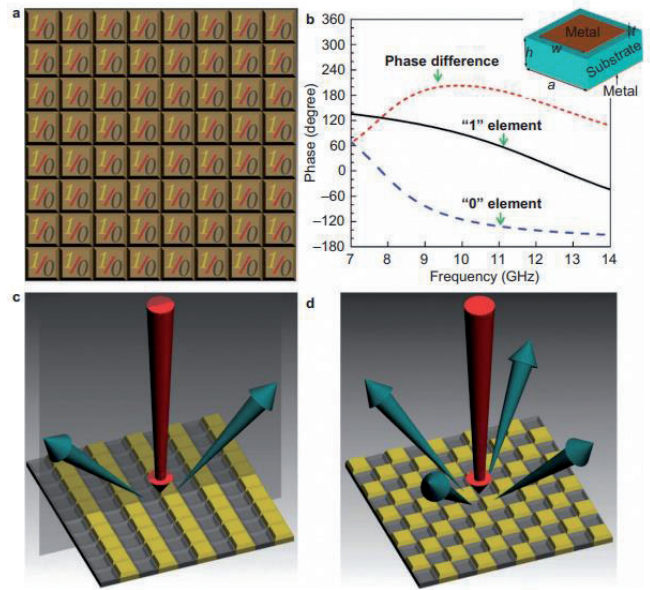


Рис. 5. 1-битная цифровая МП и кодирование МП [30]: (а) 1-битная цифровая МП состоит только из двух типов элементов: '0' и '1'. б) квадратная металлическая конструкция патч-блока (вставка) для реализации элементов "0" и "1" и соответствующих фазовых характеристик в диапазоне частот. в) Две 1-битные периодические кодирующие МП для управления рассеянием лучей путем проектирования кодирующих последовательностей элементов '0' и '1': (с) 010101.../010101... код и (д) 010101.../101010... код.

цифровому кодированию программируемых метаматериалов/метаповерхностей [30], когда интегрируют цифровую информацию в дизайн метаматериалов, соединяя физические миры и миры цифрового кодирования.

Все результаты в статье [30] основаны на концепции кодирования метаматериалов. Начнем с 1-битного кодирования МП – **Рис. 5а**. Мы рассматриваем специальную МП, которая состоит из бинарных цифровых элементов '0' или '1'. В двоичном случае максимальная разность фаз составляет π (или 180°). Следовательно, мы проектируем элемент "0" как частицу метаматериала с 0-фазовым откликом, а элемент "1" как частицу метаматериала с π фазовым ответом. Таким образом, фазовые ответы элементов '0' и '1' просто определяются как $\varphi_n = n\pi$ ($n = 0,1$). Чтобы достичь широкой полосы частот, используется субволновая квадратная металлическая патч-вставка, напечатанная на диэлектрической подложке, для реализации двоичных элементов (см. вставку Рис. 5б).

В отличие от существующих аналоговых метаматериалов, которые используют эффективные параметры среды или специальные дисперсионные отношения для управления электромагнитными полями, кодирующие метаматериалы просто манипулируют электромагнитными волнами через различные кодирующие последовательности элементов "0" и "1". Например, при периодической кодирующей последовательности 010101.../010101..., нормально падающий луч будет в основном отражаться МП в двух симметрично ориентированных направлениях, тогда как при периодической кодирующей последовательности 010101.../101010.../010101.../101010..., обычно падающий луч будет в основном отражаться в четырех симметрично ориентированных направлениях, как показано на Рис. 5с и 5d.

Концепция кодирующего метаматериала может быть расширена от 1-битного кодирования до 2-битного кодирования или выше [30]. В 2-битном кодировании четыре типа единичных ячеек с различными ответами должны имитировать элементы '00', '01', '10' и '11'. 2-битное кодирование имеет большую свободу манипулировать электромагнитными волнами, чем 1-битное кодирование, но требует более сложной технологии для цифрового управления. Подобно 1-битному случаю, четыре типа единичных ячеек в 2-битных кодирующих метаматериалах должны иметь фазовые ответы 0, $\pi/2$, π и $3\pi/2$, соответствующие элементам '00', '01', '10' и '11' соответственно. Следовательно, фазовые ответы φ_n просто определяются как $\varphi_n = n\pi/2$, ($n = 0,1,2,3$).

Чтобы реализовать эти частицы метаматериала, в [30] по-прежнему используются квадратные металлические патч-вставки различных размеров, напечатанные на диэлектрической подложке, для проектирования элементов "00", "01", "10" и "11", как показано на Рис. 6. Благодаря 2-битному кодированию метаматериалов или МП у нас есть большая гибкость в управлении последовательностями кодирования для достижения более широких приложений.

Предложенные кодирующие метаматериалы, цифровые метаматериалы и программируемые

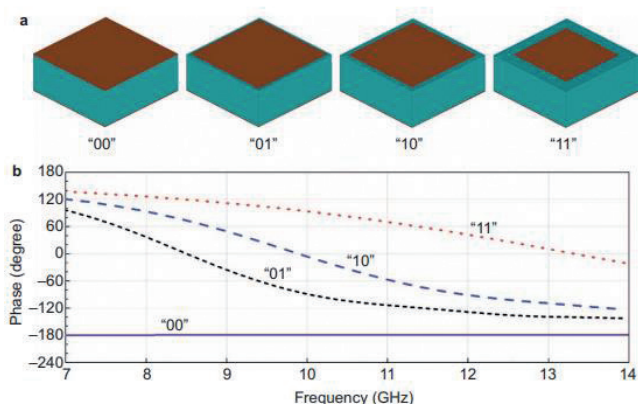


Рис. 6. 2-битное кодирование метаповерхностных элементов и их фазовых откликов [30]: а) элементы "00", "01", "10" и "11" (слева направо), выполненные с помощью квадратных металлических патч-блоков различных размеров. б) фазовые ответы элементов "00", "01", "10" и "11".

метаматериалы, как отмечается в [30], очень привлекательны для различных применений, таких как управление пучками излучения антенн (аналогично антеннам с фазовыми решетками, но с использованием другого принципа со значительно менее дорогим подходом), уменьшение характеристик рассеяния целей и реализация других интеллектуальных метаматериалов.

Далее рассмотрим наиболее характерные примеры интеллектуальных МП. Начнем с уникального примера интеллектуальной МП, опубликованный в июне 2022 года [31].

5. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" ЧЕРЕЗ ПЛАТФОРМУ МОЗГ–КОМПЬЮТЕР–МП

Исследование механизмов мозга человека, и, в частности, изучение механизмов обеспечения психических процессов, является одной из актуальных проблем современной науки. Китайские ученые представили электромагнитную интеллектуальную МП с интерфейсом мозг-компьютер (BCI), управляемую с помощью сигналов мозга напрямую и неинвазивно [31]. В своей работе ученые разработали и экспериментально подтвердили возможность беспроводной «мысленной связи» и дистанционного управления «силой мысли». Для работы устройства используются неинвазивные электроды, которые

считывают электроэнцефалограмму (ЭЭГ) с помощью метода вызванного потенциала на волне P300. Напомним, что волна P300 (P3) - это компонент потенциала, связанный с событиями, возникающий в процессе принятия решений. Считается, что это эндогенный (происходящий из живой системы) потенциал, поскольку его возникновение связано не с физическими свойствами стимула, а с реакцией человека на него. Утверждается, что активность мозга можно превратить в радиоволны с помощью программируемой МП. Эта технология открывает путь к созданию управляемых «сознанием» радаров, систем обнаружения уставших водителей и другим применениям.

5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПЛАТФОРМА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

В последнее время перепрограммируемые МП, включающие в себя PIN-диоды, варикапы,

микро/наноэлектромеханические системы (MEMS/NEMS) [21, 23], позволили осуществлять активный в реальном времени программируемый контроль над функциями электромагнитного поля, которые (МП) раньше были статическими или полностью ограничены в обычных пассивных аналогах. В [31] впервые предложена и создана электромагнитная платформа мозг-компьютер-МП (ЕВСМ) для неинвазивного управления синтезом информации и ее беспроводной передачей – **Рис. 7**. Оператор, оснащенный электродами и устройством P300 ВСИ, может напрямую управлять МП с различными электромагнитными функциями под визуальным стимулом с помощью определенных временных последовательностей кодирования. На Рис. 7а продемонстрированы четыре типичные схемы, включая беспроводную связь мозга, расшифровка шаблонов кодирования, сканирование луча и многофункциональность электромагнитных модуляций.

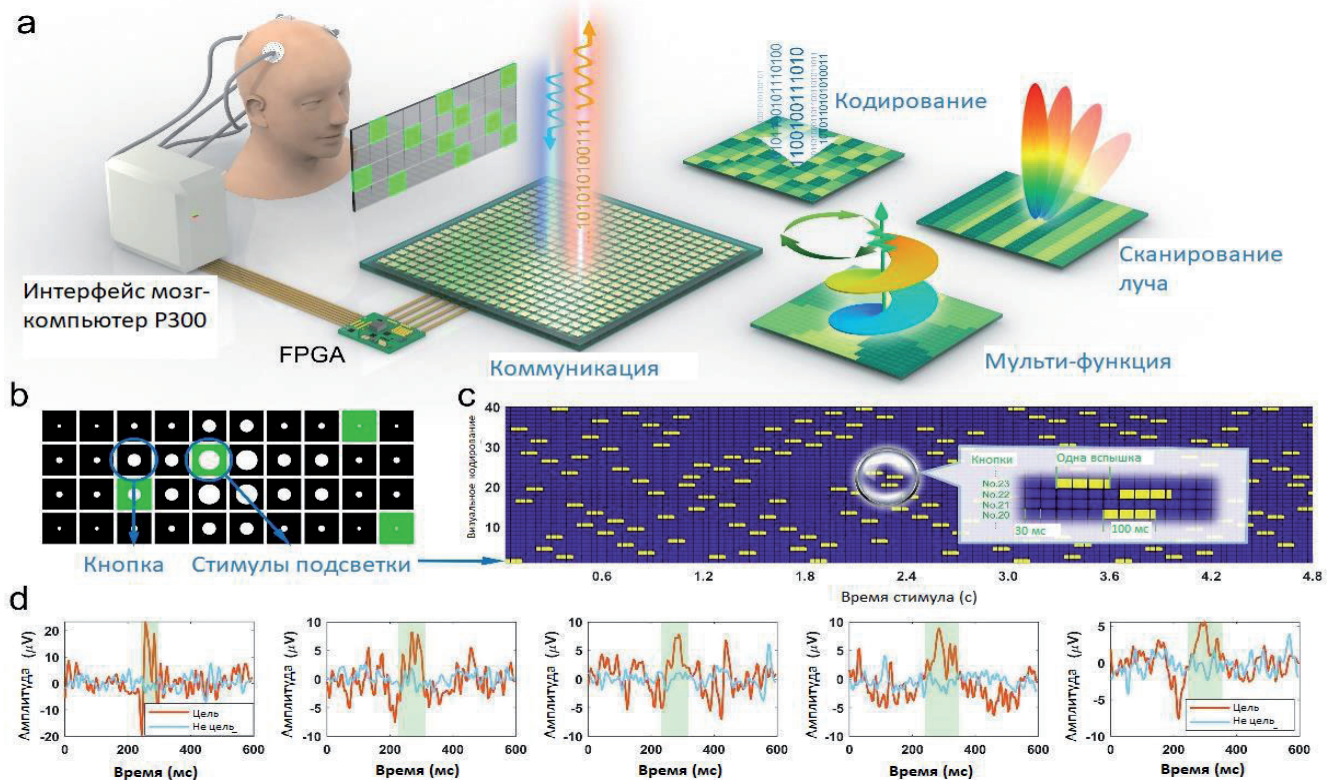


Рис. 7. Платформа ЕВСМ [31]: (а) Системная архитектура ЕВСМ. (б) Графический пользовательский интерфейс схемы отклонения луча. Кнопки с разными кружками представляют разные направления рассеяния луча, где выделенный стимул – зеленые блоки. (с) Схематическая диаграмма последовательности стимулов, в которой 40 строк представляют 40 кнопок, а желтые блоки отмечают выделение кнопок, каждое из которых длится 100 мс. (д) Экспериментально измеренные сигналы ЭЭГ пяти нажатий кнопок, где очевидные пики амплитуды возникают примерно через 300 мс.

Дисплей размещается перед оператором для отображения графического пользовательского интерфейса (GUI) и имеет виртуальную матрицу кнопок, как показано на Рис. 7*b*. Разные кнопки соответствуют разным операциям шаблона кодирования ЕВСМ. Каждая попытка соответствует одной отправке команды, и кнопки начинают последовательно мигать в случайном порядке около 5 раундов, каждый из которых содержит по одной вспышке для каждой кнопки. Последовательность вспышек генерируется случайным образом перед каждым испытанием. На Рис. 7*c* представлена последовательность мигания 40 кнопок (40 рядов) в схеме сканирования луча, где желтые квадраты указывают начальную точку стимула.

Вертикальная ось представляет количество кнопок от 1 до 40, а горизонтальная ось представляет 160 последовательных вспышек стимула, отмеченных желтыми полосами на Рис. 7*c*. Каждый отмеченный блок на Рис. 7*c* соответствует продолжительности 30 мс, а каждая вспышка длится 100 мс, что охватывает чуть более 3 блоков. На Рис. 7*c* мы дополнительно показываем увеличенное изображение трех вспышек, чтобы более четко проиллюстрировать временные последовательности стимулов различных кнопок.

Внимание оператора сосредоточено на кнопке, соответствующей команде, которую он хотел бы подать (т. е. цели). Когда мишень мигает, положительный потенциал может быть обнаружен на ЭЭГ примерно через 300 мс, получивший название потенциала Р30034. Экспериментально доказано, что такой ВСИ на основе Р300 эффективен для непосредственного управления мозгом внешними устройствами. Чтобы представить сигналы мозга для двух типов стимулов (целевой и нецелевой), на Рис. 7*d* показаны измеренные сигналы ЭЭГ, где красная и синяя кривые соответствуют сигналам для целевого и нецелевого стимула соответственно. На каждом подрисунке Рис. 7*d* сигналы, соответствующие как целевой, так и нецелевой кнопкам, усредняются по множеству вспышек. Для каждой вспышки кнопки в испытании сегмент сигнала ЭЭГ от 0 до 600 мс после начала вспышки извлекается и корректируется с помощью базовой линии,

извлеченной из 200 мс до начала вспышки. Затем этот последовательный стимул используется для прямого управления программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) для выполнения соответствующих инструкций.

5.2. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" МЕЖДУ ДВУМЯ ОПЕРАТОРАМИ

В качестве демонстрации концепции ЕВСМ в [31] представлена беспроводная "мысленная связь" между двумя операторами – Рис. 8*a*. Для оператора ВСИ предоставляется текстовый графический интерфейс в котором визуальная кнопка кодируется непосредственно как определенная последовательность кодирования, состоящая из "0" и "1", связанная с двумя шаблонами кодирования. Используется однолучевая диаграмма с высоким усилением и диаграмма уменьшения рассеяния для амплитудной модуляции, соответственно "1" (высокая амплитуда) и "0" (низкая амплитуда). В качестве доказательства прототипа показана беспроводная передача текста мысленно от одного оператора к другому в рамках системы связи ЕВСМ. Оператор А, как передатчик текста, отправляет буквы, визуально глядя на кнопку символа в графическом интерфейсе ЕВСМ. Когда целевая буква декодируется из сигналов ЭЭГ, последовательность кодирования, основанная на кодах ASCII, реализуется на ПЛИС для переключения изменяющихся во времени шаблонов.

В процессе кодирования, поскольку кнопки, представляющие связанные текстовые символы, имеют соответствующие коды ASCII, выбранная кнопка напрямую преобразуется в двоичные коды ASCII с заголовком кадра "1111111110000", как показано на Рис. 8*c*. Затем, в соответствии с окончательным кодом, МП отражает высокую или низкую интенсивность в пространстве. В процессе декодирования мы сначала собираем пространственную электромагнитную энергию, используя приемный канал, включающий микрополосковую антенну, встроенную рядом с МП, как показано на Рис. 8*e*, а также малошумящий усилитель (МШУ) и высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь (АЦП), управляемый ПЛИС. Собранный поток данных представляет собой набор последовательных кадров, который представляет замеренную интенсивность при

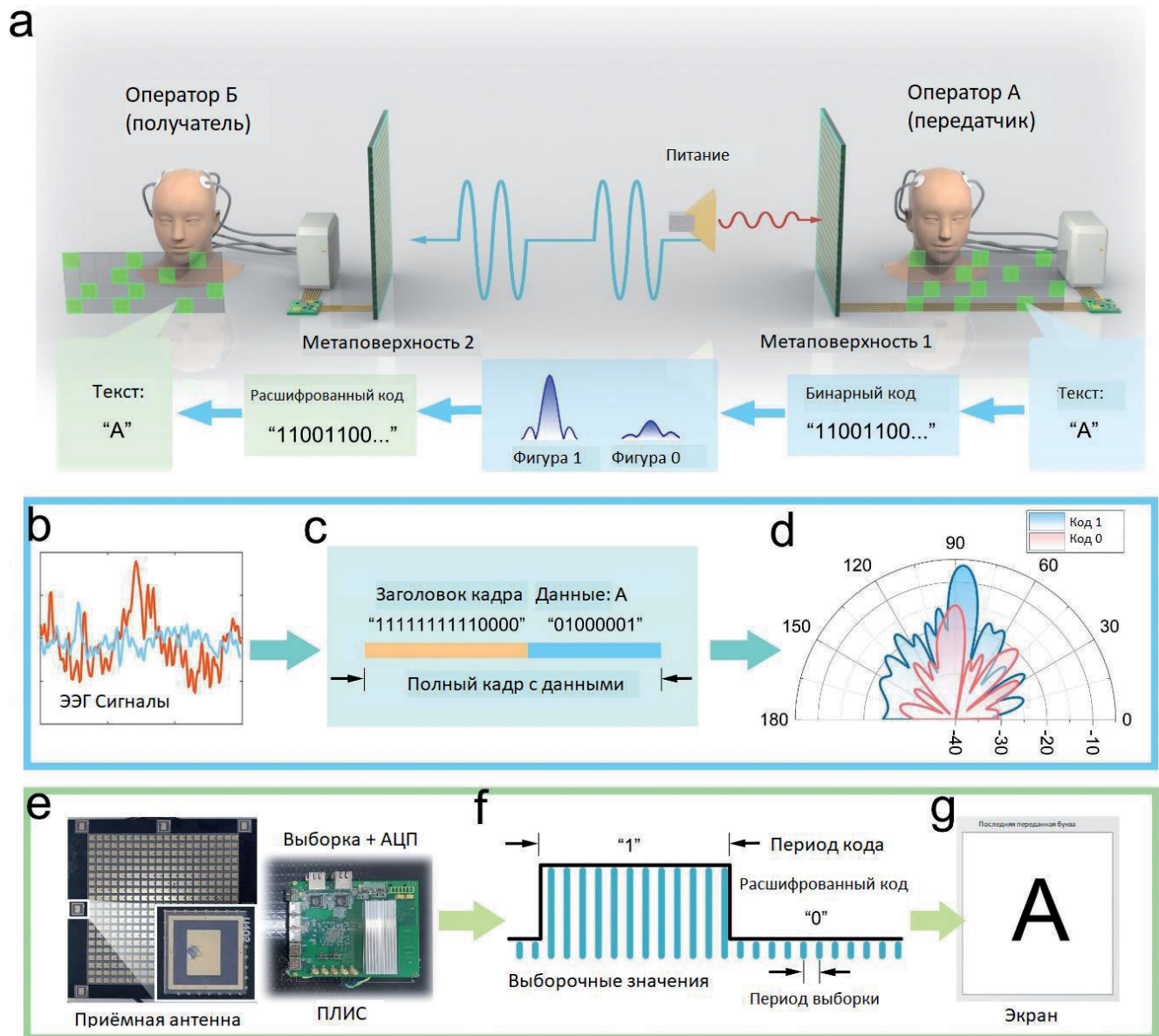


Рис. 8. Беспроводная текстовая связь с использованием EBCM [31]: а) системная архитектура системы текстовых сообщений, а также процесс кодирования и декодирования. (b)-(d) Процесс кодирования сигналов ЭЭГ в переданные электромагнитные сигналы, где сигналы ЭЭГ, показанные в (b), сначала обнаруживаются ВСІ и преобразуются в цифровую последовательность (c) для беспроводной передачи, а затем излучаются с помощью МП с разными амплитудами (d). (e)-(g) Процесс декодирования беспроводной связи, когда антенна и ПЛИС (e) сначала принимают и дискретизируют сигналы из пространства и преобразуют их в цифровые сигналы. Выборочные данные дискретизируются в коды 0/1 для декодирования (f), и, наконец, переводятся в текст для отображения (g).

частоте сбора данных 10 МГц. Используется алгоритм декодирования, чтобы определить положение заголовка кадра для определения начальной точки кадра данных, как показано на Рис. 8f. Затем выборочные данные переводятся в двоичные коды ASCII, и далее текст отображается в графическом интерфейсе.

Четыре текстовые последовательности успешно отправляются и принимаются с помощью платформы EBCM, включая

"HELLO WORLD", "HI, SEU", "HI, SCUT" и "BCI METASURFACE". Среднее время ввода каждого символа составляет около 5 сек. при использовании ВСІ на базе P300 опытным оператором ВСІ. Поскольку программируемая МП может достигать скорости передачи кода "0/1" не менее 1 Мбит/с, максимальная скорость передачи символов для МП составляет около $5 \cdot 10^4$ символов в секунду (20 бит в каждой последовательности). Следовательно, конечная

скорость передачи текста составляет около 12 символов в минуту. Стоит отметить, что ВСИ на основе P300 обеспечивают большую точность и надежность среди различных неинвазивных ВСИ.

5.3. РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Подробно система связи представлена на **Рис. 9a** [31]. В передающей части сигналы ЭЭГ сначала обнаруживаются и обрабатываются устройствами ВСИ и транслируются в соответствующие управляющие сигналы ПЛИС. Сигналы управления следуют принципу кодирования сигналов соответствующего интерфейса, показанного на **Рис. 7b-7d**.

ПЛИС выполняет кодирование и переводит PIN-диоды в нужные состояния. В приемной части микрополосковая антенна (МПА) рядом с метаповерхностью принимает электромагнитные сигналы от передатчика и направляет их в МШУ и детектор. Детектор производит выборку аналоговой амплитуды,

которая далее преобразуется в цифровые коды для ПЛИС. Представленный процесс является однонаправленным, но система связи ЕВСМ является двунаправленной, поскольку фронты передачи и приема являются соответственно метаповерхностью и МПА, как показано на **Рис. 9b**.

Экспериментальный сценарий представлен на **Рис. 9c**, в котором оператор А выполняет задачу передачи текста, а оператор В получает и читает текст. Расстояние между передающей и принимающей МП составляет около 1.3 м, при этом передающая МП возбуждается широкополосной антенной с расстояния 0.3 м, а приемник представляет собой интегрированную вблизи приемной МП антенну, которая подключена к МШУ и детектору, а также АЦП, управляемым другим ПЛИС. Полученные и демодулированные буквы и текст окончательно отображаются в разработанном графическом интерфейсе. Результаты всех экспериментов представлены в дополнительном фильме к [31].

На **Рис. 10a** представлены обработанные ЭЭГ – ответы канала 0Z на два типа стимулов (целевой и нецелевой) при произнесении испытуемым слова "HELLO".

В каждой подфигуре, соответствующей написанию одного символа, для каждого из двух типов стимулов формы сигналов потенциала, связанного с событием (ERP), извлекаются с помощью фиксированного по времени среднего значения сигналов ЭЭГ по всем вспышкам цели или одной из кнопок без цели в испытании. По сравнению с нецелевыми данными, высокая амплитуда четко наблюдается примерно через 300 мс после стимула. В соответствии с сигналами ЭЭГ, ЕВСМ выдает амплитудно-модулированные электромагнитные сигналы различных букв, используя код ASCII.

Чтобы полностью продемонстрировать беспроводную связь, дополнительно в [31] предоставлены 12 сегментов измеренных электромагнитных сигналов, включая буквы "H, E, L, O, B, C, I, S, M, E, T, A", как показано на **Рис. 10b-10d**, где высокие и низкие амплитуды соответственно означают "1" и "0" в коде ASCII.

Представленные данные собираются электромагнитным детектором и нормализуются. Каждое обнаружение генерирует амплитудный

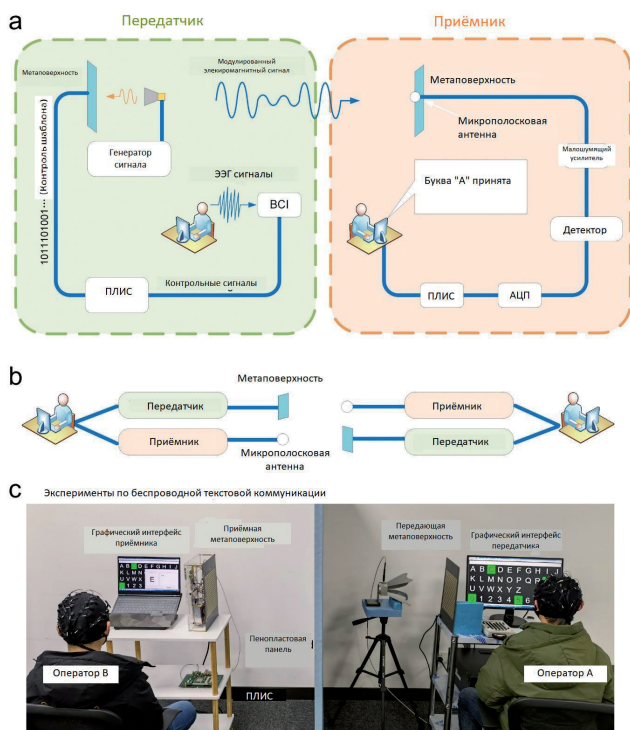


Рис. 9. Экспериментальная реализация беспроводной текстовой связи [31]: (a) Системная архитектура эксперимента по беспроводной текстовой связи. (b) Иллюстрация рабочего механизма передающей и принимающей частей. (c) Сценарий эксперимента с беспроводной текстовой связью напрямую через ЕВСМ, где между двумя операторами помещается панель из пенопласта для проверки свойств беспроводной связи.

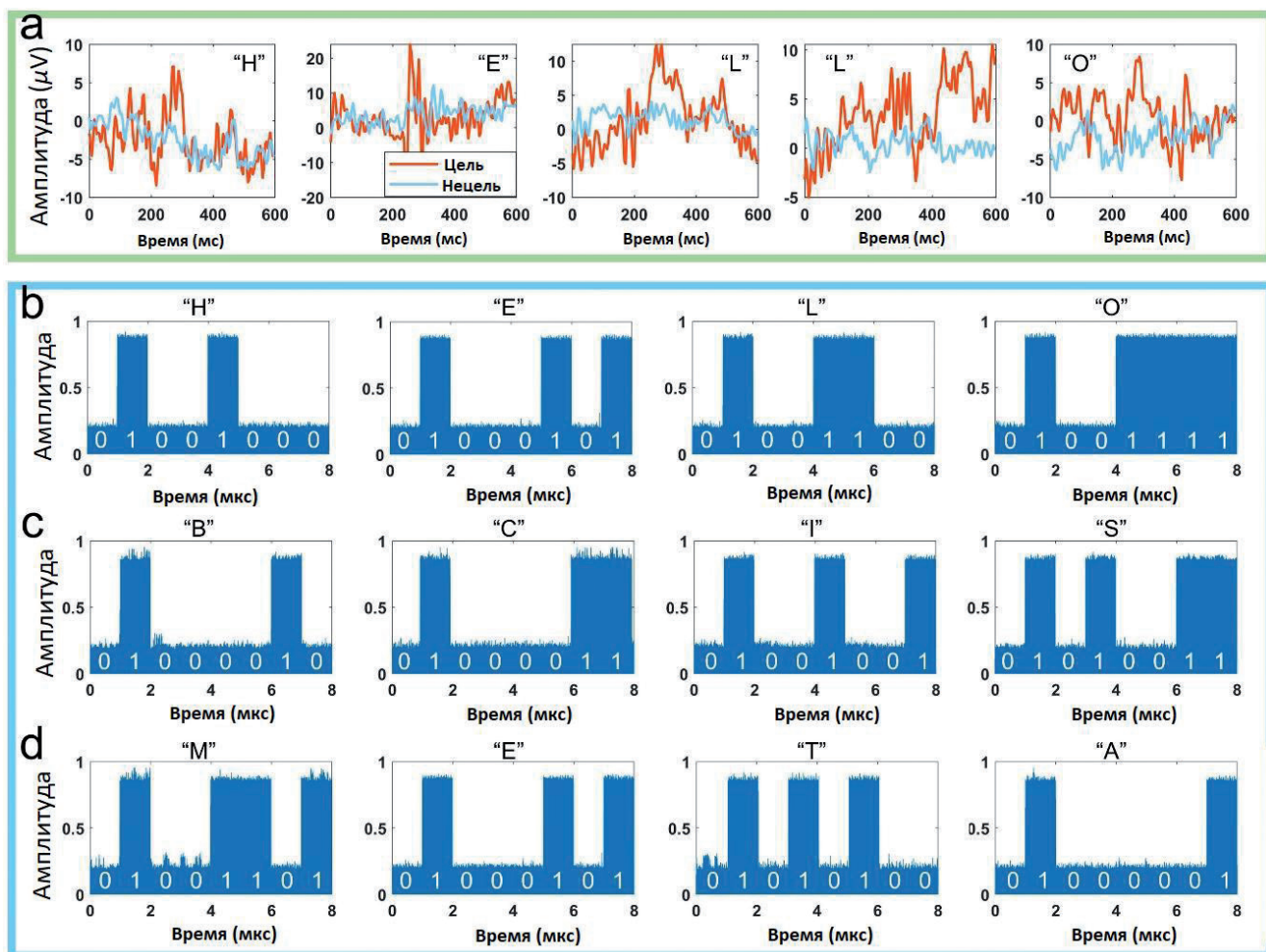


Рис. 10. Экспериментальные результаты беспроводной текстовой связи с использованием EBCM [31]: (а) Экспериментально измеренные сигналы ЭЭГ в схеме текстовой коммуникации. Для демонстрации представлены сегменты ЭЭГ, соответствующие пяти буквам "HELLO". (b)-(d) Измеренные электромагнитные сигналы букв "HELO", "BCIS" и "META".

импульс и множество амплитудных импульсов для составления представленных данных, где высокие и низкие амплитуды соответственно означают коды 1 и 0. ASCII-коды этих букв четко прослеживаются в соответствии с Рис. 10b-10d.

5.4. СИНТЕЗ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ EBCM

Дополнительные функции синтеза волнового фронта с помощью EBCM исследовались также в [31]. Для этого были разработаны три типовых приложения, включая сканирование визуального луча, множественные электромагнитные модуляции и ввод шаблона кодирования, а также, установлен демонстрационный прототип EBCM, в котором МП заменена версией светодиода вместо PIN-диода, как показано на Рис. 11а.

Поскольку шаблоны кодирования на МП напрямую определяют электромагнитные

функции, светодиоды встраивались так, чтобы интуитивно визуализировать управление шаблоном в системе проверки EBCM. В схеме сканирования визуального луча мы хотим, чтобы оператор мог соответствующим образом управлять сканированием электромагнитного луча с помощью EBCM, включая отклонения луча, генерацию луча с орбитальным угловым моментом (orbital-angular momentum – OAM) и контроль радиолокационного поперечного сечения (radar cross section – RCS), как показано на Рис. 11b. Был разработан графический интерфейс сканирования луча – Рис. 8e. Предполагается, что эта схема может быть дополнительно интегрирована с техникой дополненной реальности (augmented reality – AR) и найдет больше применений в адаптивной беспроводной связи "разум-текст" и интеллектуальном обнаружении радаров.

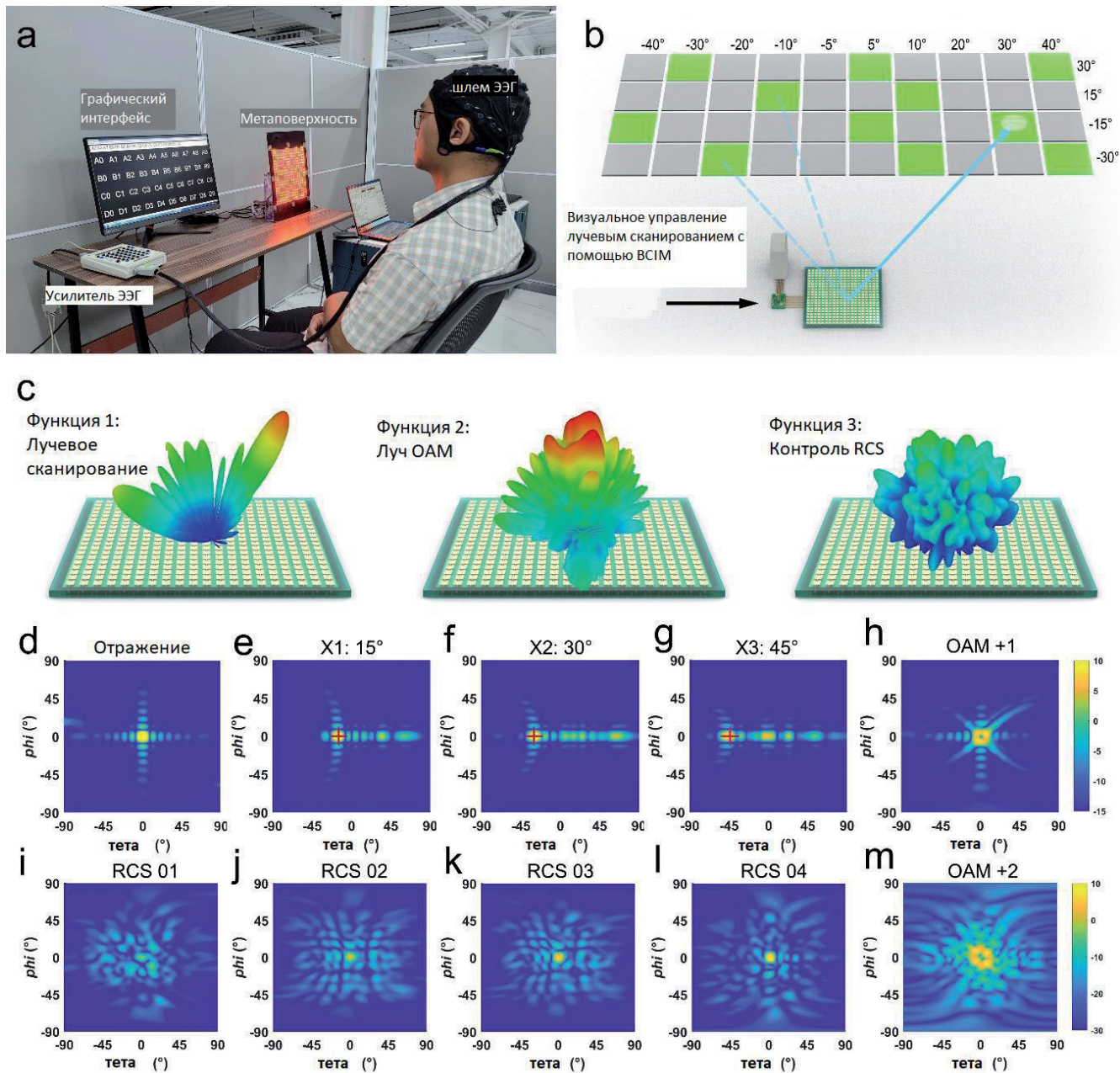


Рис. 11. Дополнительные функции синтеза волнового фронта с использованием ЕВСМ [31]: (а) Фото схемы кодирования образов. (б) Иллюстрация сканирования луча с помощью ЕВСМ. Визуальный взгляд оператора ВСМ непосредственно управляет МП, чтобы отрегулировать направление рассеяния до желаемого угла. Каждая кнопка относится к определенному направлению рассеяния. (в) Три типовые электромагнитные функции, включая сканирование луча, генерацию луча OAM и управление RCS. (d)-(g) Смоделированные результаты четырех видов полей сканирования луча, где результат измерения основного направления отмечен красным крестом. Рассеивающий пучок отклоняется от 0° до 45° по оси x . (g)-(j) Результаты смоделированного поля контроля RCS, где значения от "01" до "04" указывают четыре уровня интенсивности отражения. (k) и (l) Результаты моделирования в дальней зоне для режимов OAM +1 и +2. Отчетливо виден центральный нуль.

Теперь оператор может напрямую управлять ЕВСМ для различных электромагнитных функций, включая отклонения луча, генерацию луча с OAM и контроль RCS, как показано на Рис. 11с. Результаты моделирования этих функций представлены на Рис. 11d-11m. Например,

мы иллюстрируем результат вертикально отраженного одиночного луча, генерируемого однородной фазовой диаграммой на Рис. 11d, и результаты трех углов отклонения на Рис. 11e-g, где смоделированные данные четко указывают направления рассеяния 15° , 30° и

45°, что свидетельствует о большом совпадении с измеренными направлениями, отмеченными красным крестом. В регулировке уровня RCS четыре кнопки RCS от "01" до "04" будут генерировать рассеянные поля, представленные на Рис. 11*i-l*, показывающие уровни рассеяния -15 дБ, -12 дБ, -9 дБ и -6 дБ соответственно. Для генерации пучка ОАМ мы наблюдаем два поля рассеяния двух мод ОАМ (+1 и +2) на Рис. 11*b* и 11*m*, на которых отчетливо наблюдается ноль центральной амплитуды.

5.5. К НОВЫМ ПОКОЛЕНИЯМ БИОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТНЫХ СИСТЕМ

Таким образом, на основе платформы ЕВСМ в [31] показано, что оператор больше не нуждается в каких-либо мышечных действиях, а только смотрит на конкретную визуальную кнопку для соответствующего последовательного стимула, который может быть распознан ЕВСМ и преобразован в соответствующие электромагнитные сигналы для связи. Продемонстрированы три типовые схемы с различными функциями, включая визуальное сканирование луча, множественное переключение электромагнитных функций и ввод шаблона МП, который содержит более 20 шаблонов кодирования для различных однолучевых сканирований, формирований нескольких лучей, генерации ОАМ-луча и контроль RCS. Представленная работа, объединяющая электромагнитное волновое пространство и ВСИ, может открыть новое направление для изучения глубокой интеграции метаповерхности, интеллекта человеческого мозга и искусственного интеллекта с целью создания новых поколений биоинтеллектуальных метаповерхностных систем.

6. ПРОГРАММИРУЕМАЯ МП ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

6.1. НЕБОЛЬШОЕ ПРЕДИСЛОВИЕ

Программируемые и информационные МП продемонстрировали большой потенциал в беспроводной связи, но работ по шифрованию этой связи сейчас немного. Хотя архитектуру обычных радиочастотных передатчиков можно значительно упростить, применив новую

представленную автором выше технологию [30,31], однако, насколько нам известно, эти исследования сводятся лишь к незащищенной прямой передаче информации, а исследования технологии шифрования информации на основе этой беспроводной связи нового типа все еще очень ограничены. В работе [32] предложена программируемая поляризационно-модулированная (РоМ) информационная МП, которая может не только получать произвольно линейно поляризованные отраженные волны, но и модулировать их амплитуды в реальном времени. Кроме того, предлагается схема шифрования беспроводной связи путем введения метаключа с использованием программируемой МП информации РоМ.

Затем метаключ кодируется и шифруется путем сокрытия его кодов в различных поляризационных каналах в соответствии с протоколом шифрования и отправляется пользователю с использованием программируемой МП информации РоМ на передающем конце. В месте приема пара поляризационных дискриминаторных антенн (РДА) предназначена для приема и декодирования зашифрованных сигналов метаключа. Как только пользователь получает метаключ, зашифрованная целевая информация может быть восстановлена. Результаты показывают, что предлагаемая программируемая МП информации РоМ не только может достичь хорошей производительности модуляции поляризации, но и показывает хорошие потенциалы в шифровании коммуникаций, что может значительно повысить безопасность беспроводной связи.

6.2. СХЕМА ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МП

На Рис. 12 показана концептуальная иллюстрация схемы шифрования беспроводной связи, основанной на программируемой МП РоМ [32]. На передающем конце целевое изображение, такое как изображение рыси, шифруется с помощью метаключа и предварительно отправляется Бобом – Рис. 12*a*. Поэтому, даже если зашифрованная информация будет перехвачена,

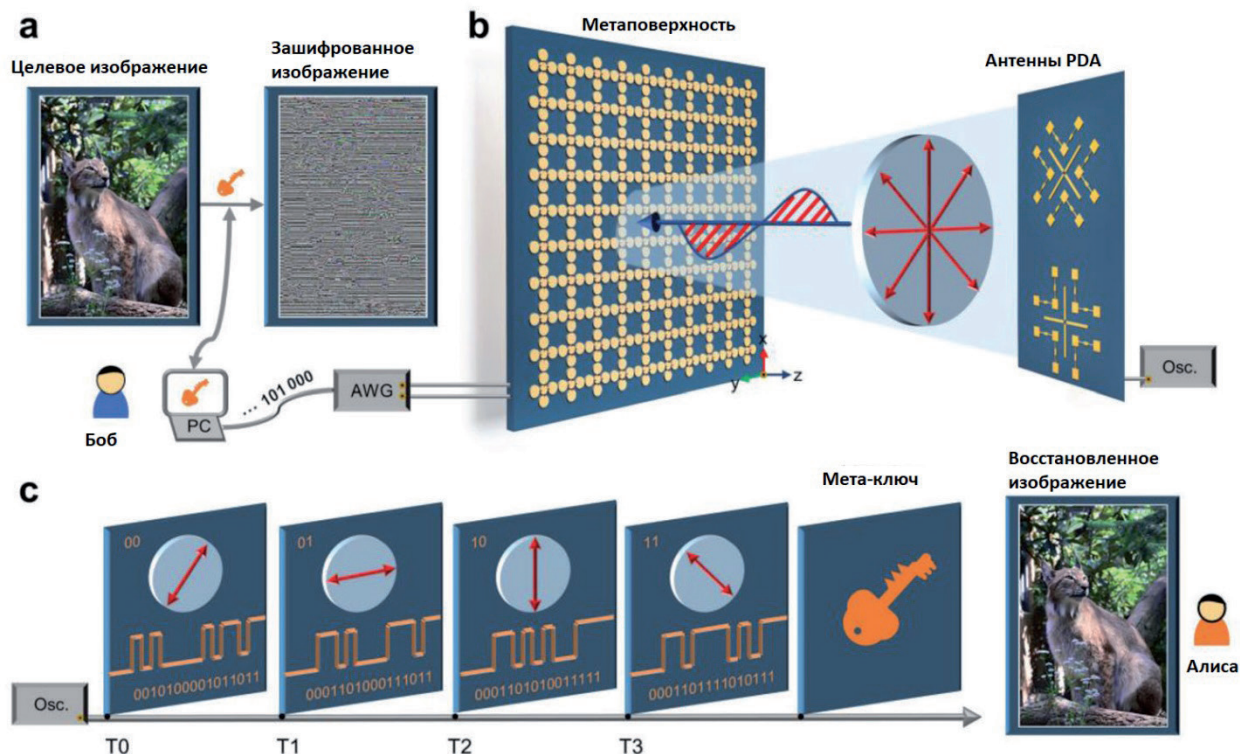


Рис. 12. Концептуальная иллюстрация схемы шифрования беспроводной связи на основе программируемой информационной МП RoM [32]: а) Целевое изображение шифруется с помощью метаключа для создания зашифрованного изображения. б) МП RoM, управляемая напряжением, шифрует и отправляет метаключ, а пара антенны поляризационной дискриминации, подключенных к осциллографу, принимает и идентифицирует сигналы. в) Метаключ расшифровывается сигналами, полученными от четырех различных каналов поляризации, а затем с помощью метаключа может быть восстановлен целевой зашифрованный образ. (Фото: Hai Lin Wang, Southeast University).

расшифровать ее без метаключа невозможно. Однако для того, чтобы Алиса могла получить правильную информацию о цели, метаключ также должен быть отправлен Алисе безопасным образом, за исключением зашифрованной информации о цели, и эта операция может быть реализована с использованием программируемой информационной МП RoM, как показано на Рис. 12b. МП нагружена PIN-диодами, а ее амплитуда и фаза отражения в вертикальном и горизонтальном направлениях могут независимо контролироваться в режиме реального времени путем регулировки состояния PIN-диодов. Следовательно, когда на МП попадает падающая волна с 45-градусной поляризацией, угол поляризации линейно поляризованной отраженной волны может быть произвольно отредактирован. Кроме того, можно дополнительно модулировать амплитуду отраженной волны в каждом поляризационном канале. В пункте приема

две PDA, подключенные к осциллографу, используются для приема сигналов (т.е. модулированной отраженной волны), которые могут не только идентифицировать состояние поляризации отраженной волны, но и получить двоичную кодирующую последовательность на основе амплитудной манипуляции в каждый канал поляризации, как показано на Рис. 12c. Стоит отметить, что эти четыре кодирующие последовательности передаются с использованием различных поляризационных каналов, и двоичные коды метаключа скрыты в этих последовательностях. Таким образом, Алиса может декодировать полученный сигнал для получения метаключа в соответствии с согласованным протоколом шифрования, а затем использовать его для восстановления целевого изображения.

6.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис. 13a показан единичный элемент предлагаемой программируемой

информационной МП PoM [32], состоящей из трех металлических слоев, разделенных двумя диэлектрическими подложками. Пять металлических круглых накладок, нагруженных PIN-диодами в верхнем слое, подключены к фидерным линиям в нижнем слое через металлизированные сквозные отверстия, так что на PIN-диоды может подаваться напряжение смещения. Эквивалентная схема PIN-диода (Skyworks SMP1321-040LF) приведена в правом углу Рис. 13а. Это параллельная цепь из постоянного конденсатора ($C = 0.15$ пФ) и переменного резистора; резисторы вдоль

направлений x и y определены как R_{dx} и R_{dy} соответственно. Значения R_{dx} и R_{dy} контролируются напряжениями смещения V_x и V_y , регулируемые по строкам и столбцам соответственно, и изменяются в диапазоне 1-10 000 Ом.

Геометрические параметры, показанные на Рис. 13а, составляют $p = 14.2$ мм, $a = 4.4$ мм и $b = 3.6$ мм. На Рис. 13б показано расположение фидерных линий на нижнем слое, в котором диаметр круглого пятна и расстояние между двумя фидерными линиями равны $c = 4$ мм и $d = 5.8$ мм соответственно. Диэлектрические подложки

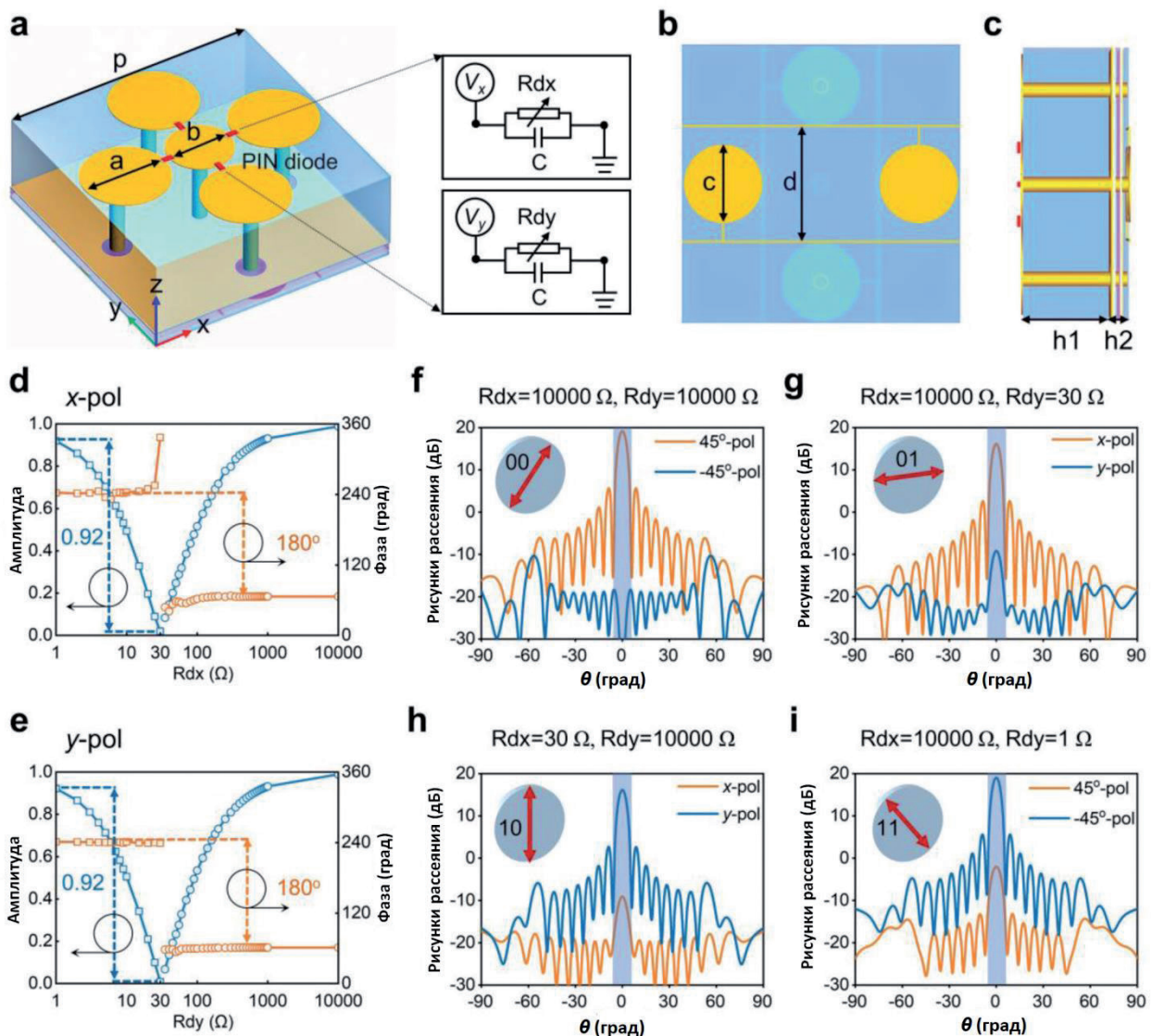


Рис. 13. Дизайн прототипа и результаты моделирования [32]: а-с) Единичный элемент метаповерхности PoM, нагруженный четырьмя PIN-диодами: а) вид спереди, б) вид снизу и с) вид сбоку. д, е) Моделируемые амплитуды и фазы отражения от МП, меняющиеся в зависимости от R_d на частоте 10 ГГц: д) x -поляризованная волна, е) y -поляризованная волна. ф-и) Смоделированные картины 2D отражения излучения в дальней зоне для четырех состояний линейной поляризации: ф) поляризация $+45^\circ$, г) поляризация x , б) поляризация y , и) поляризация -45° .

представляют собой F4B (политетрафторэтилен) с относительной диэлектрической проницаемостью 2.2 и тангенсом угла потерь 0.001, толщина которых составляет $b_1 = 4$ мм и $b_2 = 0.254$ мм, как показано на Рис. 13*c*. Согласно работе [33], в которой предложена и экспериментально продемонстрирована широкополосная программируемая МП, амплитудой и фазой отраженных электромагнитных волн можно независимо управлять путем регулировки напряжения смещения PIN-диода, интегрированного в метаатом, в режиме реального времени в широком диапазоне частот. На Рис. 13*d* и 13*e* показаны результаты моделирования амплитуды и фазы отражения единичного элемента с R_{dx} и R_{dy} на частоте 10 ГГц при x - и y -поляризованной волне соответственно. Результаты показывают, что нормированная амплитуда отраженной волны, поляризованной по оси x (или y), может непрерывно контролироваться от 1 до 0, когда R_{dx} (или R_{dy}) увеличивается от 1 до 30 Ом или уменьшается от 10000 до 30 Ом, разность фаз отраженных волн в этих двух областях держится около 180° . Кроме того, предлагаемый модульный элемент также имеет широкополосные характеристики и может работать в диапазоне частот 9-11 ГГц.

Когда волна с 45-градусной поляризацией освещает МП, угол поляризации отраженной волны можно произвольно настроить, контролируя амплитуду и фазу компонентов x - и y -поляризации. На Рис. 13*f-i* показаны результаты моделирования волн отражения с поляризацией 45° , x , y и -45° , где МП состоит из 20×20 элементов с общим размером 284×284 мм². Когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = R_{dy} = 10000$ Ом, обе компоненты поляризации x и y эффективно отражаются и имеют одинаковую амплитуду и фазу, поэтому отраженная волна имеет одинаковую с падающей волной поляризацию, то есть поляризацию 45° , как показано на Рис. 2*f*. Когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 10000$ Ом и $R_{dy} = 30$ Ом соответственно, эффективно отражается только компонента поляризации x ; тогда как компонента поляризации y полностью поглощается, поэтому отраженная волна будет

с поляризацией x , как показано на Рис. 2*g*. Аналогично, когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 30$ Ом и $R_{dy} = 10000$ Ом соответственно, эффективно отражается только компонента поляризации y , в то время как компонента поляризации x полностью поглощается, отраженные волны будут с y -поляризацией, как показано на Рис. 2*h*. Однако когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 10000$ Ом и $R_{dy} = 1$ Ом соответственно, компоненты поляризации x и y эффективно отражаются с одинаковой амплитудой, но имеют разность фаз 180° , поэтому отраженная волна будет представлять собой кросс-поляризацию падающей волны, то есть поляризацию -45° , как показано на Рис. 2*i*. Стоит отметить, что хотя продемонстрированы только четыре частных случая, отраженная волна с произвольным углом поляризации может быть получена путем точного управления амплитудой и фазой x - и y -компонент отражения. В работе [32] для схемы шифрования используются каналы поляризации 45° , x , y и -45° , которые кодируются как поляризационные коды "00", "01", "10" и "11" соответственно. Кроме того, когда левосторонняя циркулярно поляризованная волна освещает МП, поляризационная эллиптичность ее отраженной волны также может быть произвольно настроена путем управления амплитудой и фазой компонентов x - и y -поляризации.

6.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Программируемая информационная МП RoM изготовлена и измерена в безэховой камере [32], как показано на Рис. 14, где метаповерхность состоит из 20×20 элементов общим размером 284×284 мм², а PIN-диоды вдоль горизонтального и вертикального направлений независимо управляются двумя напряжениями смещения. На Рис. 14*a* показана экспериментальная установка для измерения амплитуды и фазы отражения, в которой две прямоугольные рупорные антенны размещены на расстоянии 1.5 м от МП для излучения и приема сигналов соответственно. Фотография одного из блоков представлена на Рис. 14*b*, на котором сверху показан элемент блока, нагруженный PIN-диодами, а снизу показана структура фидерных линий. На Рис. 14*d* показаны результаты измерения амплитуды

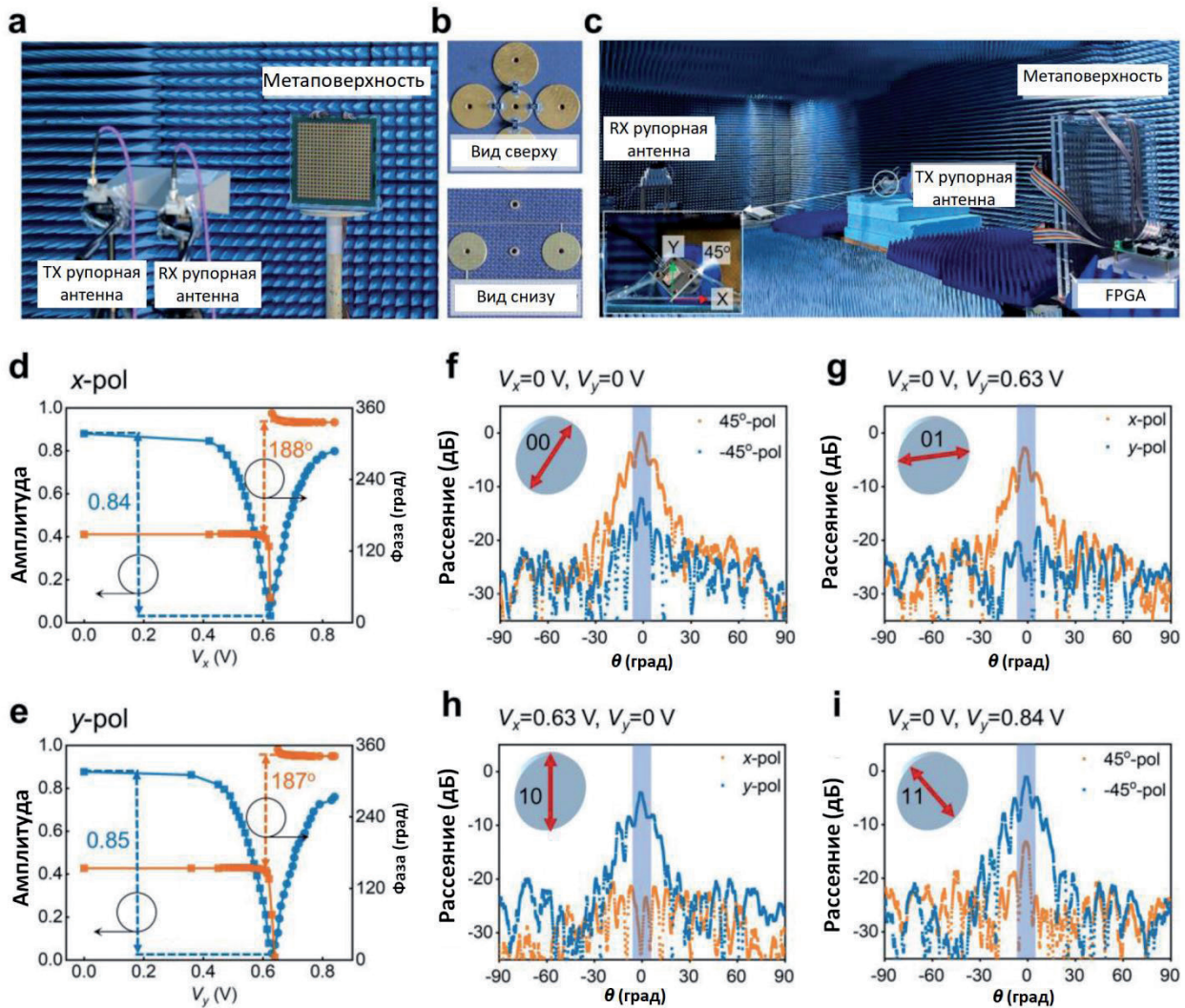


Рис. 14. Экспериментальные результаты МП PoM [32]: а) Экспериментальная установка для измерения коэффициентов отражения в безэховой камере. б) Вид сверху и снизу на один элемент блока. в) Измерение характеристик МП. д, е) Измеренные амплитуды и фазы отражения от МП при различных напряжениях смещения при зондировании д) x -поляризованными и е) y -поляризованными волнами на частоте 10 ГГц. ф-и) Измеренные 2D диаграммы направленности для четырех состояний линейной поляризации: ф) поляризация 45° , г) поляризация x , б) поляризация y и и) поляризация -45° .

и фазы x -поляризованной волны отражения на частоте 10 ГГц. Когда напряжение смещения V_x непрерывно изменяется от 0 до 0.84 В, амплитуда отраженной волны может плавно регулироваться от 0.02 до 0.87, при этом фаза может независимо переключаться между двумя фазами с разницей около 188° . Аналогичный результат можно получить и для y -поляризованной волны, как показано на Рис. 14е. Результаты измерений хорошо согласуются с результатами моделирования, показанными на Рис. 13с,д. Кроме того, широкополосные характеристики МП также были подтверждены измерениями.

Диаграммы направленности в дальней зоне программируемой информационной МП PoM

измеряются в стандартной микроволновой безэховой камере для проверки эффективности модуляции поляризации, как показано на Рис. 14с. МП помещается на вращающуюся платформу, а линзовая антенна из метаматериала x -диапазона размещается на расстоянии 80 см от МП, чтобы генерировать падающую плоскую волну с 45° -градусной поляризацией. Стандартная прямоугольная рупорная антенна X -диапазона закреплена на другой стороне безэховой камеры в качестве приемника, где расстояние между приемной рупорной антенной и вращающейся платформой составляет около 10 м. Измеренные диаграммы направленности различных линейно поляризованных отраженных волн в дальней

зоне при различных напряжениях смещения показаны на Рис. 14*f-i*. Когда напряжения смещения PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $V_x/V_y = 0/0, 0/0.63 \text{ В}, 0.63 \text{ В}/0$ и $0/0.84 \text{ В}$, отраженная волна будет иметь поляризацию $45^\circ, x, y$ и -45° соответственно.

6.5. Метаключ на основе МП РоМ

Блок-схема шифрования метаключа на основе МП РоМ показана на **Рис. 15** [32]. Метаключ состоит из двух 8-битных двоичных чисел P и S (Рис. 15*a*), в котором M -я строка и N -й элемент столбца матрицы метаключа достигаются

операцией исключающего ИЛИ (XOR) для M -го элемента S и N -го элемента P .

На Рис. 15*b* показано правило кодирования P и S . В этой схеме шифрования P кодируется как 00011011, представляя информацию о каналах поляризации, в которых коды "00", "01", "10" и "11" соответствуют каналам поляризации $45^\circ, x, y$ и -45° соответственно. S может быть любой двоичной последовательностью, которая в данном случае закодирована как 8-битное двоичное число 01110010. Чтобы избежать легкого перехвата информации S , в [32] вводится четыре других 8-битных двоичных числа $N1, N2, N3$ и $N4$, в которых $N1, N2$ и $N3$ могут быть

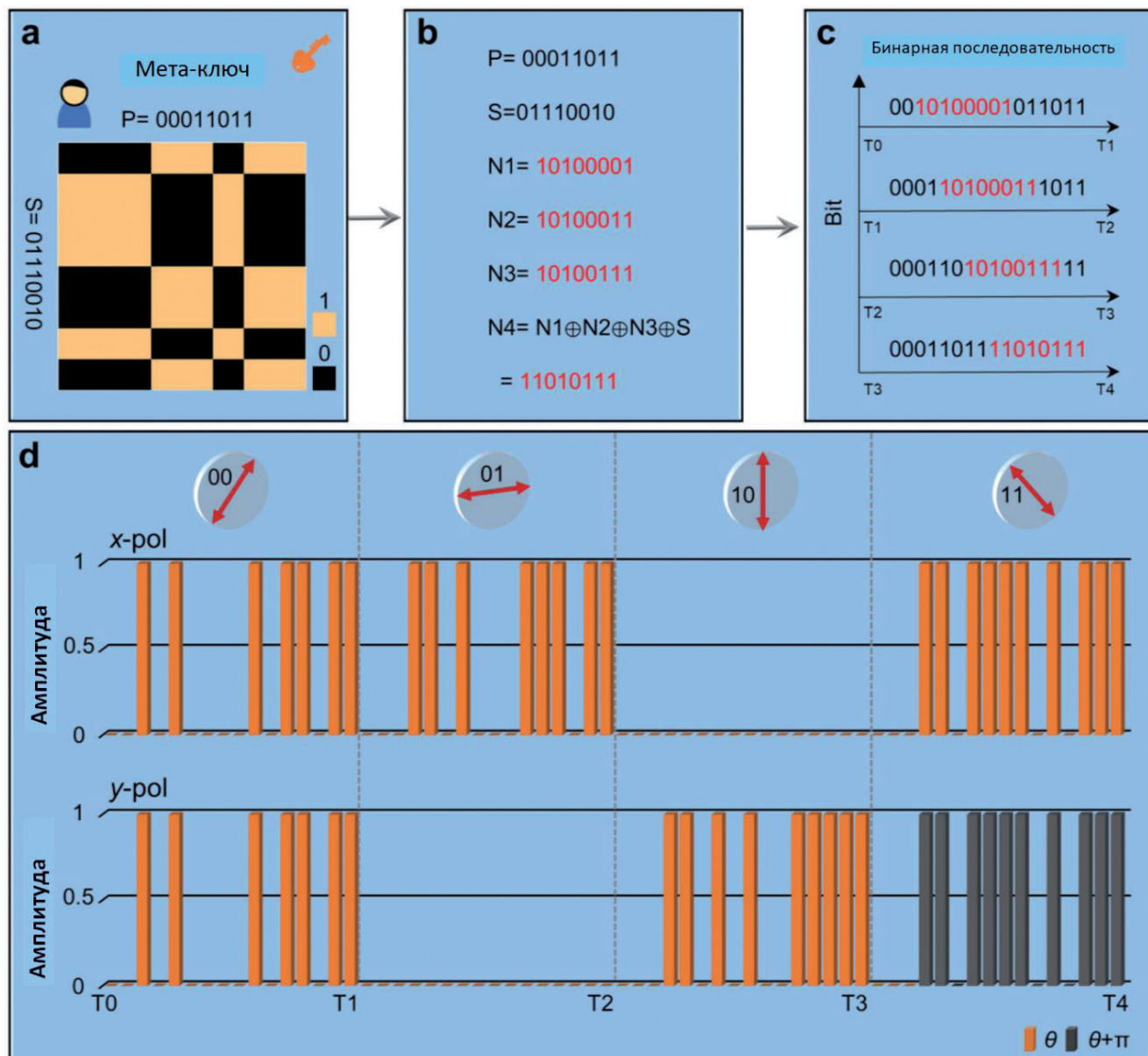


Рис. 15. Процесс шифрования схемы беспроводной связи с шифрованием РоМ [32]: а-с) Процесс шифрования с четырьмя двоичными последовательностями в качестве метаключа. д) Два ортогональных входных сигнала напряжения x - и y -поляризованных волн при разных каналах линейной поляризации соответственно.

случайными 8-битными двоичными числами, а $N_4 = S \oplus N_1 \oplus N_2 \oplus N_3$ ("⊕" – символ исключающего ИЛИ). Для дальнейшего повышения безопасности метаключа мы вставляем N_1, N_2, N_3 и N_4 в последовательность P соответственно, чтобы сгенерировать четыре 16-битные двоичные последовательности, в которые вставлены N_1, N_2, N_3 и N_4 после кодов канала поляризации "00", "01", "10" и "11" соответственно, а затем эти четыре 16-битных двоичных числа отправляются циклически по очереди с использованием соответствующего канала поляризации через МП РоМ, как показано на Рис. 15с. Взяв в качестве примера канал поляризации x , $N_2 = 10100011$ вставляется после кода "01" P для генерации нового 16-битного двоичного числа 0001101000111011, которое отправляется с использованием канала поляризации x в течение периода времени T_1 – T_2 . Для этого 16-битного двоичного числа мы переопределяем значения кодов "0" и "1", которые представляют сигналы низкого и высокого уровня, соответствующие амплитуде электромагнитной волны в каждом поляризационном канале, то есть низкое отражение представляет собой код "0" и высокое отражение – код "1".

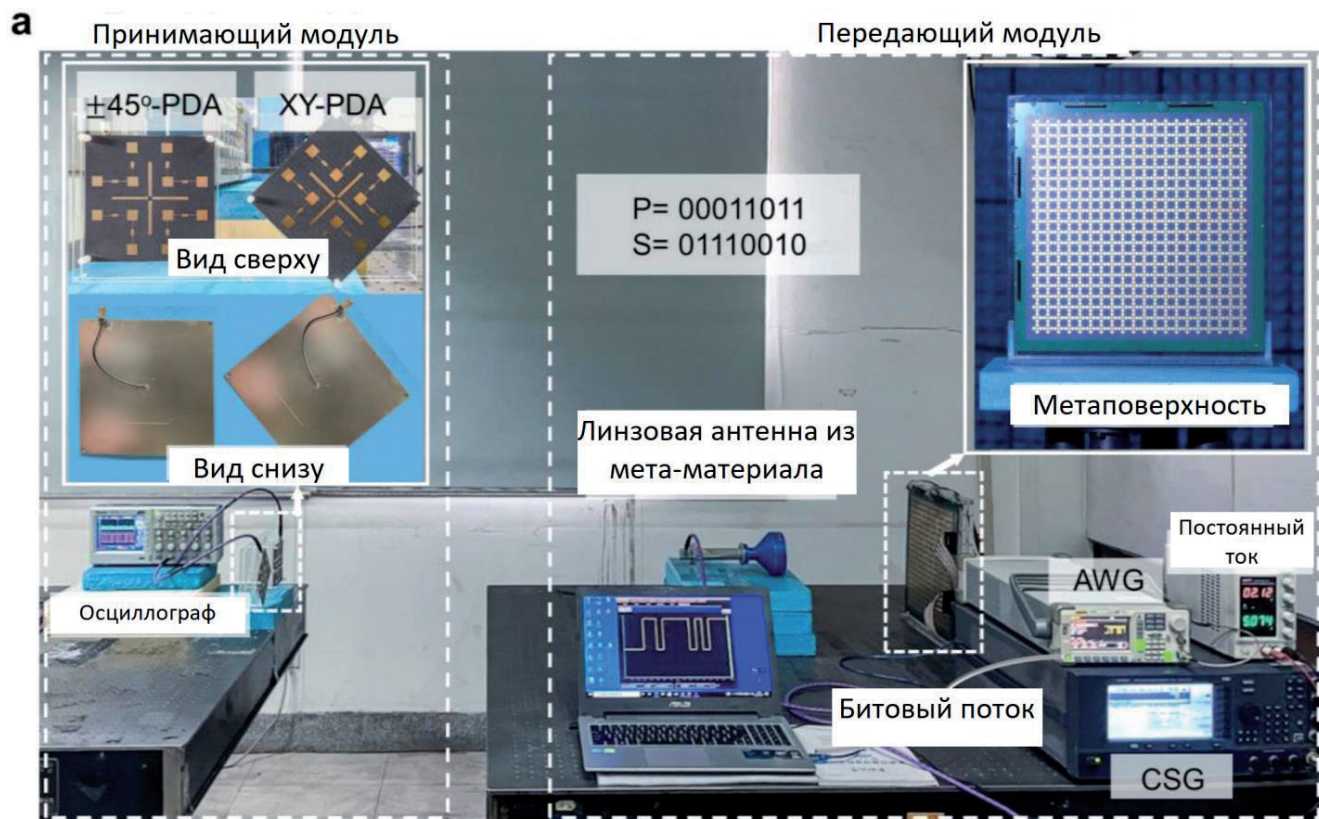
На Рис. 15d показаны требуемые распределения амплитуды и фазы x - и y -поляризованных волн относительно соответствующей кодирующей последовательности в каждом поляризационном канале в течение временного интервала T_0 – T_4 . Стоит отметить, что высота прямоугольного параллелепипеда представляет собой амплитуду электромагнитных волн, а оранжевый и черный цвета указывают на то, что их фазы равны θ и $\theta + \pi$ соответственно. Взяв в качестве примера канал с поляризацией 45° , амплитуда и фаза x - и y -поляризованных волн должны быть одинаковыми, чтобы обеспечить электромагнитную волну с поляризацией 45° , а затем амплитуда электромагнитной волны с поляризацией 45° дополнительно модулируется для изменения со временем, генерируя требуемую кодирующую последовательность 0010100001011011, как показано в периоде времени T_0 – T_1 на Рис. 15d. Кодирующие последовательности в других каналах

поляризации реализуются с использованием аналогичного метода, который также показан на Рис. 15d.

6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С РОМ-ШИФРОВАНИЕМ

Система беспроводной связи была создана на основе предложенной программируемой информационной МП РоМ для реализации вышеупомянутой схемы шифрования в сценарии внутри помещения, как показано на Рис. 16a [32]. Она состоит из передающего модуля и приемного модуля, в котором передающий модуль состоит из линзовой антенны из метаматериала, МП РоМ, генератора несущего сигнала (Keysight E8267D), анализатора спектра (Keysight N9040B), генератора сигналов произвольной формы (AWG) (Rigol DG5101) и стабилизированного источника питания постоянного тока, а приемный модуль состоит из осциллографа и пары поляризационных дискриминаторных антенн (PDA). В передающем модуле линзовая антенна из метаматериала размещается на расстоянии 35 см от МП для генерации падающей плоской волны с 45° -градусной поляризацией, которую можно рассматривать как несущую с рабочей частотой f_c ; стабилизированный источник питания AWG постоянного тока подключен к МП для подачи напряжения смещения на PIN-диоды. Стоит отметить, что два генератора сигналов произвольной формы потребовались для обеспечения регулируемых по строкам и столбцам регулируемых напряжений смещения для МП в реальном времени, соответственно, но, поскольку был только один генератор сигналов произвольной формы, в эксперименте вместо другого генератора сигналов произвольной формы используется стабилизированный источник питания постоянного тока. Изменяющееся во времени напряжение смещения подается на МП через AWG для реализации модуляции поляризации и амплитуды отраженной волны в реальном времени, чтобы получить желаемый поляризационный канал и соответствующую ему кодирующую последовательность.

В приемном модуле на расстоянии 160 см от МП РоМ размещается пара PDA для приема сигнала, которые подключаются к



±45°-КПК		XY-КПК	
	x- pol, $V_{mul} = 0$		x- pol, $V_{mul} < 0$
	y- pol, $V_{mul} = 0$		y- pol, $V_{mul} > 0$
	45°- pol, $V_{mul} < 0$		45°- pol, $V_{mul} = 0$
	-45°- pol, $V_{mul} > 0$		-45°- pol, $V_{mul} = 0$

Рис. 16. Экспериментальная установка системы беспроводной связи PoM [32]: а) Испытательный стенд системы, фотографии МП и фотографии вида сверху и снизу ±45°-PDA и XY-PDA, соответственно. б) Выходные напряжения двух PDA в разных состояниях линейной поляризации.

двухканальному осциллографу. Фотографии PDA отображаются в верхнем левом углу Рис. 16а, на котором два PDA размещены с относительным углом поворота 45°, названные как ±45°-PDA и XY-PDA соответственно. На задней панели PDA четыре диода Шоттки с нулевым смещением (SMS7621-040LF) загружены на целевое кольцо для реализации двойного балансного ВЧ-умножителя. Когда PDA принимают сигналы, состояние поляризации сигнала можно сначала определить по выходному напряжению двух PDA, как показано на Рис. 16б. В частности, если выходные напряжения ±45°-PDA и XY-PDA имеют

большое отрицательное (или положительное) значение и нуль соответственно, сигнал будет иметь поляризацию 45° (или -45°), а если выходные напряжения ±45°-PDA и XY-PDA равны нулю и большому отрицательному (или положительному) значению, соответственно сигнал будет иметь x- или y-поляризацию. Как только поляризационное состояние сигнала определено, соответствующая кодирующая последовательность "0" и "1" в каждом поляризационном канале может быть дополнительно получена с помощью выходных напряжений низкого и высокого уровня, обнаруженных осциллографом.

6.7. ОСОБЕННОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ

На Рис. 17а показаны изменяющиеся во времени последовательности напряжения смещения AWG и стабилизированного источника питания постоянного тока в эксперименте по управлению МП PoM, в котором 0.63 В соответствует низкому отражению, а 0 и 0.84 В соответствуют высокому отражению, но их разность фаз составляет 180° . Временной интервал для каждого кода $T/M = 0.0625$ мс ($T = 4$ мс, $M = 64$), поэтому скорость передачи данных при передаче составляет 16 кГц, а максимальная скорость передачи данных в основном зависит от скорости модуляции AWG и скорости переключения PIN-диода. Следует отметить, что одно из напряжений смещения (V_x или V_y) остается

неизменным в каждом поляризационном канале, поскольку в эксперименте оно обеспечивается стабилизированным источником постоянного тока. На Рис. 17б показаны выходные напряжения $\pm 45^\circ$ -PDA и XY-PDA, измеренные осциллографом в четырех различных периодах времени. Поляризацию сигнала можно сначала идентифицировать по соотношению между выходными напряжениями $\pm 45^\circ$ -PDA и XY-PDA в соответствии с правилом, показанным на Рис. 16б. Таким образом, мы можем знать, что сигналы, показанные на Рис. 17б, имеют поляризацию 45° , x -, y - и -45° слева направо. Стоит отметить, что сигнал, принимаемый XY-PDA, намного больше нуля в каналах поляризации 45° ("00") и -45° ("11"), которые должны быть близки к нулю, как

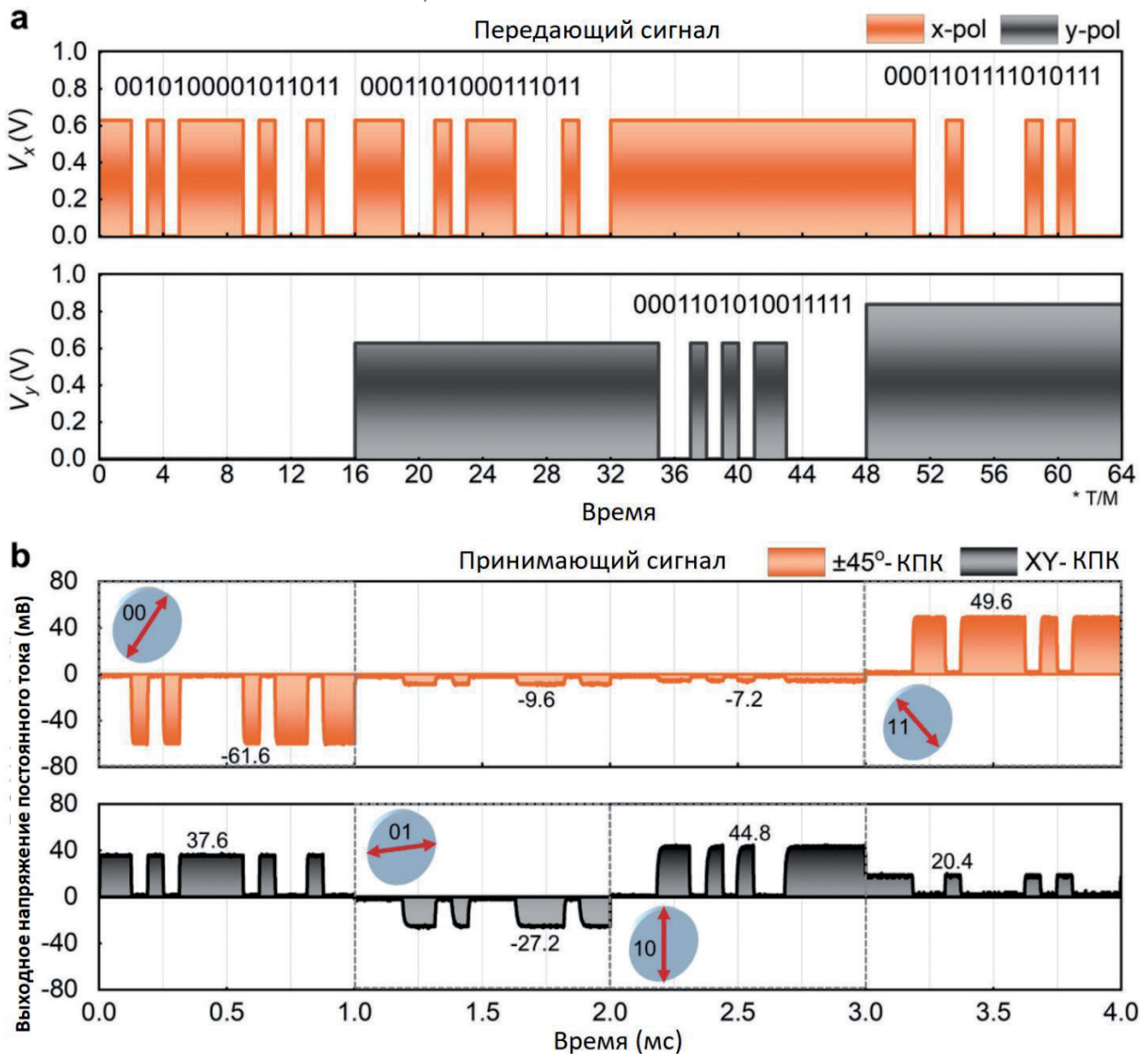


Рис. 17. Формы передающих и принимаемых сигналов [32]: а) Изменяющиеся во времени напряжения смещения модуля AWG для управления МП PoM. б) Измеренные выходные напряжения постоянного тока двух PDA под управлением AWG.

показано на Рис. 16*b*. Причина этого результата заключается в том, что напряжение смещения для управления u -поляризованной волной в этих двух случаях обеспечивается стабилизированным источником питания постоянного тока, который установлен на фиксированное напряжение 0 и 0.84 В, соответственно, поэтому компонента u -поляризации не может быть устранена. Эту проблему можно решить, используя другой генератор произвольной формы вместо стабилизированного источника питания постоянного тока. Зная каналы поляризации, в соответствии с протоколом шифрования, показанным на Рис. 15, мы можем извлечь N_1 , N_2 , N_3 и N_4 после кодов "00" в канале поляризации 45° , "01" в канале поляризации x , "10" в канале поляризации y и "11" в канале поляризации -45° , соответственно. Кроме того, мы можем определить, верны ли результаты извлечения, проверив, равны ли оставшиеся 8-битные двоичные числа во всех каналах $P = 00011011$. Затем S можно получить с помощью побитовой операции исключающего ИЛИ над N_1 , N_2 , N_3 и N_4 . Следовательно, согласно вышеуказанным правилам, потоки двоичного кодирования 0010100001011011, 0001101000111011, 0001101010011111 и 0001101111010111 в четырех различных поляризационных каналах могут быть сначала считаны из результатов измерений, показанных на Рис. 17*b*, соответственно, а затем $N_1 = 10100001$, $N_2 = 10100011$, $N_3 = 10100111$ и $N_4 = 11010111$ могут быть дополнительно извлечены для получения конечного $P = 00011011$ и $S = N_1 \oplus N_2 \oplus N_3 \oplus N_4 = 01110010$. Затем матрица метаключа может быть получена путем выполнения операции исключающего ИЛИ для P и S , как показано на Рис. 15*a*. Наконец, зашифрованный образ рыси можно восстановить с помощью метаключа.

Кроме того, в [32] дополнительно исследована отказоустойчивая производительность метаключа. Результаты показывают, что целевое изображение также можно приблизительно наблюдать, если в процессе приема $N_1 - N_4$ есть только одно- или двухбитовая ошибка, но разрешение изображения будет становиться все ниже и ниже по мере увеличения частоты битовых ошибок, и изображение становится полностью неузнаваемым, когда число кодов

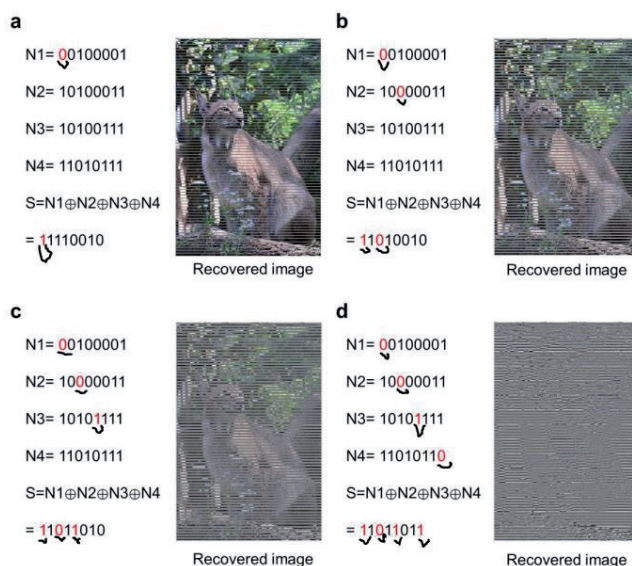


Рис. 18. Восстановленное изображение с неверным метаключом [32]: а) Однобитовая ошибка. б) Двухбитовая ошибка. в) Трехбитовая ошибка. г) Четырехбитовая ошибка.

ошибок достигает четырех – **Рис. 18**, где от руки выделены неправильные символы [32].

Таким образом, в [32] предложена программируемая информационная МП РоМ и показано ее применение для шифрования беспроводной связи с помощью метаключа. В этой схеме метаключ отправляется пользователю независимо в режиме реального времени, его можно динамически настраивать для различных сообщений для повышения безопасности. Система беспроводной связи, включающая передающий и принимающий модули, была также построена для демонстрации осуществимости схемы шифрования. Этот подход предлагает недорогое решение для реализации беспроводной сети связи с шифрованием РоМ, которая не нуждается в антенных решетках, фильтрах и смесителях. В работе [32] представлена новая концепция передачи информации на основе программируемой МП, которая может найти большой потенциал в следующем поколении шифрования информации.

7. ОПТИЧЕСКОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ С ПОМОЩЬЮ МП

7.1. Вводная часть

В Разделе 4 данной работы уже шел разговор об оптическом шифровании информации

с использованием МП. Здесь можно только заметить, что для большинства методов шифрования, основанных на МП, информация шифруется в МП физических форм, что ограничивает обмен информацией и совместимость с технологией цифровой обработки информации. Однако, как пространство Фурье, так и реальное пространство могут одновременно использоваться в качестве каналов шифрования.

В работе [34] предложена и экспериментально продемонстрирована альтернативная схема оптического шифрования с МП, работающими как аналоговые оптические информационные процессоры для оптических изображений. Таким образом, информация может быть удобно передана, расшифрована и обработана с помощью изображений программным способом, в отличие от аппаратных МП. Это достигается путем модуляции пространственных частот оптических изображений МП. В [34] подтверждено, что как интенсивность, так и фаза пространственной частоты светового поля могут модулироваться МП для кодирования информации. Затем информация может быть получена путем проведения преобразования Фурье для зашифрованных изображений. Кроме того, было показано, что пространственные частоты оптических изображений могут обеспечить достаточные каналы для увеличения информационной емкости. Поскольку информация может быть просто и непосредственно привязана к МП, предлагаемая схема также может избежать тщательного проектирования МП с помощью сложного алгоритма в традиционной метаповерхностной голограмме. Самое главное, поскольку информация шифруется в изображениях, отличных от МП, обмен информацией является более гибким, даже совместимым с современными технологиями обработки информации. Поэтому предлагаемый способ может предложить еще одну перспективную платформу для оптического шифрования с МП.

7.2. РАБОЧИЕ ПРИНЦИПЫ

Как показано на **Рис. 19a** [34], рассматривая случай, когда объект освещается когерентным лазерным лучом, результирующая картина двумерного светового поля в виде оптического

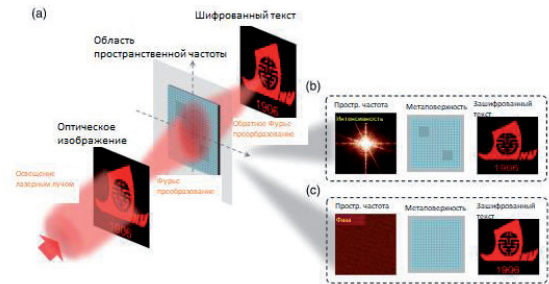


Рис. 19. Концепция пространственно-частотного шифрования [34]: (a) Схема процесса оптического шифрования. Оптическое изображение как носитель информации получается при лазерном освещении, и доступ к его пространственно-частотной области можно получить после преобразования Фурье. Информация, подлежащая шифрованию, загружается в пространственно-частотную область с помощью МП, а изображение зашифрованного текста получается с помощью обратного преобразования Фурье. (b) Шифрование интенсивностью для пространственной частоты. Различные компоненты пространственной частоты могут быть изменены путем настройки передачи различных субдоменов (светлых и темных цветов) МП. Выходной зашифрованный текст подобен входному оптическому изображению с небольшим отличием. (c) Фазовое шифрование для пространственной частоты. Информация шифруется путем введения разностей фаз в пространственную частоту с помощью МП.

изображения может быть выражена с помощью его поля $\tilde{E}(x, y)$.

Интуитивно, информация может быть зашифрована непосредственно на изображении, но ее можно легко расшифровать. Для повышения безопасности зашифруем информацию в пространственно-частотной области изображений, отличной от области реального изображения. Этого можно достичь, применяя операцию преобразования Фурье к входному оптическому изображению, затем шифруя информацию с помощью МП и, наконец, получая зашифрованное оптическое изображение обратным преобразованием Фурье. Этот процесс можно кратко выразить как:

$$\tilde{E}_{out}(x, y) = F^{-1}\{\tilde{h}(u, v) \cdot F[\tilde{E}_{in}(x, y)]\}, \quad (1)$$

где \tilde{E}_{out} – электрическое поле зашифрованного оптического изображения, F и F^{-1} – операторы прямого и обратного Фурье-преобразования, $\tilde{h}(u, v)$ – оптическая передаточная функция (OTF), построенная МП в области пространственных частот.

Информация, подлежащая шифрованию, может быть непосредственно представлена МП в виде ОТГ, а затем передана при модуляции пространственных частот оптического изображения. Таким образом, почти невозможно получить информацию, наблюдая только изображение зашифрованного текста. Напротив, только путем правильного анализа измененной пространственной частоты изображения можно получить информацию. Следует отметить, что световая природа пространственных частот оптических изображений обеспечивает различные каналы шифрования, которые могут быть удобно адаптированы МП, поддерживающими различные ОТГ $\tilde{h}(u, v)$. Например, комплексная функция, построенная МП $\tilde{h}(u, v)$, обеспечивает две модулирующие степени свободы, а именно, интенсивность и фазу для шифрования, как схематично показано на Рис. 19b и 19c. Модуляция интенсивности проста и удобна $\tilde{h}(u, v)$, фазовая модуляция $\tilde{h}(u, v)$ может повысить безопасность. Следует также отметить, что $\tilde{h}(u, v)$ является функцией пространственной частоты и, следовательно, предоставляет еще один канал шифрования, в котором различные пространственные частоты могут быть настроены отдельно с помощью МП, увеличивая информационную емкость.

7.3. ШИФРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛА В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ

На практике интенсивность сигнала пространственной частоты можно модулировать, управляя пропусканием МП. С этой целью в [34] спроектировали и изготовили кремниевую МП с разным пропусканием в разных областях, которые обозначены как MS 1 и MS 2 на Рис. 20a. Пропускание можно регулировать, просто изменяя периоды и радиусы кремниевых наностолбиков на кремнеземной подложке.

Изображения изготовленной МП, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на Рис. 20b. Область MS 1 содержит 200×200 единиц размером около 75×75 мкм, а область MS 2 включает 50×50 единиц размером около 15×15 мкм. На Рис. 20c видно, что при заданной длине волны 633 нм можно получить большой контраст пропускания между различными

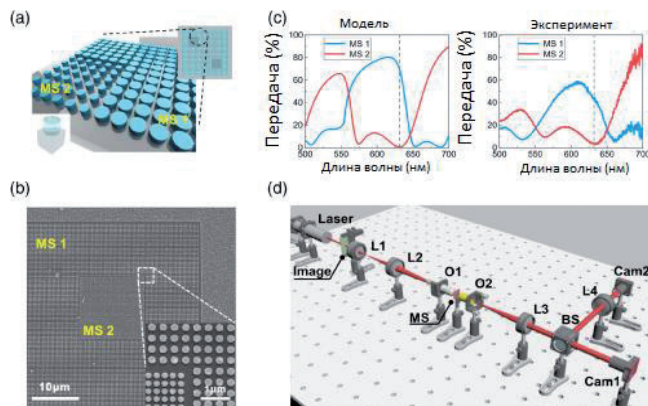


Рис. 20. МП для шифрования интенсивности и экспериментальная установка для шифрования [34]: (a) Схема МП с разным пропусканием в разных областях для MS 1 и MS 2. (b) SEM-изображение, показывающее часть изготовленной МП. (c) Смоделированные и экспериментальные спектры пропускания различных областей МП. Серая пунктирная линия указывает на целевую длину волны 633 нм. (d) Экспериментальная установка для реализации предлагаемого оптического шифрования. Здесь L1 - L4 - линзы; O1 и O2 - объективы; MS – метаповерхность МП; BS - светоделитель; Cam1 и Cam2 - фотоаппараты.

областями. Это означает, что МП может соответствующим образом модулировать интенсивности пространственных частот в отдельных областях, когда она помещена в область пространственных частот оптического изображения. Следовательно, информация может быть зашифрована в оптический образ с помощью МП. Например, информация о нулевом состоянии или квадратном шаблоне может быть представлена путем стирания пространственной частоты в области более низкой передачи. Для шифрования информации нами была разработана микроскопическая экспериментальная установка Фурье-оптики, как показано на Рис. 20d. С помощью этой настройки мы можем проецировать спектр пространственных частот оптического изображения на МП и захватывать как модулированную интенсивность пространственной частоты, так и выходное зашифрованное изображение, проверяя предложенный метод шифрования.

Результаты шифрования по интенсивности представлены на Рис. 21 [34]. В качестве изображения носителя информации выбираем логотип Jinan University, который показан на Рис. 21a [10,34]. Численно мы можем получить

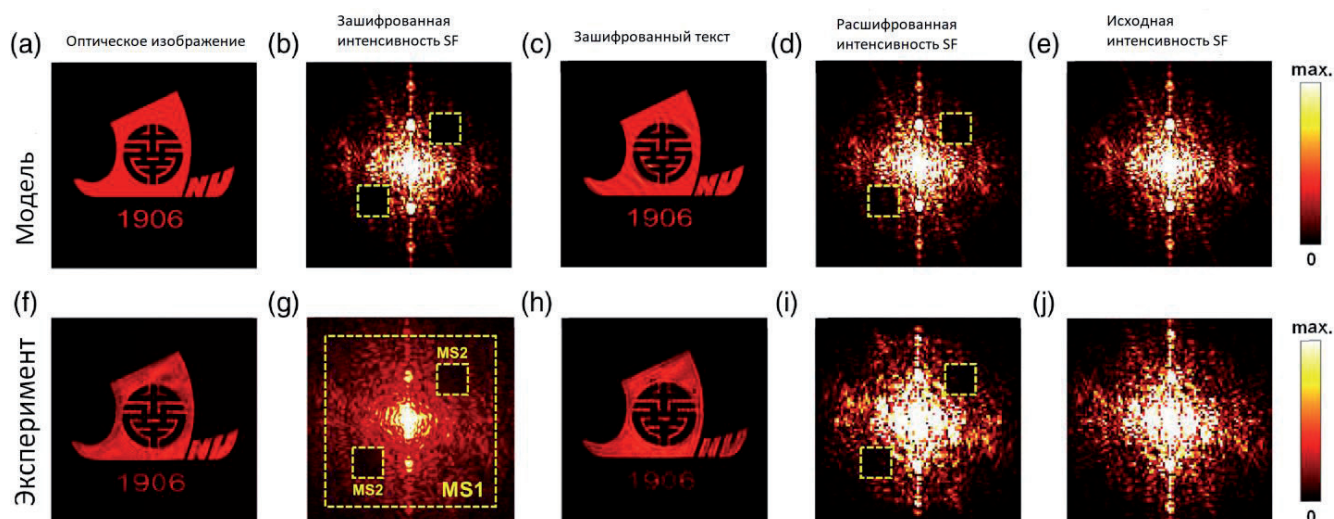


Рис. 21. Результаты моделирования и эксперимента по шифрованию и дешифрованию интенсивности пространственной частоты оптического изображения [34]: (a) Оптическое изображение как носитель информации. (b) Распределение интенсивности пространственной частоты после шифрования. Два желтых пунктирных прямоугольника обозначают зашифрованные области. (c) Выходное изображение зашифрованного текста после шифрования. (d) Распределение интенсивности пространственной частоты после расшифровки. Желтые пунктирные линии служат ориентиром для обозначения зашифрованных областей. (e) Распределение интенсивности пространственной частоты до расшифровки. (f)-(j) Соответствующие экспериментальные результаты.

картину интенсивности его пространственной частоты с помощью преобразования Фурье. Информация может быть зашифрована по пространственной частоте путем намеренной установки значения равным нулю в некоторых пространственных областях, как показано двумя желтыми пунктирными линиями на Рис. 21*b*. После этого мы можем получить изображение зашифрованного текста, представленное на Рис. 21*c* обратным преобразованием Фурье.

Хотя мы искусственно изменили пространственную частоту, зашифрованное изображение по-прежнему похоже на исходное, за исключением того, что появилась некоторая рябь. Найти зашифрованную информацию непосредственно из изображения затруднительно, если только не применить к нему преобразование Фурье, как в процессе расшифровки, результат которого показан на Рис. 21*d*. Для простоты сравнения мы представляем картину интенсивности пространственной частоты перед шифрованием на Рис. 21*e*. Две зашифрованные области легко идентифицировать, сравнивая шаблоны до и после шифрования, что указывает на осуществимость метода.

Для демонстрации предлагаемого метода оптического шифрования были проведены

соответствующие эксперименты. Входное оптическое изображение, представленное на Рис. 21*f*, получено путем освещения лазерным лучом вытравленного рисунка на золотой пленке. Пространственная частота изображения может быть сгенерирована с помощью линзы, выполняющей преобразование Фурье, а затем спроецирована на МП. Поскольку коэффициенты пропускания различны в разных областях МП, пространственная частота модулируется соответствующим образом, как показано на Рис. 21*g*. Большая часть света может пройти через область высокого пропускания MS 1, в то время как области низкого пропускания MS 2 будут заблокированы. Следовательно, информация может быть успешно зашифрована в пространственной частоте. Используя другую линзу для обратного преобразования Фурье, мы можем получить зашифрованное изображение, показанное на Рис. 21*h*. Зашифрованную информацию трудно найти непосредственно из зашифрованного изображения. Важно отметить, что зашифрованное изображение и зашифрованная информация могут быть гибко доставлены без аппаратного метаповерхностного носителя. Как только зашифрованное изображение будет получено, информацию можно расшифровать с помощью численного

преобразования Фурье на компьютере – Рис. 21*i*. Также показан экспериментальный результат картины интенсивности перед шифрованием на Рис. 21*j* для сравнения. Следует отметить, что расположение и площадь областей MS 2 строго не ограничены и могут быть изменены в соответствии с практическими потребностями.

7.4. ФАЗОВОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ

На практике безопасность шифрования интенсивности недостаточно высока, потому что информацию можно напрямую расшифровать, применив преобразование Фурье, и тогда паттерн интенсивности легко идентифицировать. Напротив, фазовый паттерн пространственной частоты обычно имеет случайное распределение, и исходный фазовый паттерн перед шифрованием необходим в качестве ключа для дешифрования, что является многообещающей степенью свободы для шифрования с более высокой безопасностью по сравнению с шифрованием интенсивности. В [34] показано, что метод шифрования, рассмотренный выше

для интенсивности, также может применяться для фазы пространственной частоты, за исключением того, что в качестве альтернативы используется фазовая МП. Спроектированная фазовая МП схематично показана на Рис. 22*a*, которая состоит из идентичных кремниевых наностолбиков на кремнеземной подложке. Периоды и радиусы наностолбиков отличаются от таковых в МП, используемых при шифровании интенсивности. Фазовая МП также покрыта толстым слоем полиметилметакрилата (ПММА). Вся МП содержит 200×200 единиц размером около 75×75 мкм. На Рис. 22*b* показаны как смоделированные, так и экспериментальные спектры пропускания МП. Пропускание на длине волны 633 нм относительно высокое, что обеспечивает минимально возможное изменение интенсивности. Важно отметить, что разность фаз вводится МП относительно окружающей среды. Для проведения экспериментов с фазовым шифрованием использовали ту же экспериментальную установку, что и для шифрования интенсивности, за исключением замены МП. После шифрования входного оптического изображения фазовой МП мы захватили зашифрованное оптическое изображение, а затем численно применили к нему операцию преобразования Фурье. Таким образом, мы можем получить как интенсивность, так и фазовое распределение пространственной частоты для расшифровки.

Последующие результаты шифрования показаны на Рис. 22*c* и 22*d*. Выходное зашифрованное изображение и его распределение интенсивности по пространственной частоте после шифрования аналогичны входному оптическому изображению и распределению интенсивности перед шифрованием. Это означает, что зашифрованную информацию трудно идентифицировать напрямую или путем применения преобразования Фурье с последующим наблюдением паттерна интенсивности, в отличие от случая шифрования интенсивности. Кроме того, также трудно найти зашифрованную информацию путем изучения фазового распределения пространственной частоты из-за его случайности, как показано на Рис. 22*d*. Чтобы расшифровать скрытую

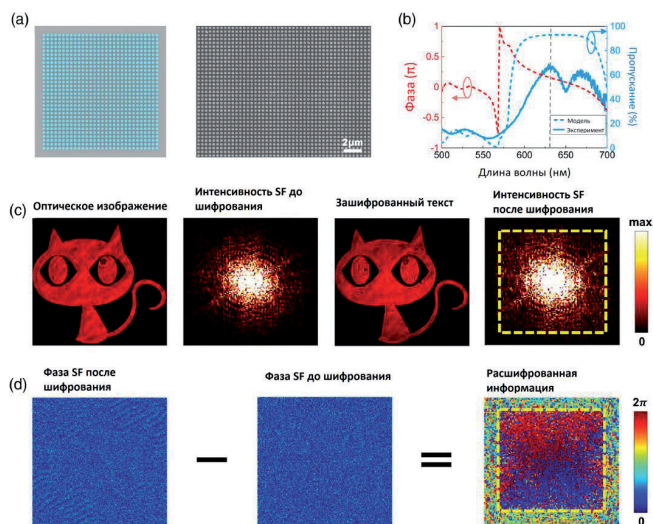


Рис. 22. Фазовая МП и экспериментальные результаты фазового шифрования и дешифрования [34]: (a) Схема и SEM-изображение фазовой МП. (b) Модельный (штриховая синяя линия) и экспериментальный (сплошная синяя линия) спектры пропускания, а также модельный фазовый спектр (штриховая красная линия) фазовой МП. (c) Оптические изображения и соответствующие распределения интенсивности пространственной частоты до и после шифрования. Желтая пунктирная рамка указывает на зашифрованную область. (d) Фазовое распределение пространственной частоты до и после шифрования. Расшифровка заключается в извлечении разности фаз между ними.

информацию, необходимо извлечь разность фаз между пространственными частотами до и после шифрования, поскольку МП вносит в основном разность фаз. Следовательно, без ключа исходного изображения расшифровка является огромной проблемой, что повышает безопасность по сравнению со случаем шифрования интенсивности.

7.5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ЧАСТОТНОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ШИФРОВАНИЯ

Увеличение количества информационных каналов является важной темой изучения

оптического шифрования. В предлагаемом методе даже отдельное изображение может обеспечить множество каналов из-за обилия пространственных частот. В принципе, каждая пространственная частота может действовать как один канал, но это обычно ограничено полученным диапазоном пространственных частот и другими практическими условиями. Тем не менее, в [34] доказано, что определенный диапазон пространственных частот может использоваться как один информационный канал. На Рис. 23 показано одно из правил шифрования и соответствующие

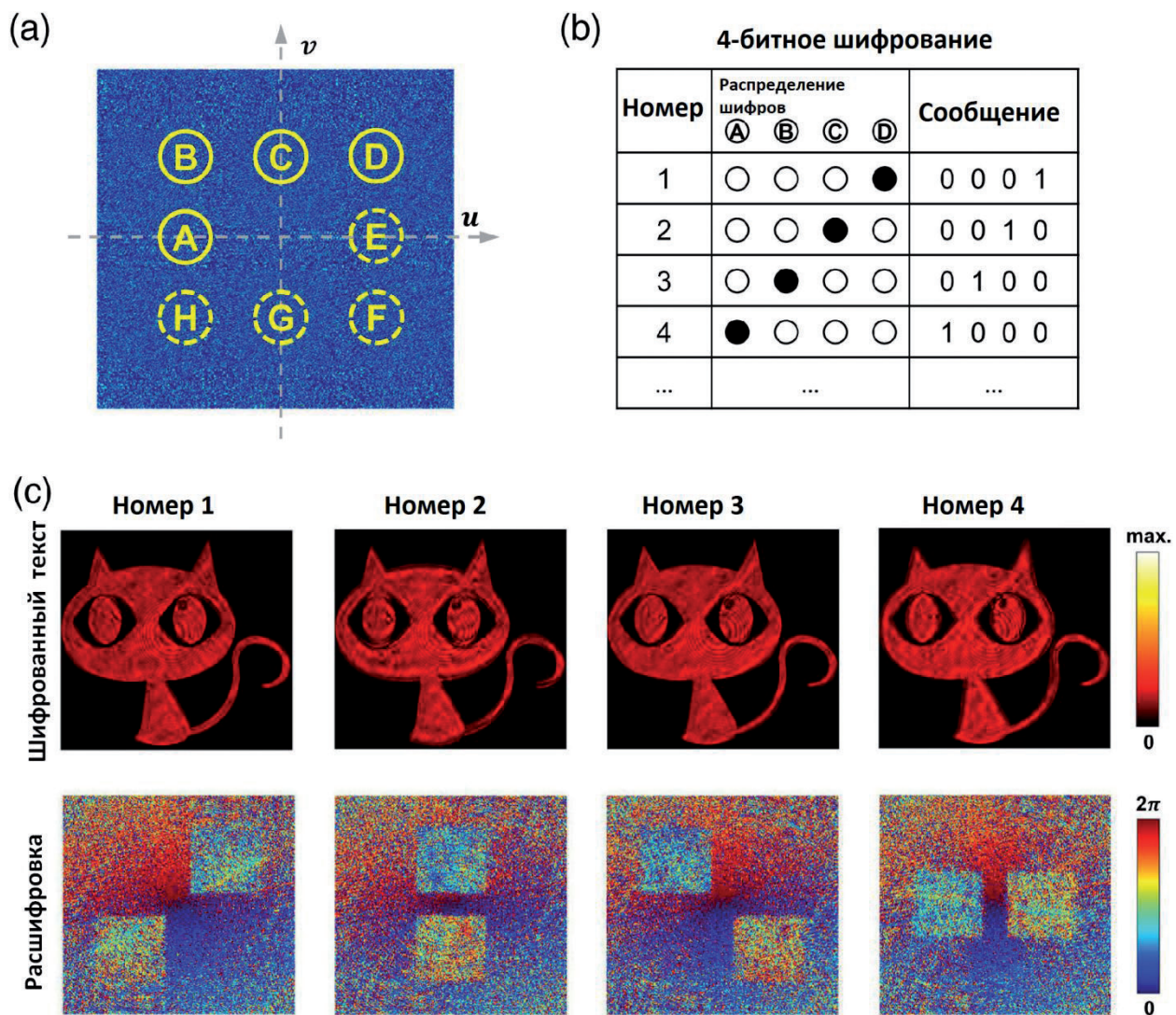


Рис. 23. Иллюстрация шифрования с пространственно-частотным мультиплексированием и экспериментальные результаты 4-битного шифрования [34]: (a) Области (желтые кружки) пространственной частоты для мультиплексирования. (b) 4-битный метод шифрования. Конкретные сообщения могут быть представлены в соответствии с таблицей кодов. Для кодовой диаграммы полный кружок указывает на активацию фазового шифрования, а пустой означает отсутствие изменения пространственной частоты. (c) Экспериментальные результаты изображения зашифрованного текста и соответствующие расшифрованные результаты для четырех сообщений.

экспериментальные результаты, основанные на продемонстрированном выше фазовом шифровании [34]. В пространственно-частотной области изображения конкретная область может действовать как канал, как показано желтыми кружками и заглавными буквами от A до H на Рис. 23а. На самом деле можно использовать и другие регионы. Мы выбираем четыре из этих областей, а именно от A до D , чтобы реализовать 4-битное шифрование, которое описано на Рис. 23б.

Например, если регион D имеет фазовую модуляцию, а другие нет, зашифрованное сообщение будет "0001". Точно так же другие сообщения, такие как "1000", "0100" и "0010", могут быть зашифрованы разными регионами, а также могут быть созданы дополнительные комбинации. Результаты эксперимента показаны на Рис. 23с [34]. Можно обнаружить, что четыре изображения зашифрованного текста похожи, и трудно различить, какое сообщение было зашифровано. Даже наблюдая за интенсивностью и фазой пространственной частоты, сообщение также невозможно идентифицировать. Однако сообщение можно получить, извлекая разность фаз и затем обращаясь к кодовой таблице. Следует отметить, что прямоугольные области на расшифрованной картине разности фаз, показанной на Рис. 23с, соответствуют всей площади МП. Шаблон также будет представлять сопряженные прямоугольные формы относительно зашифрованной области в результате операции преобразования Фурье, примененной к зашифрованному изображению. Мы выбрали несколько областей более низких пространственных частот вокруг центра пространственно-частотной области для демонстрации предлагаемого метода оптического шифрования. Тем не менее, более высокие пространственные частоты также могут использоваться для увеличения информационной емкости.

7.6. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ШИФРОВАНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ

В большинстве методов оптического шифрования с МП информация шифруется в аппаратных устройствах метаповерхностей, что, с одной стороны, усиливает безопасность, а с другой, ограничивает доставку и обработку

информации. Напротив, здесь информация зашифрована в оптических изображениях программным способом через МП, а не зашифрована в самих МП. Это позволяет избежать физической доставки МП, тем самым облегчая транспортировку и обмен информацией. В то время как безопасность в традиционных методах шифрования, в которых информация может быть эффективно скрыта в МП, становится все выше и выше, безопасность в предлагаемом методе также может быть обеспечена за счет использования сложных распределений пространственных частот и использования исходных оптических изображений в качестве ключей. Поскольку для шифрования важны как безопасность, так и пропускная способность, мультиплексирование различных каналов шифрования и использование гибких правил кодирования является многообещающей стратегией для увеличения пропускной способности предлагаемого метода. Поскольку МП напрямую модулируют пространственные частоты оптических изображений, можно дополнительно изучить другие степени свободы адаптации для световых полей и возможность параллельной обработки для повышения безопасности и возможностей шифрования информации. Кроме того, процесс расшифровки предлагаемого метода подходит для практических приложений, поскольку он устойчив к ухудшению качества изображения зашифрованного текста, даже когда зашифрованное изображение искажается на практике. Кроме того, анализ безопасности показывает, что зашифрованная информация не может быть правильно извлечена, если в качестве ключей используются неправильные изображения, что гарантирует безопасность предлагаемого метода (см. Приложение 1, раздел 8 в [34]). МП работают как аналоговые оптические процессоры в предлагаемом методе, который может способствовать сверхбыстрому шифрованию информации с низким энергопотреблением и высокой пропускной способностью, являясь хорошим дополнением к цифровому аналогу.

Таким образом, в [34] предложен и экспериментально продемонстрирован метод оптического шифрования, использующий пространственные частоты паттернов светового

поля. Интенсивность и фазовые распределения пространственных частот были зашифрованы МП для оптических изображений. Результаты показывают, что изображение зашифрованного текста практически совпадает с исходным и никакая информация не может быть идентифицирована напрямую, в то время как дешифрование возможно проводить с помощью преобразования Фурье и дальнейших операций. Кроме того, показано, что избыток пространственных частот оптических изображений обеспечивает многообещающую платформу для гибких правил кодирования, увеличивая количество информационных каналов, а затем и возможности шифрования. Данный метод может проложить путь для разработки новых методов шифрования информации, облегчая исследования в области хранения, передачи, отображения информации и т.д.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время метаоптика реализовала множество оптических приложений, которые могут управлять фазой, частотой, поляризацией, амплитудой и направлением распространения света. Но всегда ли нам нужны объемные 3D-метаматериалы для достижения полезной функциональности? Нет. Сила взаимодействия электромагнитных волн с одиночным субволновым слоем резонаторов может быть большой и достаточной для управления лучом, его фокусированием и подобных приложений с одним слоем метаматериала или МП. Сложность изготовления объемных метаматериалов на самом деле привела эту область к плодотворной деятельности, и желательность ультратонких оптических компонентов, часто называемых плоской оптикой, неоспорима.

Микроскопическая обработка изображений, квантовая обработка изображений, голографическая обработка изображений и полностью оптический сверточный чип обсуждаются в [18]. Метаоптика на основе ИИ демонстрирует возможности самоконтроля.

По сравнению с вычислениями с электронами в качестве среды, фотонные вычисления, естественно, имеют преимущества высокой размерности передачи информации и сильной

возможности параллельной передачи. Хотя цифровые технологии относительно зрелые, их энергопотребление велико, а скорость медленная. Полностью оптические вычисления являются альтернативной схемой. Ранние исследования объемных метаматериалов и экзотических свойств были вытеснены работой над тонкими метаповерхностями, созревшими для коммерциализации, как указано в выпуске "Метаповерхности становятся мейнстримом" 2023 г. [8].

Технология ИИ, применяемая в метаоптике, поможет конструировать сложные оптические конструкции и быстро получать оптимальное решение проблемы для удовлетворения потребностей новых функций. В настоящее время объем обработки данных резко увеличивается, и фотоны, несущие многомерную информацию, могут эффективно расширять пропускную способность информационных операций. Искусственный интеллект и метаповерхностная оптика в синергии помогут исследованиям и разработкам передовых оптических чипов [1], что будет способствовать внедрению следующего поколения оптических устройств и систем, и выведет человеческую цивилизацию на более высокий уровень в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen Mu Ku, Liu Xiaoyuan, Sun Yanni, and Tsai Din Ping. Artificial Intelligence in Meta-optics. *Chemical Reviews*, 2022, 122(19):15356-15413.
2. Su Vin-Cent, Chu Cheng Hung, Sun Greg, and Tsai Din Ping. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications. *Opt. Express*, 2018, 26(10):13148-13182.
3. Qiu Cheng-Wei, Zhang Tan, Hu Guangwei, and Kivshar Yuri. Quo Vadis, Metasurfaces? *Nano Letters*, 2021, 21(13):5461-5474.
4. Liu W, Li Z, Cheng H, Chen S. Dielectric Resonance-Based Optical Metasurfaces: From Fundamentals to Applications. *iScience*, 2020, 23(12). Article No. 101868.
5. Chen Mu Ku, Leng Borui, Fan Yubin, Yao Jin, Liang Yao, Zhang Jingcheng, Liu Xiaoyuan, Sun Linshan, and Tsai Din Ping. High dimensional optical meta-devices: classical to quantum. *Proc. SPIE*, 2022, 12231. ODS 2022: Industrial Optical Devices and Systems, Article No. 1223101.

6. Abdelraouf Omar AM, Wang Ziyu, Liu Hailong, Dong Zhaogang, Wang Qian, Ye Ming, Wang Xiao Renshaw, Wang Qi Jie, Liu Hong. Recent Advances in Tunable Metasurfaces: Materials, Design, and Applications. *ACS Nano*, 2022, 16(9):13339-13369.
7. Padilla WJ, Averitt RD. Imaging with metamaterials. *Nature Reviews Phys.*, 2022, 4(2):85-100.
8. Editorials. Metasurfaces go mainstream. *Nature Photonics*. 2023, 17(1):1. DOI: 10.1038/s41566-022-01137-1.
9. Потапов АА. 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.
10. 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.
11. Pan Danping, Wan Lei, Potapov Alexander A., and Feng Tianhua. Performing Spatial Differentiation and Edge Detection with Dielectric metasurfaces. *QELS_Fundamental Science "OSA Technical Digest Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Washington: Optical Society of America, 2020. Paper FW4B.2.pdf, 2 pp. (From the session "Inverse Design and Computation (FW4B)").
12. Feng Tianhua, Potapov Alexander A., Liang Zixian, and Xu Yi. Huygens Metasurfaces Based on Congener Dipole Excitations. *Physical Review Applied.*, 2020, 13, 6 p. Article No. 021002.
13. Tianhua Feng, Shuaifeng Yang, Ning Lai, Weilian Chen, Danping Pan, Wei Zhang, Potapov Alexander A., Zixian Liang, and Yi Xu. Manipulating light scattering by nanoparticles with magnetoelectric coupling. *Phys. Rev. B.*, 2020, 102, 7p. Article No. 205428.
14. 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.
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. Shuaifeng Yang, Lei Wan, Fugen Wang, Alexander A. Potapov, and Tianhua Feng. Strong optomechanical coupling in chain-like waveguides of silicon nanoparticles with quasi-bound states in the continuum. *Opt. Lett.*, 2021, 46(18):4466-4469.
17. Wang Fugen, Yuan Jin, Yang Shuaifeng, Potapov Alexander A., Zhang Xin, Liang Zixian, and Feng Tianhua. Compact ring resonators of silicon nanorods for strong optomechanical interaction. *Nanoscale*, 2023, 15(7), doi: 10.1039/D2NR06449A.
18. Xu Dingyu, Wen Shuangchun, and Luo Hailu. Metasurface-Based Optical Analog Computing: From Fundamentals to Applications. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2022, Vol.2022. Article No. 0002;- doi: 10.34133/adi.0002.
19. Hail Claudio U, Foley Morgan, Sokhoyan Ruzan, Michaeli Lior, Atwater Harry A. High quality factor metasurfaces for two-dimensional wavefront manipulation. <https://arxiv.org/abs/2212.05647> (12 декабря 2022). 19 p.
20. Li Lianlin, Zhao Hanting, Liu Che, Li Long, and Cui Tie Jun. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing. *eLight*, 2022, 2(7); doi: 10.1186/s43593-022-00013-3.
21. Zhao Xiaoguang, Sun Zhenci, Zhang Lingyun, Wang Zilun, Xie Rongbo, Zhao Jiahao, You Rui, and You Zheng. Review on Metasurfaces: An Alternative Approach to Advanced Devices and Instruments. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2022, vol. 2022. Article No. 9765089; doi: 10.34133/2022/9765089.
22. Badloe T, Lee S, Rho J. Computation at the speed of light: metamaterials for all-optical calculations and neural networks. *Advanced Photonics*, 2022, 4(6), 21 p. Article No. 064002; doi: 10.1117/1.AP.4.6.064002.
23. Saifullah Yasir, He Yejun, Boag Amir, Yang Guo-Min, and Xu Feng. Recent Progress in Reconfigurable and Intelligent Metasurfaces: A Comprehensive Review of Tuning Mechanisms, Hardware Designs, and Applications. *Advanced Science*, 2022, 9(33), 35 p. Article No. 2203747.

24. Johnson William B, Lindenstrauss Joram. Extensions of Lipschitz mappings into a Hilbert space. *Proc. Conf. in Modern Analysis and Probability* (New Haven, Conn., June 8-11, 1982), P. 189-206, Contemporary Mathematics, V. 26, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 1984.
25. Li Lianlin, Ruan Hengxin, Liu Che, Li Ying, Shuang Ya, Alù Andrea, Qiu Cheng-Wei, and Cui Tie Jun. Machine-learning reprogrammable metasurface imager. *Nature Communications*, 2019, 10. Article No.1082.
26. Zheng Peixia, Dai Qi, Li Zile, Ye Zhiyuan, Xiong Jun, Liu Hong-Chao, Zheng Guoxing, Zhang Shuang. Metasurface-based key for computational imaging encryption. *Science Advances*, 2021, 7(21). DOI: 10.1126/sciadv.abg0363.
27. Xiao Qiang, Ma Qian, Yan Tao, Wu Liang Wei, Liu Che, Wang Zheng Xing, Wan Xiang, Cheng Qiang, Cui Tie Jun. Orbital-Angular-Momentum-Encrypted Holography Based on Coding Information Metasurface. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(11), doi: 10.1002/adom.202002155.
28. Wu Liang Wei, Xiao Qiang, Gou Yue, Wu Rui Yuan, Xu Peng, Qing Ye Ming, Wang Zheng Xing, Bao Lei, Ma Hui Feng, Cui Tie Jun. Electromagnetic Diffusion and Encryption Holography Integration Based on Reflection-Transmission Reconfigurable Digital Coding Metasurface. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(10), doi: 10.1002/adom.202102657.
29. Xuqian Jiang, Ye Fujun, Tan Hongrui, Luo Sisi, Cui Haoyang, and Chen Lei. Digital Programmable Metasurface with Element-Independent Visible-Light Sensing. *Electronics*, 2023, 12(1). 9 p., doi: 10.3390/electronics12010241.
30. Cui Tie Jun, Qi Mei Qing, Wan Xiang, Zhao Jie, Cheng Qiang. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(e218), 9 p. doi: 10.1038/lssa.2014.99.
31. Ma Qian, Gao Wei, Xiao, Qiang, Ding Lingsong, Gao Tianyi, Zhou Yajun, Gao Xinxin, Yan Tao, Liu Che, Gu Ze, Kong Xianghong, Abbasi Qammer H., Li Lianlin, Qiu Cheng-Wei, Li Yuanqing, and Cui Tie Jun. Directly wireless communication of human minds via non-invasive brain-computer-metasurface platform. *eLight*, 2022, 2(1). doi: 10.1186/s43593-022-00019-x.
32. Wang Hai Lin, Ma Hui Feng, Cui Tie Jun. A Polarization-Modulated Information Metasurface for Encryption Wireless Communications. *Advanced Science*, 2022, 9(34). 9 p., doi: 10.1002/advs.202204333.
33. Wang Hai Lin, Zhang Yan Kai, Zhang Tai Yi, Ma Hui Feng, and Cui Tie Jun. Broadband and Programmable Amplitude-Phase-Joint-Coding Information Metasurface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(25):29431-29440.
34. Ouyang Min, Yu Haoyang, Pan Danping, Wan Lei, Zhang Cheng, Gao Shecheng, Feng Tianhua, and Li Zhaohui. Optical encryption in spatial frequencies of light fields with metasurfaces. *Optica*, 2022, 9(9):1022-1028.

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.2024.16.207

Локализованные акустические волны в одномерных периодически модулированных структурах

Недоспасов И.А., Пупырёв П.Д., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская ФедерацияE-mail: ianedospasov@mail.ru, pupyrev@mail.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

Поступила 27.02.2024, рецензирована 01.03.2024, принята 06.03.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Предложен и исследован ряд одномерных фоновых кристаллов, представляющих собой периодические тонкопленочные структуры различной геометрии, состоящие из наборов столбиков и металлических включений, расположенных на пьезоэлектрическом полупространстве. Исследованы особенности распространения в подобных структурах акустических волн, локализованных около свободной поверхности и неоднородных включений. Обнаружено необычное поведение дисперсионных кривых для исследованных локализованных мод. Особое внимание уделено так называемым запрещенным зонам, т.е. частотным диапазонам, в которых отсутствуют распространяющиеся локализованные моды. Подробно обсуждено влияние механических и электрических граничных условий на спектр исследуемых волн.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, одномерные фоновые кристаллы, оксид цинка, нулевая групповая скорость, волны Лява, волны Сезава, волны утечки

УДК 534-16, 534.12

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10267).

Для цитирования: Недоспасов И.А., Пупырёв П.Д., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е. Локализованные акустические волны в одномерных периодически модулированных структурах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(2):207-214. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.207.

Localized acoustic waves in one-dimensional periodically modulated structures

Илья А. Nedospasov, Pavel D. Pupyrev, Andrey V. Smirnov, Iren E. Kuznetsova

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian FederationE-mail: ianedospasov@mail.ru, pupyrev@mail.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

Received February 27, 2024, peer-reviewed March 01, 2024, accepted March 06, 2024, published April 25, 2024

Abstract: A number of one-dimensional phononic crystals, which are periodic thin-film structures of various geometries, consisting of sets of columns and metal inclusions located on a piezoelectric half-space, have been proposed and studied. The features of propagation in such structures of acoustic waves localized near the free surface and inhomogeneous inclusions have been studied. An unusual behavior of the dispersion curves for the studied localized modes was discovered. Particular attention is drawn to the so-called forbidden zones, i.e. frequency ranges in which there are no propagating localized modes. The influence of mechanical and electrical boundary conditions on the spectrum of the waves under study is discussed in detail.

Keywords: surface acoustic waves, one-dimensional phononic crystals, zinc oxide, zero group velocity, Love waves, Sezawa waves, leaky waves

UDC 534-16, 534.12

Acknowledgments: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 22-79-10267).

For citation: Ilya A. Nedospasov, Pavel D. Pupyrev, Andrey V. Smirnov, Iren E. Kuznetsova. Localized acoustic waves in one-dimensional periodically modulated structures. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):207-214e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.207.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (208)
 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (208)
 3. ОДНОРОДНАЯ ПЛЁНКА ZnO (209)
 4. ПЛЁНКА ZnO С АЛЮМИНИЕВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ (210)
 5. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ВЫЕМКА В ПЛЕНКЕ ZnO ИЛИ СТОЛБИК ZnO НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ Y СРЕЗ LiNbO₃ (212)
 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (213)
- ЛИТЕРАТУРА (213)

1. ВВЕДЕНИЕ

Волновые процессы в периодических структурах на сегодняшний день являются одними из самых популярных объектов для исследования в акустике [1-6]. В подобных структурах наблюдаются необычные акустические явления, которые могут использоваться при создании датчиков, систем обработки сигналов, для управления акустическим волновым фронтом и т.д. Данные структуры можно создавать различными способами. Одним из самых широко распространенных подходов на микромасштабном уровне является использование технологии фотолитографии, например, нанесение металлических электродов на поверхность пьезоэлектрического образца. Однако по технологическим причинам толщина такого слоя металла обычно не превышает несколько сот нанометров, поэтому и его влияние на акустические волны в подобных структурах также мало. В пьезоэлектрических средах при помощи металлических структур на поверхности звукопровода можно легко изменять электрические граничные условия. Например, с "плавающих", т.е. неподключенных к источнику напряжения

электродов, на закороченные при подаче на них нулевого потенциала. Другой способ создания периодических структур заключается в нанесении различных диэлектрических или пьезоэлектрических плёнок на поверхность пьезоэлектрического звукопровода. В настоящей работе рассматриваются плёнки ZnO, которые обладают хорошими пьезоэлектрическими свойствами, и это позволяет использовать их в качестве верхнего покрытия чувствительной части сенсоров [7]. Кроме того, нанесение слоя пьезоэлектрического ZnO с системой электродов на поверхность непьезоэлектрических кристаллов позволяет эффективно возбуждать акустические волны в таких структурах. Следует отметить, что при развитии современной технологии толщина подобной пленки может достигать десятки микрон, выдерживая высокое кристаллографическое качество. Это позволяет значительно влиять на спектр акустических мод в подобных структурах [1-4,7,8]. При проведении исследований проводимость ZnO не учитывалась, однако подобный учет в модели достаточно прост и может оказывать дополнительное влияние на дисперсионные кривые.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе теоретически исследовано влияние геометрических параметров на спектр акустических локализованных волн в периодических структурах, расположенных на полупространстве из YZ ниобата лития. Поверхность полупространства периодически модулируется различными структурами, электродами на интерфейсе между плёнкой ZnO и полупространством, столбиками из оксида

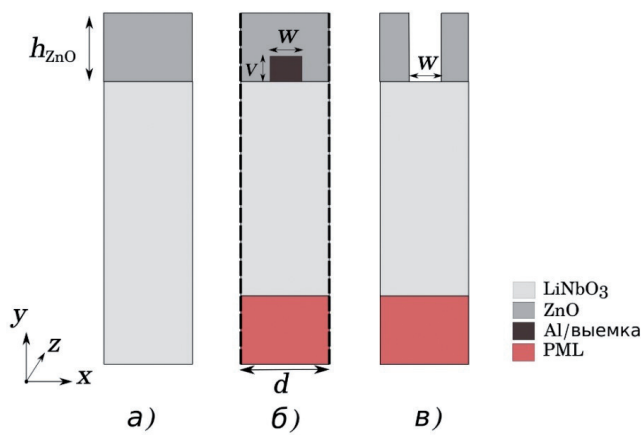


Рис. 1. Схематическое изображение одиночных ячеек периодических волноводов: а) однородная пленка ZnO, б) пленка ZnO с алюминиевым включением, в) столбик ZnO на полупространстве ниобата лития. Высота пленки h_{ZnO} , период структуры d , базовые значения размеров включений с высотой v и шириной w .

цинка с алюминиевыми включениями, либо заменой металла на выемку в однородной плёнке (Рис. 1). Геометрические параметры пленки и единичной ячейки характеризуется величинами, представленными на Рис. 1. Высота пленки/столбика $h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм, период структуры $d = 4$ мкм, высота алюминиевого включения $v = 0.25$ мкм, его ширина $w = d/2$. Далее параметр h_{ZnO} варьируется для оценки влияния геометрических изменений на спектр акустических волн в соответствующих волноводах.

Задача поиска акустических мод решалась численно с помощью метода конечных элементов. В этом случае образец в плоскости YX разбивался на двумерные четырехугольные элементы. Одномерный волновой вектор был направлен вдоль оси X . В направлении Z структура считалась бесконечной. Данный метод и его реализация были многократно протестированы в задачах о распространении акустических волн в пластинах, поверхностных и краевых волн, в том числе и в периодических структурах [5]. Для моделирования дисперсионных кривых применялась теорема Флоке-Блоха. В рамках этого подхода решение искалось лишь в области элементарной ячейки. На торцах единичных ячеек задавались периодические граничные условия (Рис. 1б, штрих-линия). Используемые элементарные ячейки имели конечные размеры в направлении Y . Это приводило к дополнительным резонансам объёмных

акустических волн, которые могут отражаться от нижней границы ячейки. Эти резонансы расположены на более высоких частотах и не перекрывают область существования исследуемых собственных локализованных мод. Для исследования условий существования псевдоволн, или локализованных "волн утечки", рассматривался отклик системы на силовой синусоидальный источник, действующий на верхнюю поверхность структуры. В этом случае анализировалась высокочастотная область акустического спектра в области резонансов. Моделирование полубесконечной подложки с помощью идеально согласованного слоя (PML), помещённого снизу, использовалось для предотвращения отражения акустических волн, генерируемых источником от нижнего края звукопровода (Рис. 1б).

Материальные константы для ниобата лития, были взяты на сайте производителя кристаллов Boston Piezooptics [9], для оксида цинка из [3], для алюминия использовались следующие параметры: плотность 2700 кг/м^3 , модуль Юнга 70 ГПа , коэффициент Пуассона 0.33 .

3. ОДНОРОДНАЯ ПЛЁНКА ZNO

Рассмотрим базовую геометрию в отсутствие периодичности структур, представляющую собой однородную изотропную плёнку

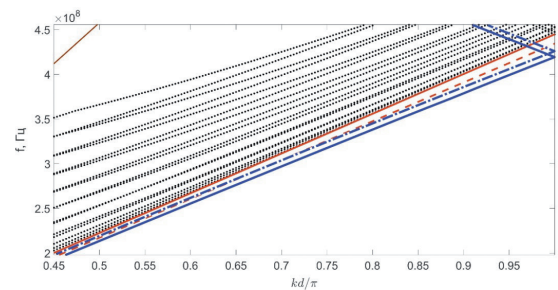


Рис. 2. Дисперсионные зависимости для мод в системе плёнка ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) на полупространстве из YZ ниобата лития. Красная и коричневая сплошные линии соответствуют поперечной и продольной объёмным волнам в Y срезе ниобата лития, соответственно. Пунктирная красная линия соответствует поверхностной акустической волне (ПАВ) в YZ ниобате лития. Черные пунктирные линии соответствуют резонансам объёмных акустических волн (ОАВ). Синие линии сплошная и пунктир соответствуют 1-й и 2-й локализованным поверхностным волнам, f - частота волны, k - волновое число.

(ZnO) на полупространстве (Y среза ниобата лития) (Рис. 1а). Волны распространяются в направлении YZ ниобата лития. При толщине плёнки ZnO $h_{ZnO} = 1$ мкм и периоде ячейки $d = 4$ мкм, рассчитанные дисперсионные зависимости выглядят следующим образом (Рис. 2).

Видно, что в данной структуре существуют две локализованные моды (синяя сплошная и синий пунктир) в диапазоне нормированного значения волнового вектора $k d / \pi$ от 0.45 до 1. Отдельно отметим, что поскольку глубина моделируемой геометрии конечна и составляет в данном случае 18 периодов, то при малых значениях волновых чисел нижняя граница структуры оказывает влияние на акустические моды. Таким образом, получаемые дисперсионные зависимости при малых k перестают правдоподобно описывать систему.

Что касается больших значений волновых чисел, то в связи с искусственностью выбора периода ячейки дисперсионные зависимости существуют за зоной Бриллюэна в виде "отраженных" или "сложенных" ветвей, уходящих за континуум объёмных и поверхностных резонансов. На границе зоны Бриллюэна первая локализованная мода (синяя сплошная) существует при частоте $f_1 = 419.3$ МГц и имеет сагиттальную поляризацию. Данная мода соответствует рэлеевскому типу акустических волн. На малых волновых числах данная дисперсионная кривая имеет асимптотику поверхностных акустических волн (ПАВ) в YZ ниобате лития в отсутствие плёнки. Вторая локализованная мода (синий пунктир) на границе зоны Бриллюэна существует при частоте $f_2 = 425.9$ МГц и обладает горизонтально-сдвиговой (SH) поляризацией. Таким образом, можно сделать вывод, что она является волной Лява. Вблизи значения $k d / \pi = 0.7$ она пересекает асимптотическую линию для ПАВ в YZ ниобате лития (красный пунктир). Ветви, находящиеся над асимптотическими линиями, соответствующими ОАВ (черные линии на Рис. 2), представляют собой объёмные резонансы. На Рис. 2 показаны лишь первые 20 собственных мод.

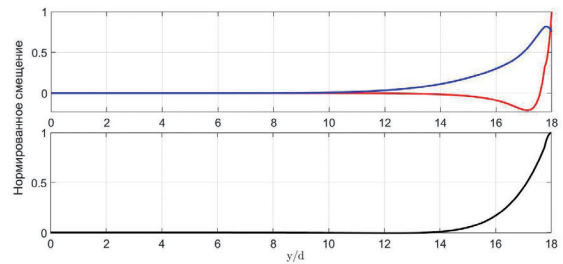


Рис. 3. Зависимости распределения по глубине нормированных полей смещений двух низших локализованных мод в структуре слой ZnO/полупространство YZ LiNbO₃ на границе зоны Бриллюэна в направлении Y . а) мода рэлеевского типа с сагиттальной поляризацией (Рис. 2, синяя сплошная), б) мода Лява с горизонтальной поляризацией (Рис. 2, синий пунктир). u_x – синяя кривая, u_y – красная кривая, u_z – черная кривая. Смещения для моды Лява и моды рэлеевского типа нормированы на поверхности на компоненты u_x и u_y соответственно.

Зависимости распределения нормированных полей смещений двух низших локализованных мод (Рис. 2, синий пунктир и синяя сплошная) по глубине в направлении Y на границе зоны Бриллюэна представлены на Рис. 3.

4. ПЛЁНКА ZnO С АЛЮМИНИЕВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В описанную выше структуру (Рис. 1а) между пленкой ZnO и ниобатом лития в качестве периодической неоднородности был добавлен алюминиевый электрод толщиной $v = 0.25$ мкм и шириной $w = 2$ мкм (Рис. 1б). Задача решалась методом, описанным выше. В качестве электрических граничных условий использовалась либо ситуация с электрически закороченными электродами, либо с электродами, не подключенными к источнику напряжения. На Рис. 4 приведены полученные теоретические зависимости. Видно, что в этом случае появляются запрещённые зоны (выделены овалом). Как видно из Рис. 4, дисперсионная зависимость низшей рэлеевской моды (зеленый жирный пунктир) смещается в низкочастотную область (красная толстая сплошная) при электрическом закорачивании электродов.

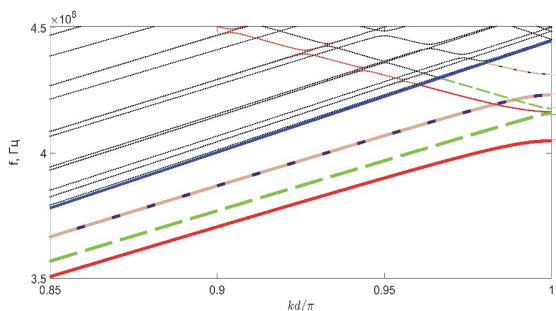


Рис. 4. Дисперсионные зависимости для акустических мод в структуре "пленка ZnO ($h_{ZnO} = 1$ мкм) – алюминиевый электрод ($v = 0.25$ мкм, $w = 2$ мкм) – полупространство Y LiNbO₃". Сплошные линии соответствуют модам в структуре с закороченными электродами. Пунктирные линии соответствуют модам в структуре с электродами, неподключенными к источнику напряжения. Синяя прямая линия соответствует сдвиговой ОАВ в подложке. Тонкими полукруглыми линиями справа показаны соответствующие запрещенные зоны.

При этом ширина запрещенной зоны для неподключенных электродов составляет 1.8 МГц, а при их закорачивании данная величина увеличивается до 11.5 МГц. Что касается волн Лява, то соответствующие дисперсионные зависимости не реагируют на изменение граничных условий. Это связано с тем, что волна Лява в данной структуре является непьезоактивной и ширина ее запрещенной зоны для обоих граничных условий составляет 8.1 МГц.

Для определения поляризации исследуемых волн были рассчитаны компоненты их механических смещений. На **Рис. 5а,б**

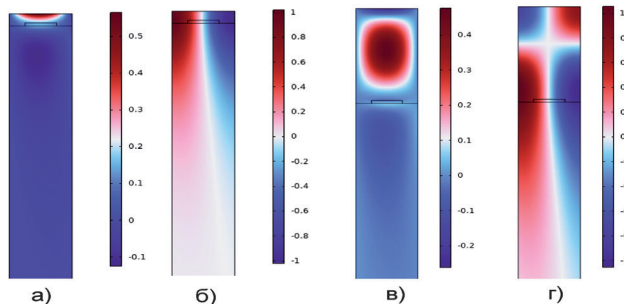


Рис. 5. Поля смещений u_x (а) и u_y (б) для рэлеевской моды при $h_{ZnO} = 1$ мкм и для моды Сезава при $h_{ZnO} = 8$ мкм и u_x (в) и u_y (г) на границе зоны Бриллюэна на ветви ниже запрещенной зоны.

приведены поля смещений для низшей рэлеевской моды с частотой 404.9 МГц на границе зоны Бриллюэна.

Далее был проведен анализ влияния толщины пленки ZnO на исследуемый акустический спектр. В результате было обнаружено, что при увеличении толщины пленки ZnO от 1 мкм до 8 мкм появляются высшие локализованные моды (**Рис. 6**). Видно, что дополнительно к волнам рэлеевского типа появляются моды типа Сезава, имеющие сагиттальную поляризацию (черные и оранжевые линии). Следует отметить, что при увеличении толщины пленки ZnO пьезоактивность волн рэлеевского типа значительно уменьшается, при этом появляющиеся моды типа Сезава оказываются более пьезоактивным. Было также обнаружено, что при закорачивании ширина запрещенной зоны данных мод драматически увеличивается от 100 кГц (черный полукруг) до 6.9 МГц (оранжевый полукруг) (Рис. 6). На **Рис. 5в,г** представлены рассчитанные поля механических смещений для нижней ветви

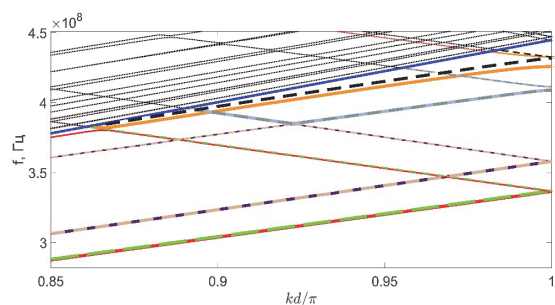


Рис. 6. Дисперсионные зависимости для мод в системе пленка ZnO ($h_{ZnO} = 8$ мкм) с тонким алюминиевым включением $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм (электродам) на полупространстве из Y LiNbO₃. Сплошные линии соответствуют модам в системе с закороченными граничными условиями на электродах, пунктирные линии соответствуют модам в системе с "плавающими" граничными условиями на электродах (неподключенных к источнику напряжения). Синяя прямая линия описывает объемную сдвиговую волну в подложке. Красные и светлозеленые линии соответствуют низшим рэлеевским модам, оранжевые и черные линии соответствуют модам Сезава, темно синие и бежевые соответствуют модам Лява 1-го порядка, темно зеленые и фиолетовые соответствуют модам Лява 2-го порядка.

моды Сезава на границе зоны Бриллюэна при $h_{\text{ZnO}} = 8$ мкм. В отличие от рэлеевской моды компоненты поля смещений моды Сезава меняют знак внутри плёнки, что соответствует изменению фазы на $\pi/2$.

5. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ВЫЕМКА В ПЛЕНКЕ ZnO ИЛИ СТОЛБИК ZnO НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ Y СРЕЗ LiNbO₃

Представляет интерес оценка влияния и других типов периодических включений на спектр акустических локализованных волн. Обнаружено, что при замене алюминиевого включения на пустую выемку, происходит сильное изменение поведения дисперсионных зависимостей (Рис. 7).

Исследование отклика системы на внешний силовой источник, отчетливо демонстрирует существование двух локализованных низших мод, исходящих из низкочастотного континуума. Обе наблюдаемые ветви имеют сагиттальный характер полей смещений. Стоит отметить, что в такой геометрии существует значительный частотный диапазон шириной около 50 МГц, в котором запрещены распространяющиеся волноводные моды (Рис. 7, черный полукруг).

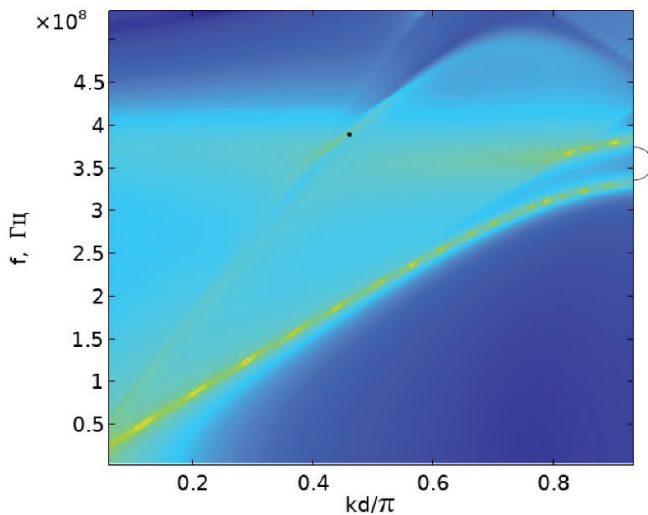


Рис. 7. Дисперсионные зависимости в виде отклика на внешнее механическое воздействие (силовой источник) для мод в системе плёнка ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) с выемкой (воздух вместо алюминиевого электрода) $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм на полупространстве из Y LiNbO₃. Овал соответствует запрещенной зоне для волноводных мод.

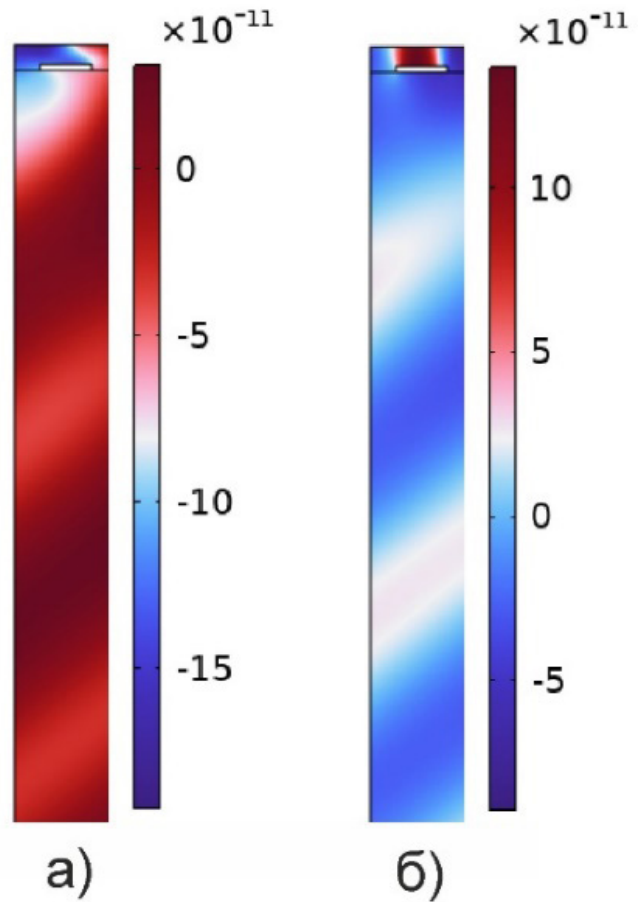


Рис. 8. Поля смещений для псевдолокализованной волны утечки на частоте 386.25 МГц и при значении нормированного волнового числа $kd/\pi = 0.46346$ в структуре с выемкой $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм в плёнке ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) на полупространстве Y LiNbO₃, а) и_x компонента, б) и_y компонента.

В дополнение к этому наблюдается существование псевдолокализованных решений с другой асимптотикой в виде ОАВ с более высокой скоростью. Распределение полей смещения для волны утечки на частоте 386.25 МГц и при значении нормированного волнового числа $kd/\pi = 0.46346$ (черная точка на Рис. 7) показано на Рис. 8.

Вышеупомянутая структура имеет схожую геометрию с обычными одномерными столбиками на поверхности кристалла [1,2]. В связи с этим для сравнения дисперсионных кривых был рассчитан предельный случай пустых выемок $v \rightarrow h_{\text{ZnO}}$, то есть структура в виде несвязанных столбиков высотой $h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм и $w = 2$ мкм (Рис. 1в). На Рис. 9 приведены дисперсионные кривые для данной структуры.

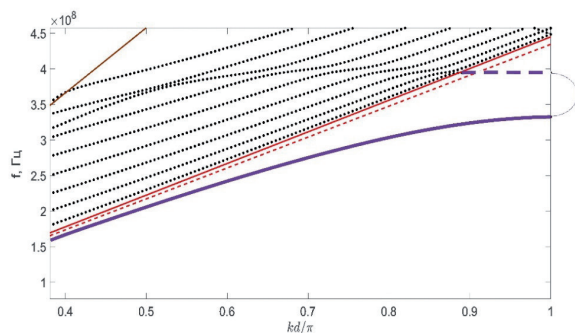


Рис. 9. Дисперсионные зависимости для акустических мод в структуре "столбик ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) и $w = 2$ мкм на полупространстве из Y LiNbO₃". Красная и коричневая сплошные линии соответствуют нижней поперечной и продольной ОАВ в Y срезе LiNbO₃, соответственно. Пунктирная красная линия соответствует ПЛАВ в YZ LiNbO₃. Синие линии, сплошная и пунктир, соответствуют 1-й и 2-й локализованным ПЛАВ, соответственно. Тонкими полукруглыми линиями справа показаны запрещенные зоны.

Здесь наблюдается только две локализованные моды (синие линии, сплошная и пунктир), лежащие ниже ветви ОАВ. Причем одна из них существует в широком частотном диапазоне, вторая же на небольшом участке от границы точки континуум до границы зоны Бриллюэна. Данная мода практически горизонтальна, то есть в этом случае возможно существование волны с практически нулевой групповой скоростью. Также в спектре присутствует очень широкая запрещенная зона с диапазоном 62.5 МГц (Рис. 9, тонкий полукруг).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы локализованные акустические моды в одномерных периодических пьезоэлектрических структурах, основанных как на тонких металлических включениях, так и на выемках и канавках. На основе анализа полей механических смещений было установлено соответствие вышеуказанных мод в структурах с периодически расположенными тонкими алюминиевыми электродами с волнами Лява и Сезава в однородных средах. Показано, что изменение механических и электрических граничных условий оказывает сильное влияние на поведение дисперсионных кривых вблизи границы зоны Бриллюэна. Это позволяет

манипулировать возникновением и шириной запрещенных зон. С другой стороны, обнаружено, что данные эффекты практически отсутствуют для непьезоактивных мод, наблюдаемых одновременно в той же структуре. Более сложные модификации структур в виде комбинации пустот и канавок/столбиков также сильно изменяют вид дисперсионных кривых. В структуре появляются широкие запрещенные зоны, возникают обширные диапазоны мод с нулевой групповой скоростью, а также возникают псевдоволны. Современные технологии нанесения плёнок и объектов сложной геометрической формы позволяют создавать акустические волноводы с уникальными характеристиками, оптимально подходящие для различных целей применения, будь то компоненты для систем обработки сигналов, элементов управления волновым фронтом или чувствительных элементов датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

- Jiang T, Li C, Han Q. Surface acoustic waves in 2D-phononic crystal of laminated pillars on a semi-infinite ZnO substrate. *Physics Letters A*, 2019, 383(33):125956.
- Taleb F, Darbari S, Khelif A. Reconfigurable locally resonant surface acoustic demultiplexing behavior in ZnO-based phononic crystal. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(2).
- Sharaf R, Darbari S, Khelif A. Vertical Surface Phononic Mach-Zehnder Interferometer. *Physical Review Applied*, 2023, 19(2):024071.
- Sharaf R, Darbari S, Khelif A. Nonreciprocity of Gigahertz Surface Acoustic Wave Based on Mode Conversion in an Inclined Phononic Crystal Heterojunction. *Physical Review Applied*, 2021, 16(5):054004.
- Nedospasov IA, Pupyrev PD, Bechler N, Tham J, Kuznetsova IE, Mayer AP. Guided acoustic waves at periodically structured edges: Linear modes and nonlinear generation of Lamb and surface waves. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 527:116854.
- Смирнов АВ, Фионов АС, Горбачев ИА, Шамсутдинова ЕС, Кузнецова ИЕ, Колесов ВВ. Использование аддитивных технологий для создания широкополосных

- антенн с фрактальной геометрией.
РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):427-434. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.427.
7. Caliendo C, Laidoudi F. Experimental and theoretical study of multifrequency surface acoustic wave devices in a single Si/SiO₂/ZnO piezoelectric structure. *Sensors*, 2020, 20(5):1380.
 8. Булычев НА, Михайлов ЮГ. Получение полимерных композиционных материалов на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(2):161-168. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.161.
 9. <https://www.bostonpiezooptics.com/>.

Недоспасов Илья Александрович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: ianedospasov@mail.ru

Пупырёв Павел Дмитриевич

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: pupyrev@mail.ru

Смирнов Андрей Владимирович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru

Кузнецова Ирен Евгеньевна

д.ф.-м.н., проф.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: kuziren@yandex.ru

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.215

Моделирование и анализ распределений температуры и термомеханических напряжений в многокристальном электронном модуле

¹Ходаков А.М., ^{1,2}Смирнов В.И., ¹Сергеев В.А., ³Тарасов Р.Г., ¹Гавриков А.А.

¹УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

²Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>

Ульяновск 432027, Российская Федерация

³Научно-производственное предприятие "Завод Искра", <https://www.zavod-iskra.ru/>

Ульяновск 432030, Российская Федерация

E-mail: ln23al@yandex.ru, smirnov-vi@mail.ru, sva@ulstu.ru, rgtarasov@mail.ru, a.gavrikoff@gmail.com

Поступила 21.02.2024, рецензирована 25.02.2024, принята 29.02.2024, опубликована 25.04.2024

Аннотация: Рассмотрена математическая термомеханическая модель многокристального электронного модуля (МЭМ), содержащего три кремниевых кристалла мощных транзисторов, закрепленных токопроводящим адгезивом на медной пластине, размещенной на радиаторе, в виде системы уравнений теплопроводности и термоупругости с заданными граничными условиями. В результате расчетных исследований модели в программной среде COMSOL Multiphysics получены распределения температуры и термомеханических напряжений в элементах конструкции МЭМ в зависимости от греющей мощности, толщины адгезива и размера модельного дефекта контактного соединения одного из кристаллов МЭМ с медной пластиной в виде пустот в слое адгезива. Показано, что пустоты в слое адгезива приводят к резко неоднородному распределению температуры по площади кристалла и термомеханическим напряжениям сдвига в контактном слое, превышающим предельно допустимые значения для адгезива. Установлено, что термомеханические напряжения уменьшаются с увеличением толщины слоя адгезива и возрастают с увеличением размера дефекта (пустот) в этом слое. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами измерения теплового импеданса кристаллов мощных транзисторов модуляционным методом, что говорит о корректности и адекватности разработанной модели.

Ключевые слова: многокристальный электронный модуль, термомеханическая модель, контактное соединение, дефект, распределение температуры, термомеханические напряжения, тепловое сопротивление, модуляционный метод

УДК 621.382.32

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-29-00026.

Для цитирования: Ходаков А.М., Смирнов В.И., Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Гавриков А.А. Моделирование и анализ распределений температуры и термомеханических напряжений в многокристальном электронном модуле. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):215-222. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.215.

Modeling and analysis of temperature and thermomechanical stress distributions in a multi-chip electronic module

Alexander M. Khodakov, Viacheslav A. Sergeev, Andrey A. Gavrikov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

E-mail: ln23al@yandex.ru, sva@ulstu.ru, a.gavrikoff@gmail.com

Vitaliy I. Smirnov

Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: smirnov-vi@mail.ru

Ruslan G. Tarasov

NPP "Zavod Iskra", <https://www.zavod-iskra.ru/>

Ulyanovsk 432030, Russian Federation

E-mail: rgtarasov@mail.ru

Received February 21, 2024, peer-reviewed February 25, 2024, accepted February 29, 2024, published April 25, 2024

Abstract: A mathematical thermomechanical model of a multi-chip electronic module (MEM) containing three silicon dies of high-power transistors fixed with a conductive adhesive on a copper plate placed on a radiator is considered in the form of a system of equations of thermal conductivity and thermoelasticity with specified boundary conditions. As a result of computational studies of the model in the COMSOL Multiphysics software environment, distributions of temperature and thermomechanical stresses in the MEM structural elements were obtained depending on the heating power, the thickness of the adhesive and the size of the model defect in the contact connection of one of the MEM crystals with a copper plate in the form of voids in the adhesive layer. It is shown that voids in the adhesive layer lead to a sharply non-uniform temperature distribution over the crystal area and thermomechanical shear stresses in the contact layer that exceed the maximum permissible values for the adhesive. It has been established that thermomechanical stresses decrease with increasing thickness of the adhesive layer and increase with increasing size of the defect (voids) in this layer. The simulation results are in good agreement with the results of measuring the thermal impedance of power transistor crystals using the modulation method, which indicates the correctness and adequacy of the developed model.

Keywords: multi-chip electronic module, thermomechanical model, contact connection, defect, temperature distribution, thermomechanical stress, thermal resistance, modulation method

UDC 621.382.32

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00026).

For citation: Alexander M. Khodakov, Vitaliy I. Smirnov, Viacheslav A. Sergeev, Ruslan G. Tarasov, Andrey A. Gavrikov. Modeling and analysis of temperature and thermomechanical stress distributions in a multi-chip electronic module. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):215-222e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.215.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (216)
 2. ОПИСАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (217)
 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ
ОБСУЖДЕНИЕ (218)
 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ
МОДЕЛИРОВАНИЯ (219)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (221)
- ЛИТЕРАТУРА (222)

1. ВВЕДЕНИЕ

При рассеивании мощности в активных элементах многокристальных электронных модулей (МЭМ), представляющих собой несколько полупроводниковых кристаллов, смонтированных на общей теплопроводящей подложке (например, силовые модули мощных биполярных, MOSFET- или IGBT-транзисторах на медной пластине) кристаллы и элементы конструкции МЭМ нагреваются, при этом из-за

разницы коэффициентов теплового расширения материалов конструкции МЭМ в них возникают термомеханические напряжения и деформации. Критические значения температурного перегрева и термомеханических напряжений являются основными причинами отказов элементов МЭМ. Эти факторы приводят к ускорению деградации контактных соединений кристаллов с подложкой и, как следствие, к увеличению теплового сопротивления и ухудшению теплоотвода, что в свою очередь, ведет к дальнейшему увеличению температуры, механических напряжений и деформации элементов конструкции МЭМ, что в конечном итоге приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик и отказам МЭМ [1–3].

Одним из наиболее важных факторов надежности МЭМ является качество клеевого соединения кристалла с подложкой. Наличие пустот в слое адгезива между кристаллом и

подложкой в МЭМ является одной из основных причин ускоренной деградации контактных соединений в результате термомеханических деформаций и сокращения срока службы приборов [4]. Исследование этих процессов требует учета многих факторов и стимулирует разработку новых теплоэлектрических и термомеханических моделей МЭМ. За последнее время задачи, связанные с нагревом силовых и СВЧ МЭМ при эксплуатации решаются с использованием методов компьютерного моделирования в различных программных средах – ABAQUS, ANSYS Workbench, COMSOL Multiphysics [5–7], однако влияние дефектов в области контакта кристалла с подложкой в этих моделях не рассматривается. Целью данной работы является создание термомеханической модели и проведение с ее помощью исследований, возникающих в элементах конструкции МЭМ термомеханических напряжений в зависимости от параметров дефекта.

В качестве объекта исследования был выбран многокристальный силовой электронный модуль, состоящий из трех кристаллов кремниевых мощных биполярных транзисторов (Рис. 1). Кристаллы с помощью токопроводящего адгезива закреплены на медной подложке, которая через слой термопасты размещалась на радиаторе. Для оценки влияния качества контактного слоя на распределения температуры и термомеханических напряжений в конструкции МЭМ в контактный слой одного из кристаллов искусственно вводился дефект в виде пустот или неполного заполнения адгезивом контактного соединения кристалла с подложкой.

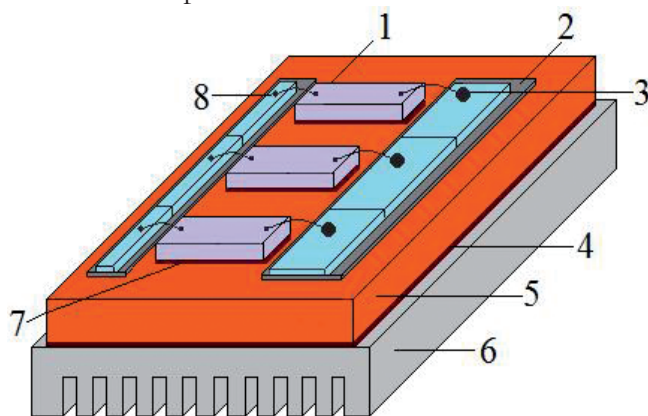


Рис. 1. Конструкция МЭМ: 1 – кристалл; 2 – диэлектрик; 3 – вывод эмиттера; 4 – термопаста; 5 – медная подложка; 6 – радиатор; 7 – адгезив; 8 – вывод базы.

2. ОПИСАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчетные температурные и термомеханические исследования МЭМ проводились для упрощенной модельной конструкции, геометрия которой представлена на Рис. 2. В области клеевого соединения третьего кристалла с подложкой моделировался дефект, который характеризовался коэффициентом относительного размера дефекта $K_D = S_D - S_0$, где S_D , S_0 – площади дефектной области и нижней поверхности кристалла соответственно.

Температурное поле $T_i(x, y, z)$ в структуре многокристальной системы и деформационные перемещения её слоев $\vec{u}_i(x, y, z, t)$ определяются из совместного решения уравнений термоупругости и теплопроводности [8]:

$$\mu_i \nabla^2 \vec{u}_i + (\lambda_i + \mu_i) \nabla (\nabla \vec{u}_i) - (3\lambda_i + 2\mu_i) \alpha_i \nabla (T_i - T_0) = 0, \quad i = 1, \dots, 8, \quad (1)$$

$$\nabla (k_i(T_i) \nabla T_i) = 0, \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды; $\lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)}$, $\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}$ – коэффициенты Ламе; $E_i(T_i)$, $\nu_i(T_i)$, $\alpha_i(T_i)$ – модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент теплового расширения материалов структуры; $k_i(T_i)$ – коэффициенты теплопроводности материалов структуры.

Все внешние поверхности элементов МЭМ считаются свободными. Температура нижней поверхности основания подложки принимается равной температуре радиатора T_r . На верхних поверхностях каждого из трех полупроводниковых кристаллов МЭМ задается плотность мощности

$$q = -\lambda_i(T_i) \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=h} = \frac{W}{S_{ar}}, \quad (3)$$

где W – рассеиваемая кристаллом тепловая мощность, S_{ar} – площадь активной области

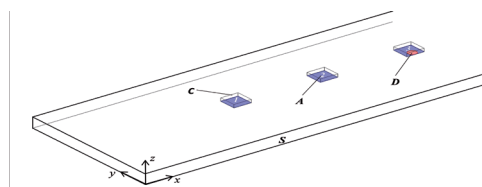


Рис. 2. Геометрия расчетной модели МЭМ: С – кремниевый кристалл; А – слой адгезива; D – дефект; S – медная подложка.

кристалла; $h = \sum_{k=1}^3 h_k$ – высота МЭМ, h_k толщина k -го слоя конструкции МЭМ. Все внешние поверхности S_i конструкции МЭМ находятся в условиях естественного теплообмена:

$$\lambda_i T_{i,z}|_{S_i} + \alpha_n (T_0 - T_i|_{S_i}) = 0, \quad (4)$$

где α_n – коэффициент теплообмена естественной конвекцией, значение которого лежит в пределах $5 \div 25$ Вт/(м²·К) и является параметром модели. В процессе расчета оно уточняется итерационным методом согласно экспериментальных данных температуры нагрева выбранного элемента структуры модели МЭМ. В дальнейшем, в представленном расчетном варианте, такой температурой являлась температура p - n перехода 3-го кристалла.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Решение модельной задачи (1) – (4) находилось численным методом. Разработанная программа включала в себя обращение к программной среде COMSOL Multiphysics.

В экспериментальном модельном макете МЭМ, рассмотренном в данной статье, размеры медной пластины составляли – $85 \times 17 \times 1.5$ мм; а в качестве кремниевых кристаллов использовались кристаллы транзистора КТ504 с размерами $2 \times 2 \times 0.45$ мм. В качестве адгезива использовался клей марки ХН9960-1 фирмы NAMICS [9] с коэффициентом теплопроводности $\lambda_A = 75$ Вт/м·К; толщина слоя адгезива при расчетах изменялась в пределах $\delta = 5 \div 50$ мкм; в качестве дефекта в слое адгезива рассматривались воздушные пустоты с коэффициентом теплопроводности $\lambda_D = 0.022$ Вт/м·К, а коэффициент относительного размера дефекта изменялся в пределах $K_S = 0.05 \div 0.2$. Рассеиваемая кристаллами мощность составляла $W = 10$ Вт, что является максимально допустимой мощностью для данного типа транзистора.

Расчетные исследования показали, что максимальное значение температуры в структуре достигается на верхней поверхности 3-го кристалла ($z = 1.98$ мм) в области, расположенной над центром дефекта ($z = 1.53$ мм) (Рис. 3).

Анализ профилей показывает, что вблизи границ дефекта (пустот) в слое адгезива градиент температуры резко возрастает, что в свою

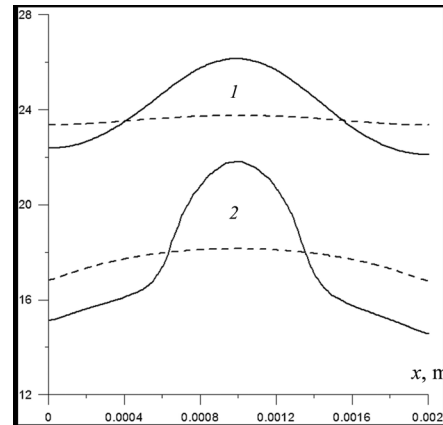


Рис. 3. Распределение температуры на верхней (1) и нижней (2) поверхностях кристаллов (вдоль оси симметрии кристалла) при толщине слоя адгезива $\delta = 30$ мкм и относительном размере дефекта $K_S = 0.2$: (сплошная линия – кристалл № 3, пунктир – кристалл № 2).

очередь приводит к резкому возрастанию термомеханических напряжений сдвига (Рис. 4).

Значения механического напряжения на графике указаны в относительных единицах, приведенных к предельному значению сдвигового напряжения для данного типа адгезива, равному $\sigma_{SC} = 13$ МПа [9]. Как видно из представленной зависимости для транзистора с дефектом в контактом соединении, работающего на максимально допустимой мощности, напряжения сдвига вблизи границ дефекта достигают предельного значения $\sigma_S/\sigma_{SC} \approx 1$, то есть возможен сдвиг кристалла с последующим его отрывом от подложки.

На Рис. 5 представлены результаты расчетных исследований зависимости напряжения сдвига от относительного размера дефекта K_S и от толщины слоя адгезива δ .

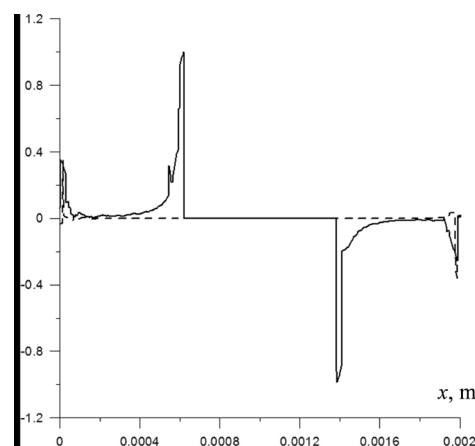


Рис. 4. Распределение термомеханического напряжения сдвига в слое адгезива с дефектом на границе с кристаллом № 3: $z = 1.53$ мм, $K_S = 0.2$, $\delta = 30$ мкм.

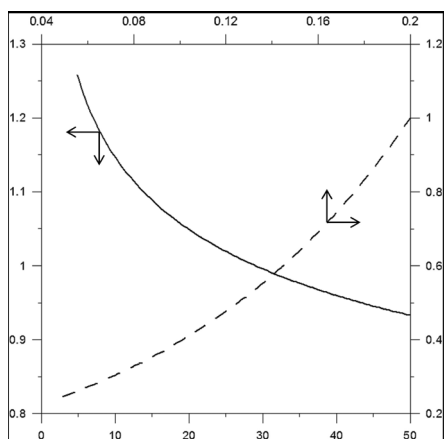


Рис. 5. Зависимости термомеханического напряжения сдвига от параметров модели, $\sigma_{sc} = 13$ МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что термомеханическое напряжение сдвига уменьшается с ростом толщины адгезива. При значениях $\delta \ll 10$ мкм наблюдается быстрый рост сдвигового напряжения. Так для представленного расчетного варианта структуры уменьшение толщины клеевого слоя в три раза приводит к возрастанию значения сдвигового напряжения до значения $1.2\sigma_{sc}$. С увеличением размера дефекта K_s максимальное значение термомеханического напряжения сдвига растет, что как уже отмечалось, ведет к ускорению деградации контактного соединения. Полученные результаты с использованием известных моделей разрушения (деградации) контактных соединений [10] позволяют количественно оценить влияние размера дефекта (пустот) в слое адгезива на его надежность.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки приращения температуры кристаллов ΔT_j (температуры перехода транзисторов) при рассеянии в них заданной мощности производились измерения теплового сопротивления между p - n -переходом транзистора и подложкой, на которой монтировались кристаллы. Согласно стандартам, тепловое сопротивление транзистора R_{Tjc} относительно его корпуса определяется приращением температуры p - n -перехода транзистора при рассеивании в нем единичной тепловой мощности [11]:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (5)$$

где T_j — температура перехода транзистора; T_c — фиксированная температура корпуса или

подложки, на которой смонтирован кристалл; P — мощность, рассеиваемая в транзисторе.

Измерения теплового сопротивления осуществлялись модуляционным методом [12], в котором через каждый транзистор пропускалась последовательность импульсов греющего тока с постоянным периодом следования и изменяющейся по гармоническому закону длительностью. Такая широтно-импульсная модуляция греющей мощности вызывала периодическое изменение температуры перехода транзисторов $T_j(t)$, сдвинутой по фазе относительно мощности $P(t)$ на некоторый угол φ . Измерив амплитуду переменной составляющей температуры перехода T_{j1} по изменению температурочувствительного параметра (ГЧП), линейно зависящего от T_j , и зная амплитуду переменной составляющей рассеиваемой мощности P_1 , можно определить модуль Z_T и фазу φ теплового импеданса на частоте модуляции ν :

$$Z_T = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im} T_j}{\text{Re} T_j}, \quad (6)$$

где $\text{Im} T_j$ и $\text{Re} T_j$ — мнимая и вещественная Фурье-трансформанты температуры перехода на частоте модуляции ν .

Модуляционный метод позволяет измерять компоненты теплового сопротивления, определяемые особенностями конструкции объекта, по которому распространяется тепловой поток от активной области кристалла в подложку и далее в радиатор и окружающую среду [13]. Для этого производится измерение зависимости модуля $Z_T(\nu)$, фазы $\varphi(\nu)$ и вещественной части $\text{Re} Z_T(\nu)$ теплового импеданса от частоты модуляции ν греющей мощности. В этих зависимостях имеются особенности в виде пологих участков и точек перегиба, которые связаны с компонентами теплового сопротивления. Для выявления этих особенностей производится сглаживание $\text{Re} Z_T(\nu)$ и последующее дифференцирование по частоте модуляции. Сглаживание осуществляется с помощью сплайн-интерполяции зависимости $\text{Re} Z_T(\nu)$, а вычисление производной производится на основе расчета коэффициентов линейной регрессии в каждой точке графика $\text{Re} Z_T(\nu)$. Количество точек для сглаживания и вычисления производной задает оператор.

Измерения компонент теплового сопротивления производились с помощью аппаратно-программного комплекса, в котором реализован модуляционный метод [14]. Транзистор подключался по схеме с общей базой. В качестве ТЧП использовалось прямое напряжение на эмиттере транзистора при измерительном токе 10 мА. Амплитуда импульсов греющего тока устанавливалась равной 1000 мА, период следования импульсов – 480 мкс, частота модуляции греющей мощности варьировалась в диапазоне от 2 до 400 Гц. Результаты измерения частотной зависимости вещественной части $Re Z_T(\nu)$ теплового импеданса для транзистора № 2 представлены на **Рис. 6**.

В верхнем графическом окне показана сглаженная зависимость $Re Z_T(\nu)$ с установленным оператором количеством точек для сглаживания равным 7. В нижнем окне показана зависимость $[d(Re Z_T)/d\nu]^{-1}$ как функция переменной $Re Z_T$. Положение локальных максимумов относительно оси абсцисс позволяет определить компоненты теплового сопротивления R_T . Первый максимум соответствует компоненте теплового сопротивления R_{T1} «переход-подложка», второй максимум – компоненте R_{T2} «переход-радиатор». Значения R_{T1} и R_{T2} для транзистора № 2 равны соответственно 2.45 и 2.62°K/Вт. Результаты измерения R_{T1} и R_{T2} у транзистора № 1 отличаются от значений для транзистора № 1 не более чем на 3% и далее не рассматривались. Аналогичные измерения компонент теплового сопротивления, проведенные для кристалла № 3 с дефектом монтажа к подложке, дали значения $R_{T1} = 2.63^\circ\text{K}/\text{Вт}$ и $R_{T2} = 2.84^\circ\text{K}/\text{Вт}$.

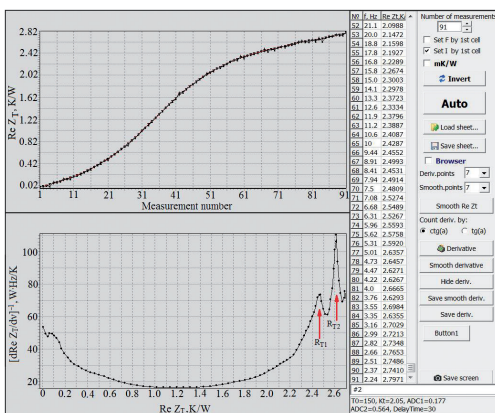


Рис. 6. Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса (вверху) и результат ее обработки (внизу).

Вт. При рассеивании в обоих транзисторах мощности 10 Вт приращение температуры перехода ΔT_j относительно подложки составит для 2-го кристалла 24.5°С, а для 3-го кристалла – 26.3°С. Полученные экспериментально значения перегрева обоих кристаллов хорошо согласуются с результатами моделирования (23.8°С и 26.1°С соответственно).

Другой способ проверки результатов моделирования основан на измерении теплового излучения от нагретого кристалла с биполярным транзистором. Нагрев кристалла осуществлялся пропусканием через транзистор импульсов тока с увеличивающейся по логарифмическому закону длительностью. Скважность импульсов, устанавливаемая оператором, равна 1. Это означает, что нагрев кристалла осуществлялся постоянным током с кратковременными переключениями из режима нагрева в режим измерения ТЧП – прямого падения напряжения на эмиттерном переходе. Продолжительность процесса нагрева, по окончании которого измерялось тепловое излучение кристалла, оценивалась на основе анализа переходной тепловой характеристики (ПТХ), представляющей собой зависимость теплового импеданса от длительности импульсов греющего тока. Тепловой импеданс $Z_T(t)$ определялся согласно выражению:

$$Z_T(t) = \frac{T_j(t) - T_j(t=0)}{I_{ht} \cdot U_{ht}}, \quad (7)$$

где $T_j(t)$ – температура перехода в произвольный момент времени t ; $T_j(t=0)$ – температура перехода в начальный момент времени; I_{ht} – амплитуда импульсов греющего тока; U_{ht} – напряжение на транзисторе. Результат измерения ПТХ транзистора №2 представлен на **Рис. 7**. Из графика $Z_T(t)$ видно, что при длительности импульсов греющего тока в диапазоне от 40 до 800 мс, значение теплового импеданса увеличивается относительно слабо. Это указывает на то, что

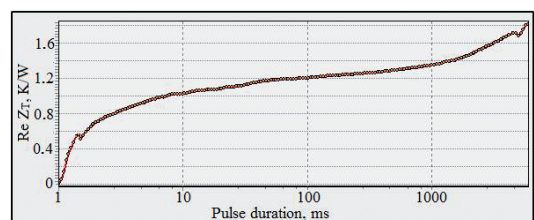


Рис. 7. Переходная тепловая характеристика.

в этом диапазоне длительностей импульсов происходит нагрев кристалла, а температура подложки изменяется незначительно. Поэтому измерение теплового поля от нагретых кристаллов производилось после того, как длительность греющих импульсов достигала 800 мс. Амплитуда импульсов устанавливалась равной 8.0 А, что обеспечивало выделение в транзисторе мощности 9.1 Вт.

Измерение температурных полей производилось тепловизором Testo 876 с ИК-матрицей тепловизора 160×120 пикселей, температурной чувствительностью менее 80 мК, спектральным диапазоном от 8 до 14 мкм. Поскольку для исследуемых кристаллов фокусное расстояние объектива у Testo 876 слишком большое, то была установлена дополнительная германиевая линза с фокусным расстоянием 9 мм [15]. Термограммы кристаллов № 2 и № 3 биполярных транзисторов представлены на **Рис. 8**. Для удобства восприятия температурного поля на **Рис. 8а** приведено увеличенное изображение кристалла № 3. В контактное соединение этого кристалла с подложкой искусственно введен дефект в виде не полностью заполненной адгезивом области контакта кристалла с подложкой.

С помощью тепловизора Testo 876 на полученных термограммах можно определить температуру максимально нагретой области кристалла. У кристалла № 2, слой адгезива которого не содержит дефектов, температурное поле активной области кристалла однородное. Температура кристалла по всей поверхности примерно одинакова и равна $T_2 = 40.5^\circ\text{C}$. Для кристалла № 3 с дефектом в слое адгезива распределение температуры по площади кристалла существенно неоднородно. В

области дефекта максимальная температура кристалла равна $T_3 = 43.6^\circ\text{C}$, что заметно выше, чем средняя температура по кристаллу. При этом следует учесть, что точное определение температуры поверхности кристалла требует знания излучательной способности кремния, которая, в свою очередь, зависит от температуры, состояния поверхности и наличия оксидной пленки на поверхности кристалла [16]. Поэтому при сравнении тепловых полей двух кристаллов можно корректно оценивать только их разность температур $\Delta T_{32} = T_3 - T_2$. При рассеиваемой в кристаллах тепловой мощности 9.1 Вт разность $\Delta T_{32} = 3.1^\circ\text{C}$, а при пересчете на 10 Вт рассеиваемой мощности – $\Delta T_{32} = 3.4^\circ\text{C}$. Полученное значение примерно в 1.5 раза превышает результат моделирования ($\Delta T_{32} = 2.3^\circ\text{C}$). Учитывая, что для кристалла № 3 тепловое поле является существенно неоднородным, и средняя температура примерно на 1°C ниже максимальной, можно сделать вывод, что результаты измерения разности средних температур ΔT_{32} для двух кристаллов достаточно хорошо согласуются между собой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была разработана термомеханическая модель многокристалльной системы, в которой присутствует дефект в области соединения посредством адгезива одного из кристаллов МКС с подложкой. Проведены расчеты температуры и соответствующих термонапряжений в различных слоях структуры объекта моделирования. Сделаны оценки термомеханических напряжений, возникающих в слое адгезива вследствие неоднородного распределения температуры, и исследовано влияние толщины адгезива и размера дефекта на величину напряжения сдвига. Показано, что при малых значениях толщины адгезива наблюдается резкий рост величины сдвигового напряжения. Для представленного расчетного варианта структуры уменьшение толщины слоя адгезива в три раза приводит к возрастанию значения сдвигового напряжения до значения, превышающего на 20% предельное значение сдвигового напряжения для данного типа адгезива. При увеличении относительного размера дефекта K_s напряжение сдвига

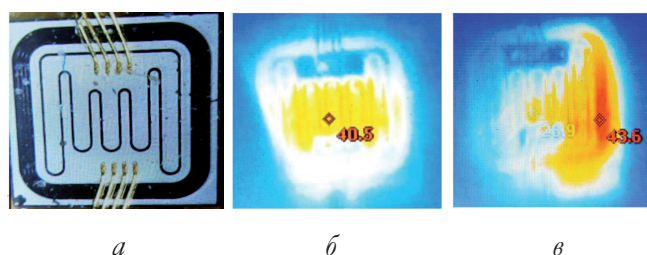


Рис. 8. Кристалл биполярного транзистора: а) внешний вид; б) тепловое поле кристалла № 2; в) тепловое поле кристалла № 3 (с дефектом адгезива).

монотонно возрастает и достигает предельного значения при условии, что размер дефекта составляет 0.2 от общей площади контакта кристалла с подложкой. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало, что они хорошо согласуются между собой, что подтверждает адекватность разработанной термомеханической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barbagallo C, Malgioglio GL, Petrone G, Cammarata G. Thermo-Mechanical Analysis of a Multi-Chip Power Module. *ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment*, 2015:1-6.
2. Yayong Y, Yuxin G, Zhiqiang JW, Yong K. An Automated Electro-Thermal-Mechanical Co-Simulation Methodology Based on PSpice-MATLAB-COMSOL for SiC Power Module Design. *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)*, 2021, 3:499-503.
3. Погалов АИ, Титов АЮ, Тимошенко СП. Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях. *Известия вузов. Электроника*, 2019, 24(6):565-572.
4. Yifei L, Fei X, Bo W, Binli L. Failure Analysis of Power Electronic Devices and Their Applications under Extreme Conditions. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, 2(1):91-100.
5. Cheolgyu K, Chulmin O, Yunhwa C, Kyung-Oun J. Improvement in Thermomechanical Reliability of Power Conversion Modules Using SiC Power Semiconductors: A Comparison of SiC and Si via FEM Simulation. *J. Microelectronics Packaging Society*, 2018, 25(3):21-30.
6. Jibing C, Bowen L, Maohui H, Shisen H. Study of the Solder Characteristics of IGBT Modules Based on Thermal-Mechanical Coupling Simulation. *Materials*, 2023, 16(9):3504.
7. Матюхин СИ, Фроленков КЮ, Малый АО, Вишняков АС, Орлов ЕЮ, Санников МД. Компьютерное моделирование термомеханических деформаций, возникающих при производстве и эксплуатации силовых полупроводниковых модулей паяной конструкции. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2019, 4-1(336):35-41.
8. Боли Б, Уэйнер Д. *Теория температурных напряжений*. М., Мир, 1964, 512 с.
9. Namics Corporation XH9960-1. URL: <https://www.datasheets.com/en/part-details/xh9960-1-namics-corporation-416981819> (дата обращения: 31.08.2023).
10. Азин АВ, Марицкий НН, Пономарев СВ, Рикконен СВ. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем. *Вестник Томского гос. университета. Математика и механика*, 2022, 76:43-55; doi: 10.17223/19988621/76/4.
11. ГОСТ 19656.15-84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. М., Изд-во стандартов, 1984, 21 с.
12. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, 80:205-212.
13. Смирнов ВИ, Гавриков АА, Шорин АМ. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация. *Автоматизация процессов управления*, 2017, 2(48):98-105.
14. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33:6211-6216.
15. Сергеев ВА, Низаметдинов АМ, Фролов ИВ, Кузьмин НП. Оценка неоднородности токораспределения в структурах биполярных и гетеробиполярных ВЧ и СВЧ транзисторов по температурному профилю. *Автоматизация процессов управления*, 2023, 3(73):85-93.
16. Госсорг Ж. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применения*. М., Мир, 1988, 416 с.

Ходаков Александр Михайлович

к.ф.-м.н., с.н.с.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: ln23al@yandex.ru

Смирнов Виталий Иванович

д.т.н., проф.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: smirnov-vi@mail.ru

Сергеев Вячеслав Андреевич

д.т.н., проф.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: sva@ulstu.ru

Тарасов Руслан Геннадьевич

соискатель

НПП "Завод Искра"

75, пр. Нариманова, Ульяновск 432030, Россия

E-mail: rgtarasov@mail.ru

Гавриков Андрей Анатольевич

к.т.н., с.н.с.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: a.gavrikoff@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.223

Микрочип для выделения экзосом с возможностью одновременной импрегнации его иматинибом: анализ *in vitro*

¹Амир Монфаредан, ²Фахер Рахим, ³Кожобеков К.Г., ¹Голамреза Тавусидана, ¹Мохаммад Хоссейн Модарресси, ⁴Алавиесадат Хоссейнинасаб, ⁵Али-Акбар Агаджани-Афрузи, ¹Махди Шафи Сабет, ¹Элахе Мотеvasели

¹Тегеранский университет медицинских наук, <http://en.tums.ac.ir/>

Тегеран 1416753955, Иран

²Университет Джихан-Сулеймания, <https://siliciban.edu.krd/>

Сулеймания 46001, Курдистан, Ирак

³Ошский государственный университет, <https://oshsu.kg/ru/>

Ош 723500, Кыргызстан

⁴Компания GeneDia Life science, <https://tracxn.com/>

Тегеран 13000-15000, Иран

⁵Университет Пайаме Нур, <https://pnu.ac.ir/>

Тегеран 19569, Иран

E-mail: monfaredanamir@gmail.com, e_motevaseli@tums.ac.ir, rahim.fakher@siliciban.edu.krd, [kuzhobekov@oshsu.kg](mailto:kudayberdi.kozhobekov@oshsu.kg), g-tavoosi@tums.ac.ir, modaresi@sina.tums.ac.ir, sbrzd.bsni@gmail.com, aghajani3@gmail.com, mshafies@sina.tums.ac.ir

Postupila 17.01.2024, recenzirvana 18.01.2024, prijeta 19.01.2024, objavivana 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Экзосомы, небольшие двухслойные мембраны, полученные из эукариотических клеток, были идентифицированы как полезная естественная платформа доставки благодаря их подходящему размеру, биосовместимости, структурной стабильности, высокой нагрузочной способности и возможности редактирования поверхности. Из-за сложности поддержания высокой чистоты экзосомы было предпринято несколько попыток использовать методы выделения экзосом. В настоящем исследовании был проведен процесс мягкой литографии для создания каналов для разделения экзосом с функцией иммуноаффинности. Тесты как по биохимическим, так и по биофизическим категориям были проведены для проверки качества экстрагированных экзосом из различных источников (сыворотка, клеточный супернатант и моча) и сравнения их с коммерчески доступным набором. Результаты показали, что предложенный метод способен изолировать экзосомы с высоким выходом, чистотой и низкими затратами времени. Все формы экзосом, нагруженных иматинибом, проявляли противоопухолевую активность в отношении клеточной линии KYO-1.

Ключевые слова: персонализированная медицина; экзосома; лаборатория на чипе; лейкемия; таргетная терапия

УДК 61:53(075.9)

Благодарности: Это исследование было проведено в форме проекта, одобренного под номером 99314850605 факультета современных медицинских технологий Тегеранского университета медицинских наук. Исследование было поддержано Тегеранским университетом медицинских наук [грант №. 99-3-148-50605]. **Этическое одобрение и согласие на участие:** Это исследование было одобрено под номером этического кода IR.TUMS.MEDICINE.REC.1399.969 в Комитете по этике медицинского факультета Тегеранского университета медицинских наук.

Для цитирования: Амир Монфаредан, Фахер Рахим, Кожобеков К.Г., Голамреза Тавусидана, Мохаммад Хоссейн Модарресси, Алавиесадат Хоссейнинасаб, Али-Акбар Агаджани-Афрузи, Махди Шафи Сабет, Элахе Мотеvasели. Микрочип для выделения экзосом с возможностью одновременной импрегнации его иматинибом: анализ *in vitro*. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):223-238. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.223.

Designing a microchip for exosome isolation with the ability to simultaneously impregnate it with imatinib: an in vitro analysis

Amir Monfaredan, Elahe Motevaseli, Gholamreza Tavoosidana

Tehran University of Medical Sciences, Department of Molecular Medicine, School of Advanced Technologies in Medicine, <http://en.tums.ac.ir/>

Tehran 1416753955, Iran

E-mail: monfaredanamir@gmail.com, e_motevaseli@tums.ac.ir, g-tavoosi@tums.ac.ir

Fakher Rahim

Cihan University-Sulaimaniya, <https://sulicihan.edu.krd/>

Sulaimaniya 46001, Iraq

E-mail: rahim.fakher@sulicihan.edu.krd

Kudaiberdi G. Kozhobekov

Osh State University, <http://oshsu.kg/ru/>

Osh 723500, Kyrgyzstan

E-mail: kudayberdi.kozhobekov@oshsu.kg

Mohammad Hossein Modarressi

Tehran University of Medical Sciences, Department of Medical Genetics, Faculty of Medicine, <http://en.tums.ac.ir/>

Tehran 1416753955, Iran

E-mail: modaresi@sina.tums.ac.ir,

Alaviyehsadat Hosseininasab

GeneDia Life science company, <https://tracxn.com/>

Tehran 13000-15000, Iran

E-mail: sbrzd.bsni@gmail.com

Ali-Akbar Aghajani-Afrouzi

Payame Noor University, Department of Business Administration, <https://pnu.ac.ir/>

Tehran 19569, Iran

E-mail: aghajani3@gmail.com, mshafiees@sina.tums.ac.ir

Mahdi Shafiee Sabet

Tehran University of Medical Sciences, School of Medicine, <http://en.tums.ac.ir/>

Tehran 14167539559, Iran

E-mail: mshafiees@sina.tums.ac.ir

Received January 17, 2024, peer-reviewed January 18, 2024, accepted January 19, 2024, published April 25, 2024

Abstract: Exosomes, a small bilayer membrane derived from eukaryotic cells, have been identified as a useful natural delivery platform due to their suitable size, biocompatibility, structural stability, high loading capacity, and editable surface capability. Due to the difficulty of maintaining the highly pure exosome, several attempts have conducted the techniques for exosome isolation. In recent years, microstructures have found many applications in chemistry, biology, and medicine due to their high accuracy and low cost of materials. Soft lithography is a low-cost, fast, accurate, and yet widely used method of construction of Micron channels. In the present study, a soft lithography process has been performed to construct channels for exosome separation with immunoaffinity function. Both biochemical and biophysical categories tests were performed to examine the quality of extracted exosomes from different sources (serum, cell supernatant, and urine) and compared with the commercially available kit. Results showed that the current technique was capable to isolate exosomes with a high yield rate, purity, and low time consumption. All forms of the imatinib loaded exosomes exhibited the antitumor activity against KYO-1 cell line.

Keywords: personalized medicine; exosome; laboratory on a chip; leukemia; targeted therapy

UDC 61:53(075.9)

Acknowledgements: This study was carried out in the form of a project approved under the number 99314850605 of the Faculty of Modern Medical Technologies of Tehran University of Medical Sciences. This study was supported by the Tehran University of medical sciences [grant no. 99-3-148-50605].

Ethics approval and consent to participate: This study was approved by ethics code number IR.TUMS.MEDICINE.REC.1399.969 in the Ethics Committee of the Faculty of Medicine of Tehran University of Medical Sciences

Authors' contributions: Amir Monfaredan analyzed data. Amir Monfaredan wrote the manuscript. Amir Monfaredan and Elahe Motevaseli contributed to the study concept, and drafted and revised the manuscript. Amir Monfaredan and Elahe Motevaseli confirm the authenticity of all the raw data. All authors read and approved the final version of the manuscript.

For citation: Amir Monfaredan, Fakher Rahim, Kudaiberdi G. Kozhobekov, Gholamreza Tavoosidana, Mohammad Hossein Modarressi, Alaviyehsadat Hosseininasab, Ali-Akbar Aghajani-Afrouzi, Mahdi Shafiee Sabet, Elahe Motevaseli. Designing a microchip for exosome isolation with the ability to simultaneously impregnate it with imatinib: an in vitro analysis. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):223-238e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.223.

Содержание

1. Введение (225)
2. Материалы и методы (226)
3. Результаты (230)
4. Обсуждение (233)
5. Заключение (235)

Литература (235)

1. ВВЕДЕНИЕ

Внеклеточные носители (Extracellular vehicles, EV) или экзосомы стали одной из областей интереса из-за их примечательной роли не только в биологических процессах, но также в качестве биосовместимых носителей для диагностики и терапии [1]. Экзосомы представляют собой биосовместимые везикулы небольшого размера, способные покинуть систему мононуклеарных фагоцитов (mononuclear phagocyte system, МФС) [1]. Применение экзосом в биомедицинской диагностике и терапии выявило острую необходимость в новых технологиях быстрых и точных методов разделения экзосом в жидкостях организма. Из-за биомолекулярного содержания экзосом, таких как белки, нуклеиновые кислоты (м. РНК, микроРНК и ДНК), были предприняты многочисленные попытки выявить диагностический и терапевтический потенциал экзосом, связанный с их ролью в межклеточных коммуникациях и доставке лекарств соответственно. . Одна из основных проблем связана с преодолением сложности жидкости

и отсутствия эффективных методов изоляции [2-4]. Экзосомы представляют собой структуры клеточного происхождения, содержащие липиды, белки и нуклеиновые кислоты. Они обнаруживаются в различных жидкостях организма и играют роль в физиологических и патологических процессах. Хотя их потенциал для клинического применения в качестве диагностических и терапевтических инструментов уже выявлен, основным узким местом, препятствующим развитию приложений в быстро растущей области исследований экзосом, является неспособность эффективно отделять очищенные экзосомы от других нежелательных компонентов в жидкостях организма. На сегодняшний день предложены и исследованы различные подходы к выделению экзосом; их основным кандидатом является микрофлюидная технология из-за ее относительной простоты, экономической эффективности и способности к точной и быстрой микромасштабной обработке и автоматизации. В частности, устранение необходимости маркировки экзосом представляет собой значительный прогресс с точки зрения простоты процесса, времени и стоимости, а также с точки зрения сохранения биологической активности экзосом. Несмотря на впечатляющий прогресс в области микрофлюидных стратегий выделения экзосом и многочисленные преимущества безметочных подходов для клинических применений, существующие микрофлюидные платформы для выделения экзосом все еще сталкиваются

с рядом проблем, которые препятствуют их использованию для обработки образцов [5-8].

В этом обзоре основное внимание уделяется недавно разработанным микрофлюидным платформам для выделения экзосом без меток, в том числе основанным на просевании, детерминистическом латеральном смещении, полевом потоке и фракционировании сжимающего потока, а также на вязкоупругих, акустических, инерционных, электрических и центробежных силах [9-11].

В последние годы область микрофлюидики позволила разработать новые методы очистки экзосом. Микрофлюидика предоставляет платформы, включая каналы микронного размера, для обработки небольших количеств жидкостей (от микролитров до пиколитров). Большинство микрофлюидных устройств изготовлены из специального полимера, называемого полидиметилсилоксан, ПДМС [3,12,13]. ПДМС оптически прозрачны и биосовместимы, что делает их полезным материалом для создания биожидкостных устройств. Микрофлюидные платформы могут классифицировать экзосомы с высокой степенью чистоты и чувствительности, сокращая при этом стоимость, время и объем реагентов. Микрофлюидный метод выделения экзосом на основе иммуноаффинности преодолевает многие проблемы традиционных методов (таких как ультрацентрифугирование, центрифугирование в градиенте плотности, тангенциальная проточная фильтрация, эксклюзионная хроматография), поскольку они являются регулируемыми, автоматическими, масштабируемыми и портативными. Экзосомы можно выделить из других компонентов образца на основе тех же специфических белков CD9, CD41, CD63 и CD81, а также специфические молекулы, такие как гепарин, Tim4 и пептиды, связывающие белок теплового шока, являются распространенными поверхностными маркерами экзосом для выделения на основе иммуноаффинности [14-17].

В данной работе представлены микрофлюидные устройства для выделения экзосом из различных источников с

использованием магнитных шариков, конъюгированных с CD68 [4,18,19].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование COMSOL. Уравнения, управляющие каналами, были сформулированы с использованием мультифизического программного обеспечения COMSOL версии 5.1. Поток моделировался как однофазный ламинарный поток, и из-за его малой толщины для моделирования использовались физические свойства дистиллированной воды при комнатной температуре и $pH = 7.4$. Эффективными и оптимизируемыми параметрами были заданы следующие: угол расположения позиций по длине чипа, проектная ширина криволинейного канала, высота чипа, количество лабиринтов, расчетный радиус кривизны криволинейного канала, ширина канала на выходе и входе, а также расход на входе.

Чиповая конструкция. Изготовление микрочипа для выделения экзосом с возможностью загрузки иматиниба осуществляли по стандартному протоколу мягкой литографии. Кремниевая пластина была покрыта фоторезистом SU8 (Microchem. Corp., Ньютон, Массачусетс). На 4-дюймовую пластину налили 5 см^3 фоторезиста SU8 и нанесли покрытие центрифугированием при 2300 об/мин. Выпечку вафель после центрифугирования осуществляли при температуре 60 и 95 градусов Цельсия в течение 2 часов и 15 минут соответственно. После завершения обжига маску точно выравнивали и подвергали воздействию УФ-излучения напряжением 360 мВ в течение 12 минут на пластине, покрытой SU8. После окончания экспонирования производилась промывка проявителем и изопропанолом в течение 4 и 8 минут соответственно до появления каналов. После подготовки формы готовили и барботировали полидиметилсилоксаном (ПДМС) (Microchem. Corp., Ньютон, Массачусетс) в соотношении 1:10. 10 см^3 раствора ПДМС и отвердителя вылили на форму и инкубировали при комнатной температуре в течение 24 часов для формирования чипа ПДМС. После полного формирования геля ПДМС с использованием плазмообразующего газа мощностью 12 мДж/мин в течение 4 минут

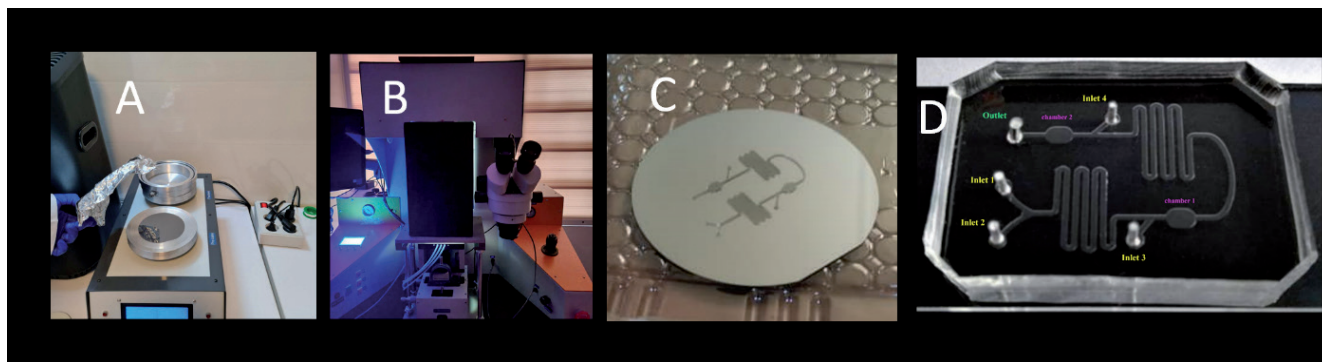


Рис. 1. А: этапы выпечки пластины при температуре 60 и 95 градусов Цельсия, Б: процесс экспонирования по футерованной маске на пластине, В: окончательная форма после воздействия проявителя и промывки изопропанолом, и D: окончательная форма чипа PDMS.

проводили стимуляцию геля и прикрепляли чип ПДМС к стеклу (Рис. 1).

АСМ-микроскопия. Топография, шероховатость поверхности, фазовое изображение, изображение трения, магнитные свойства и толщина монослоя анализируются с помощью АСМ-микроскопии. Чтобы исследовать изменения уровня чипа, а также высоты штифта и канала, чип промывали ацетоном и сушили при 60°C.

Экстракция экзосом на основе микрофлюидной технологии. В этой части исследования рассматривались три основных источника экзосом, включая сыворотку, мочу и супернатант клеточной культуры. Анти-CD63 (Abcam, Великобритания) конъюгировали с наночастицами Mag (Jiaquan Quantum Pickup Company, Ухань, Китай) с использованием традиционных методов. Общая связывающая способность наночастиц оценивалась примерно в 10 мкг антитела против CD63 на 1 мг наночастиц при использовании 1 мг/мл Mag-CD63. Образец, содержащий экзосому, смешивали с CD63-Mag и вводили в микрофлюидный чип через вход 1, а анти-CD63 (Abcam, Великобритания) повторно вводили через вход 2. Сдвоенным шприцевым насосом со скоростью потока 1-10 мкл/мин потоки смешивали в первом канале, в результате чего образовывался комплекс Mag-CD63-Exo. Иммуномагнитные частицы (CD63-Mag) удерживались в камере 1 с помощью магнитного диска. Затем из входа 3 вводили буфер PBS для промывки комплекса Exo-CD63-Mag. Затем его хранили в отсеке 2. Иммуноконъюгатные экзосомы собирали для исследования. Экзосомы

были выделены из сыворотки, мочи и клеточного супернатанта с использованием разработанного чипа, названного S-EXOChip, UE-EXOChip и SU-EXOChip соответственно. Кроме того, вход 4 определен для загрузки лекарственного средства, о чем будет сказано далее (Рис. 2).

Содержание белка в экзосомах. Содержание белка в экзосомах определяли методом Брэдфорда с использованием 0.10, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02 мг/мл бычьего сывороточного альбумина (BSA, Sigma, CAS no., 9048-46-8) при длине волны 595 нм [20].

Анализ проточной цитометрии. Чтобы оценить точность экстракции экзосом, на экстрагированных образцах проводили проточно-цитометрический анализ антитела против CD63 (Padza Padtenrajoooh, cat#MM108,

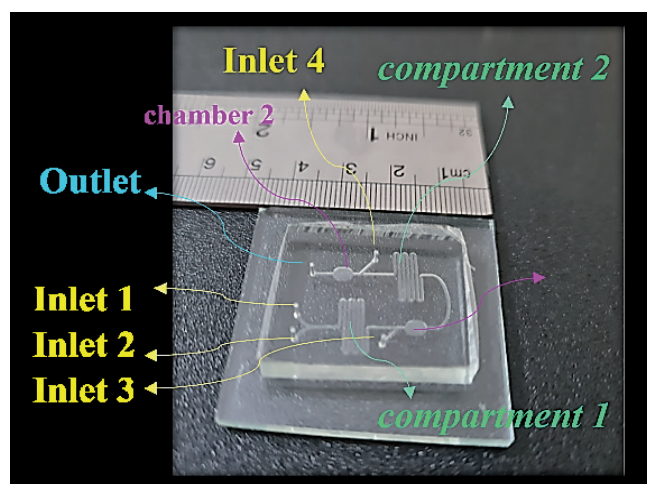


Рис. 2. Разнообразие входов, камер, каналов и выходов чипа. Таким образом, вход 1 и 2 – место инъекции суспензии, содержащей экзосому и специфический магнит, вход 3 – вход PBS, камера 1 – место, где смешивание останавливается этой ловушкой, а вход 4 – место загрузки иматиниба.

Иран) в соответствии с протоколами производителя. Вкратце, в пробирки, содержащие экзосомы, добавляли по 5 мг на тест, затем пробирки осторожно перемешивали и инкубировали в темноте в течение 60 минут при температуре 2-8°C. После этого промывали образцы, используя 1 мл разбавленного 1X буфера для анализа. Для сбора магнитных зерен микропробирки помещали в магнитную цепь, а затем центрифугировали со скоростью 3500×об/мин или при ней в течение 10 мин. Еще раз в пробирку добавляют 350 мкл аналитического буфера 1X и анализируют с помощью проточного цитометра (Millipore Merck, Германия).

Анализ размера и морфологии экзосом. Для измерения гидродинамического размера с помощью DLS-анализа 200 мкл экзосомального раствора экстрагированного клеточного супернатанта разводили 420 мкл отфильтрованного PBS. Затем образец помещали на лед и обрабатывали ультразвуком в течение 10 минут. Наконец, образец был помещен в устройство DLS с лазерным лучом длиной 632 нм, и результаты были проанализированы с помощью программного обеспечения Zeta Sizer.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) использовалась для анализа размера и морфологии экзосом. Экзосомы покрывали с помощью сканирующего электронного микроскопа FEI Nova 200 Nanolab Dual-beam FIB при низкой энергии (2.0-5.0 кВ) в лаборатории анализа электронной микроскопии (МС2) путем напыления золота или углерода термическим испарением. Затем 200 мкл экстрагированных экзосом клеточного супернатанта выливали на предметное стекло и сушили в течение одного часа при комнатной температуре. Затем образец исследовали с помощью электронной микроскопии.

Вестерн-блоттинг. К обоим экстрагированным образцам добавляли лизирующий буфер объемом 50 мкл с 1% ингибитором протеазы Холта (ThermoFisher Scientific, LTD, США) и инкубировали в течение 2 мин при комнатной температуре. Затем образцы выдерживали на льду в течение 10 минут и центрифугировали при 13000×об/мин в течение 15 минут при

4°C. Наконец, образцы хранили при -80°C для дальнейшего анализа. Общий объем 20 мкл каждого образца анализировали с помощью 12% полиакриламидного геля с ДСН (SDWS-PAGE), используемого для разделения и определения молекулярной массы белков при интенсивности напряжения 80 мВ. После разделения белковых полос образца на геле SDS-PAGE в клеточном лизате был обнаружен CD81 как поверхностный мембраноспецифичный белок экзосомы. Для формирования кассеты иммуноблота загружают гель и нитроцеллюлозную бумагу в прибор для блоттинга (Biorad, США). Перенос белковых полос осуществляется в течение 90 мин при напряжении 100 мВ. После этого мембрану промывали в блокирующем буфере в течение 60 мин при 37°C. Наконец, образцы окрашивали антителами против CD81 (1:4000) в буфере TBS (1x), выливали на мембрану из ПВДФ и помещали в шейкер-инкубатор на 37 часов при 37°C. Затем его трижды промывали буфером TBS, каждый раз по 10 мин.

Экстракция экзосомальной РНК и уровни экспрессии микроРНК. Экстракцию РНК проводили с использованием набора Exosome RNA Isolation Kit (№ по каталогу 58000) компании Norgen в соответствии с протоколами производителя. Первоначально добавляли 300 мкл буфера для лизиса А и 37.5 мкл буфера для лизиса в качестве добавки к каждому изолированному образцу экзосомы, затем образцы смешивали встряхиванием в течение 10 секунд. После инкубации образцов при комнатной температуре в течение 10 минут к смеси добавляли 500 мкл 96% этанола и хорошо перемешивали с Vertex в течение 10 секунд. После этого 500 мкл смеси переносят в колонку Mini Spin и центрифугируют при 6000×об/мин в течение 1 мин. После повторения предыдущего этапа в колонку добавляют 600 мкл промывного раствора А и центрифугируют при 13000 об/мин в течение 30 секунд, а затем центрифугируют при 13000 об/мин в течение 1 минуты. Наконец, объем 50 мкл промывочного раствора А добавляют в колонку и центрифугируют при 8000 об/мин в течение 1 минуты и хранят при -80°C для дальнейшего анализа.

Тотальные некодирующие РНК и малые РНК, такие как микроРНК, конвертировали в набор для экстракции кДНК (АВМ, товарный номер по каталогу G902). Образец микроРНК готовили путем смешивания 2 мкл 5X поли(А)-полимеразного реакционного буфера, 1.5 мкл АТФ (10 мМ), μ мкл $MnCl_2$ (25 мМ), 0.5 мкл поли(А)-полимеразы, дрожжей (1 мкг/мкл) и 2.5 мкл H_2O . Затем смесь инкубировали 30 мин при 37°C. Затем к остальному материалу добавляли 2 мкл адаптера miRNA Oligo (dT) (10 мМ). Смесь инкубировали в течение 5 минут при 65°C с последующим охлаждением колотым льдом. Наконец, к вышеуказанной смеси добавляли 1 мкл dNTP (10 мМ), 4 мкл 5X RT-буфера, 1 мкл RTase (200 ед./мкл) и 2 мкл H_2O . Синтез кДНК осуществляли путем инкубации образцов в течение 15 мин при 42°C и 10 мин при 70°C. Содержание микроРНК в образцах из трех источников: мочи, сыворотки и клеточного супернатанта определяли с использованием набора miRCURY™ LNATM microRNA Array Ну3™/Ну5™ (Exiqon, Дания) по стандартным протоколам. Выделение экзосом с использованием набора для изоляции экзосом Norgen (№ по каталогу 58000) из трех источников: мочи, сыворотки и клеточного супернатанта. qRT-PCR выполняли для каждого образца в трех системах ПЦР в реальном времени, следуя инструкциям производителя и используя разные праймеры (Таблица 1). Готовили смесь из 7 мкл Exiqon PCR Mastermix, 0.5 мкл Panel Primer (5 пмоль/мкл), 3 мкл хвостовой кДНК и 3 мкл Enhancer, а также 4 мкл воды, обработанной DEPC. Относительная экспрессия микроРНК-155 оценивала метод с U6 в качестве домашнего контроля.

Таблица 1

Праймеры qRT-PCR, используемые для синтеза кДНК

Праймеры	Последовательности
МиР150-5п-Форвард	5'-TCCCAACCCTGTACCAGTGAA-3'
МиР150-5п-Реверс	Универсальный
МиР92-3п-Форвард	5'-CACTTGTCCGGCCTGTAA-3'
МиР92-3п-Реверс	Универсальный
МиР155-5п-Форвард	5'-TGСТААТСГТГАТAGGGGТААА-3'
МиР155-5п-Реверс	Универсальный
МиР3786-Форвард	5'-CTGGACTTGGAGGCAGAAAA-3'
МиР3786-Реверс	Универсальный

Загрузка лекарств. Для загрузки иматиниба используется модифицированный метод прямой инкубации препаратов и экзосом, захваченных CD63-Mag, с циклом замораживания-оттаивания для увеличения. Экзосомы инкубировали с иматинибом в различных концентрациях. 10 нМ иматиниба со скоростью введения 1 мкл/мин переносили на вход 4 чипов при 25°C в течение 20 мин. Затем в канал вводили папаин и трипсин в концентрациях 0.1 и 0.02% со скоростью потока 1 мкл/мин соответственно.

Выпуск лекарства. Высвобождение иматиниба изучали с использованием диализного мешка. 3 мкг экзосомы гомогенизировали в 3 мл буфера PBS, затем переносили в мешок для диализа и помещали в закрытый контейнер с 60 мл буфера PBS, pH = 7.4, и температуру стабилизировали на уровне 37°C. Содержание высвободившегося иматиниба рассчитывали при длине волны 242 нм с использованием УФ-видимой спектроскопии. Стандартную кривую строили с использованием 1, 2, 5, 10, 15, 20 и 25,30 мкг/мл в растворе PBS.

Клеточная токсичность. МТТ-анализ используется для оценки токсичности нагруженных иматинибом экзосом, захваченных CD63-Mag, против клеточной линии KYO-1. Клеточный метаболизм клеток определяли путем мониторинга активности ферментов митохондриальной дегидрогеназы с использованием метилтиазолтетразолия бромид (МТТ) в качестве субстрата. В связи с этим 10 000 клеток предварительно культивировали в 96-луночных планшетах и инкубировали в течение 24 ч при 37°C с 4% CO_2 и 90% влажности. Экзосомальные образцы имели разные концентрации, включая 2, 4, 8, 10, 20, 50, 100 мкг/мл, и обрабатывались в течение 24, 48 и 72 часов. После этого в каждую лунку добавляли по 20 мкл раствора МТТ (10 мкг/мл) и инкубировали в течение 4 ч в указанных выше условиях. Наконец, супернатант отбрасывали и в каждую лунку добавляли по 100 мкл ДМСО, встряхивали круговыми движениями в течение 8 минут, а затем измеряли поглощение формазана при 490 нм с использованием считывателя ELISA. Процент жизнеспособности клеток

(IC50) исследовали с помощью программного обеспечения Graphpad Prism 6.0 (США).

Статистический анализ. Статистические данные анализировали с помощью Prism 7.0 (GraphPad Software, США). Значимость количества РНК и проверки qRT-PCR микроРНК среди экзосом оценивали с помощью одного прямого Т-теста. Статистически значимым считалось $p < 0.05$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем исследовании мы использовали микрофлюидную систему для захвата магнитных шариков, конъюгированных с CD63, для высокоэффективного разделения экзосом. Пресс-форма для чипов из полидиметилсилоксана (ПДМС) изготавливается из узорчатой кремниевой пластины SU-8 100 с использованием стандартной техники мягкой литографии с функцией иммуноаффинности (Рис. 1 и 3). На Рис. 2 показано разнообразие входов, камер, каналов и выходов чипа.

Изображения, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), показали поверхность чипа. На Рис. 4 показано двумерное (2D) и трехмерное (3D) изображения поверхности SU-8 100. После экстракции экзосом с помощью CD68-Mag физико-химические свойства экстрагированных экзосом исследовали с использованием DLS, SEM, проточной цитометрии, Брэдфорда, qRT-PCR и вестерн-блоттинга. В связи с этим образцы экзосом исследовали методом проточной цитометрии в присутствии и отсутствии фермента протеазы

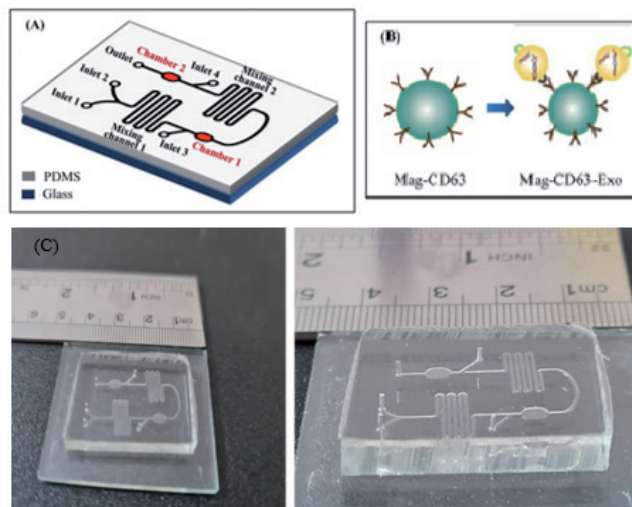


Рис. 3. Схематическая иллюстрация (А) и (С) микрофлюидного чипа и (В) принципов разделения экзосом на основе иммуноаффинности.

(Рис. 5А-Д). Гидродинамический размер экстрагированной экзосомы из различных биологических источников оценивали с использованием как коммерчески доступного набора, так и чипа SU-8 100. На Рис 5Е показано гидродинамическое распределение экзосом по размерам, извлеченных с помощью DLS-анализа, который позволил оценить большую часть популяции в пределах среднего диаметра 135 нм. Изображение анализа SEM показано на Рис 5F. Как можно видеть, удалось обнаружить экзосомы сферической формы диаметром от 30 до 175 нм. Сравнительное исследование клеточного супернатанта и содержания белков экзосом, полученных из мочи, с использованием методов чипа и набора с полуколичественным

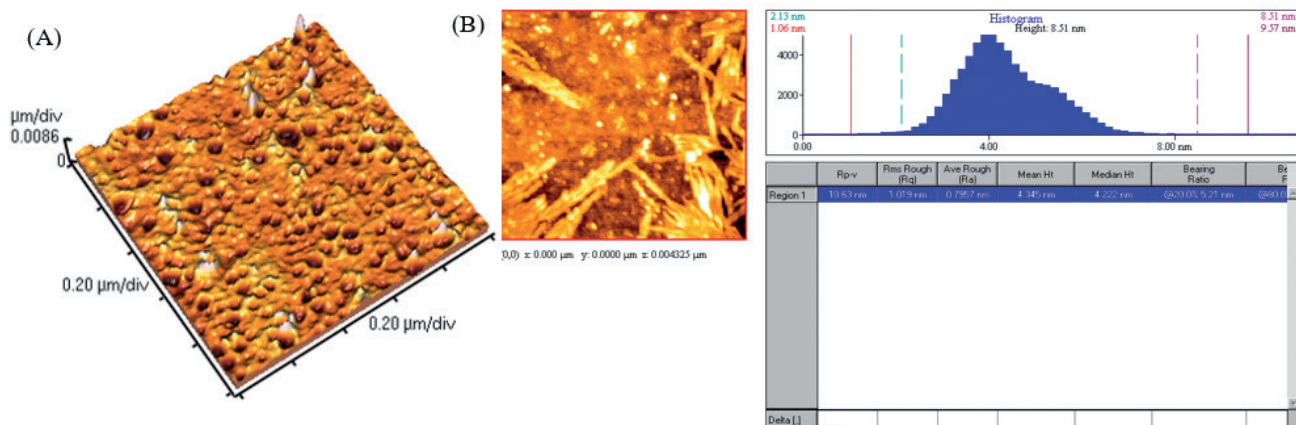


Рис. 4. 3D-изображения (А) и 2D-изображения (В) поверхности чипа SU-8 100.

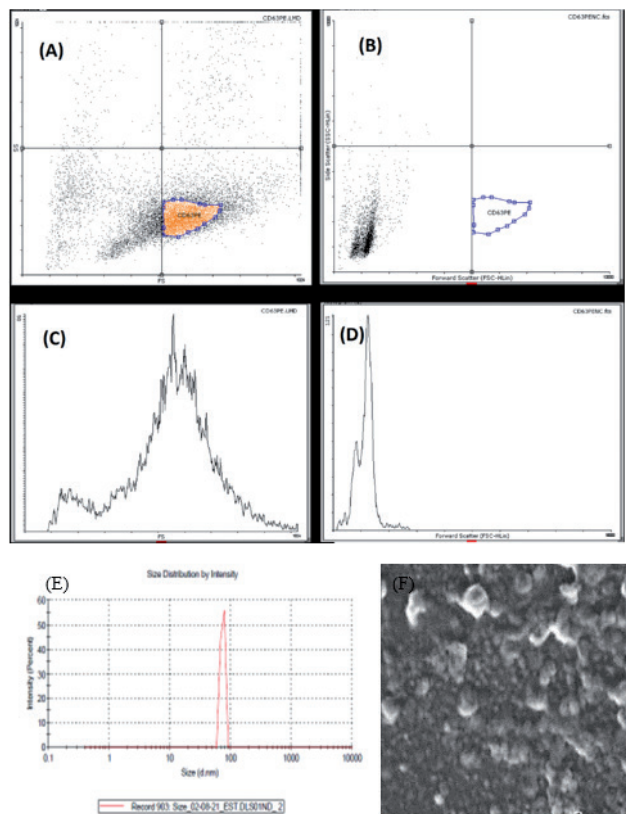


Рис. 5. (А) Анализ методом проточной цитометрии образца, экстрагированного чипом, против антитела CD68-PE. (В) Чип экстрагировал образец в присутствии ферментов протеаз. (С) Гистограмма образца, извлеченного из чипа. (D) Гистограмма образца, извлеченного из чипа, в присутствии ферментов протеазы. (Е) Гистограмма DLS изолятов экзосом. (F) СЭМ – изображения извлеченных экзосом.

методом Брэдфорда представлено на **Рис. 6**. Содержание белка в сыворотке и клеточном супернатанте существенно не изменилось при использовании обоих методов. В случае экзосом, экстрагированных мочой, хотя содержание коммерчески доступного белка было значительно выше, белки из экзосом,

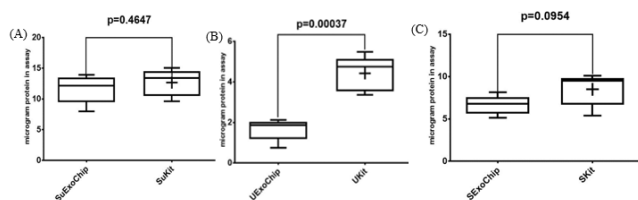


Рис. 6. Содержание белка в (А) клеточном супернатанте, (В) экзосомах мочи и (С) сыворотке с использованием коммерчески доступного набора чипов SU-8 100 от Bradford.

экстрагированных с помощью чипа, были более гомогенными.

Исследование профиля экспрессии экзосомных микроРНК. После того, как экстракция РНК была проведена в условиях, свободных от РНКазы, был проведен электрофорез в агарозном геле, чтобы подтвердить здоровье РНК и их качество. При исследовании в геле наличие рибосомальных полос S28, S18 и S5 указывает на отсутствие деградации РНК. Кроме того, размытие, наблюдаемое между этими двумя полосами, указывает на присутствие мРНК (**Рис. 7А**). На диаграмме ниже показана ось Y, показывающая экспрессию микроРНК на основе ее эталонного гена U6, а горизонтальная ось показывает происхождение образцов экзосом,

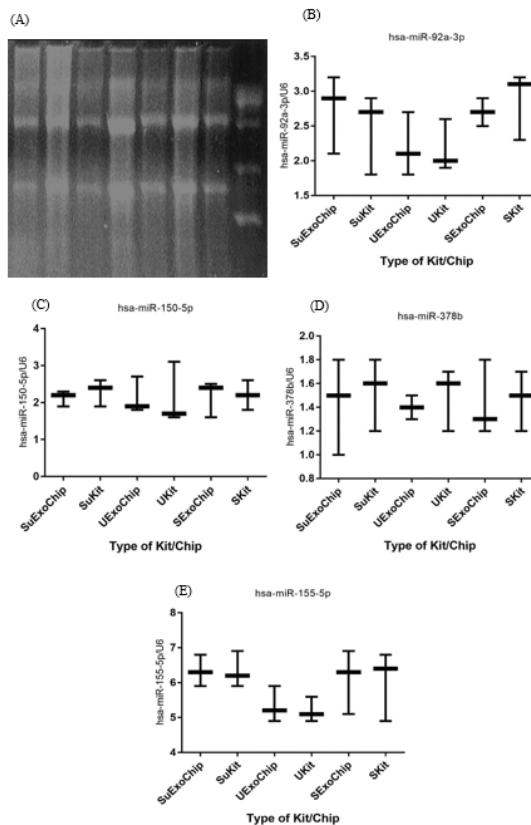


Рис. 7. (А) Качество экстракции РНК из образцов экзосом сыворотки, мочи и клеточного супернатанта с использованием электрофореза в 2% агарозном геле. Относительная экспрессия (В) миР-92а-3р, (С) миР-150-5р, (D) миР-378 и (Е) миР-155-5р в образцах экзосом сыворотки, мочи и клеточного супернатанта с использованием Микросхемы SU-8 100 и имеющегося в продаже комплекта. Изменения значимости, связанные с содержанием РНК в эксперименте, анализировали с использованием непарного t-критерия с порогом $P < 0.05$.

Таблица 2

Статистический анализ кратности экспрессии образцов сыворотки, мочи и клеточного супернатанта с использованием чипа SU-8 100 и коммерчески доступного набора выявил значимый характер гена миР-155 с использованием непарного Т-теста

	Источник жидкости	Чип СУ-8 100	Коммерчески доступный комплект	Величины
миР-92а	Экзосома клеточного супернатанта	Кратное изменение		1.68
		р-значение		0.6018
		Т		0.5657
		df		4
		Значение		Нет
	Сыворотка	Кратное изменение		1.39
		р-значение		0.6164
		Т		0.5423
		df		4
		Значение		Нет
	Моча	Кратное изменение		1.79
		р-значение		0.9274
		Т		0.09713
		df		4
		Значение		Нет
миР-150	Экзосома клеточного супернатанта	Кратное изменение		1.66
		р-значение		0.5263
		Т		0.6934
		df		4
		Значение		Нет
	Сыворотка	Кратное изменение		1.96
		р-значение		0.9319
		Т		0.09091
		df		4
		Значение		Нет

извлеченных с помощью коммерческого набора и чипа, разработанных в этом исследовании. Согласно Рис. 7В-Е и Таблице 2, существенных относительных различий в микроРНК не наблюдалось. Это указывает на то, что разработанный чип смог изолировать ее, не повреждая содержимое нуклеиновой кислоты экзосомы.

Выпуск иматиниба. Поскольку сохранение структуры носителя лекарственного средства, такой как экзосома, очень эффективно при высвобождении лекарственного средства, высвобождение иматиниба из экстрагированных экзосом исследовали с использованием обеих захваченных иматинибом CD63-Mag экзосом с чипом. На Рис. 6А показан пик адсорбции

раствора иматиниба в PBS. Как видно, пик максимального поглощения иматиниба расположен при 242 ± 1 нм. Калибровочная кривая с $R^2 = 0.994$ была представлена для оценки скорости высвобождения лекарственного средства (Рис. 8).

Оценка клеточной токсичности. Было проведено сравнительное исследование выживаемости клеточной линии KYO-1 свободного иматиниба, нагруженной иматинибом экзосомы, захваченной CD63-Mag, с чипом и коммерчески доступным набором. Согласно Рис. 9А-С, результаты указывают на дозозависимую токсичность свободного иматиниба, нагруженной иматинибом CD63-Mag-захваченной экзосомы с чипом и доступными наборами на клетках KYO-1. Кроме того, при обработке клеток экстрагированной экзосомой с использованием коммерческого набора эффективная доза была изменена до 100 мкмоль, но примечательно, что это связано с сохранением чипом структуры и морфологии экстрагированной экзосомы с течением времени. Эффективная доза была эквивалентна воздействию иматиниба непосредственно на клетки.

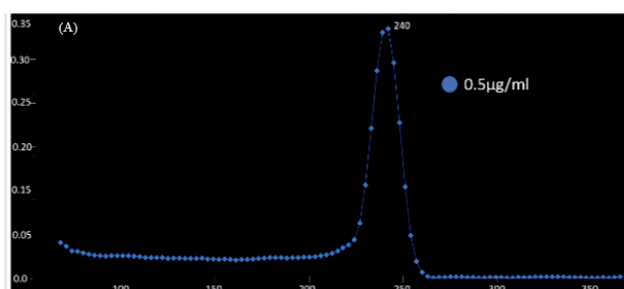


Рис. 8. (А) УФ-видимые спектры загруженной иматинибом CD63-Mag, захваченной экзосомы с чипом. (В) Линейное уравнение иматиниба в растворе PBS.

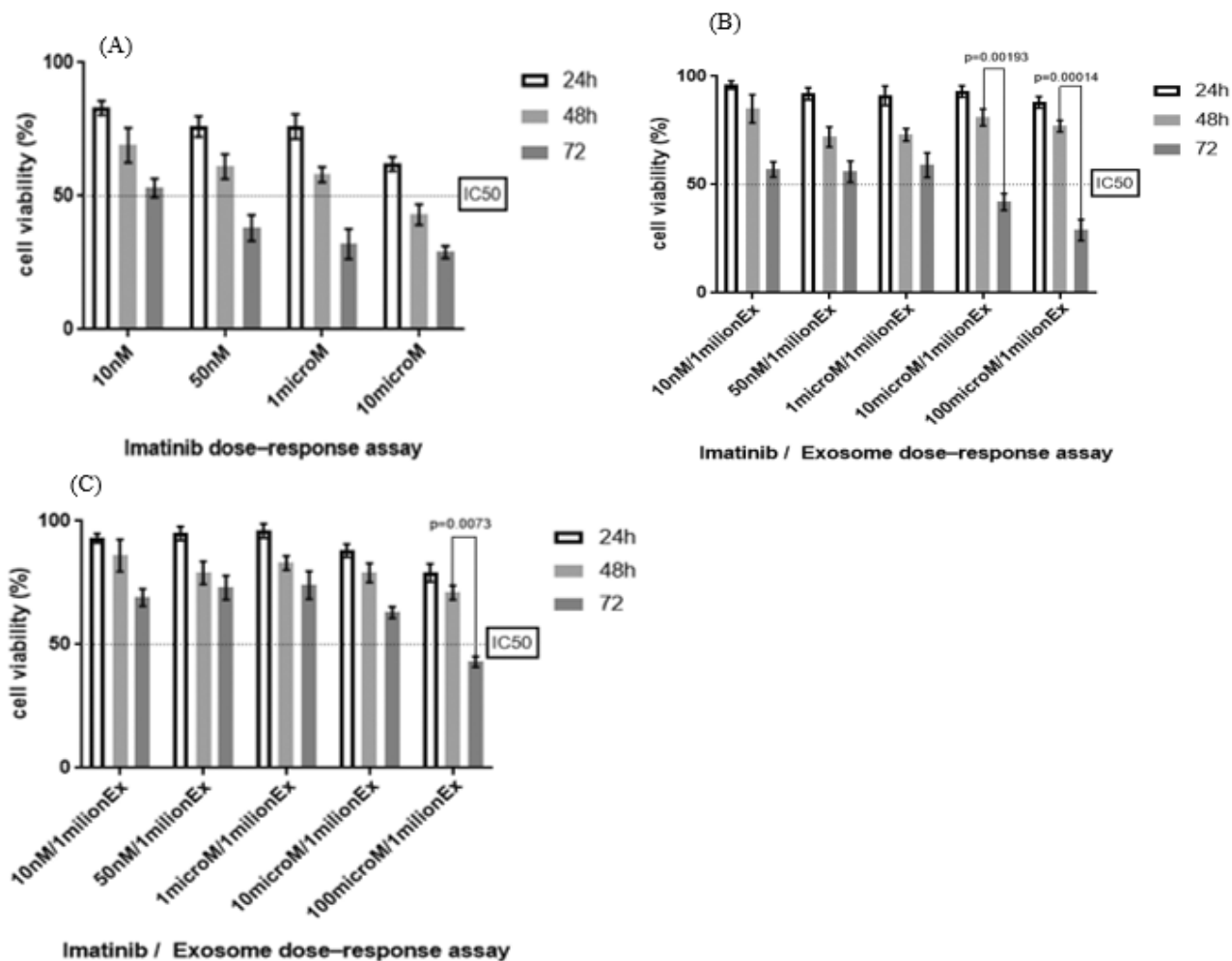


Рис. 9. Жизнеспособность клеток через 24, 48 и 72 часа инкубации при обработке клеток (A) свободным иматинибом, (B) загруженной иматинибом экзосомой, захваченной CD63-Mag, с помощью чипа и (C) экзосомой, загруженной иматинибом, с использованием коммерчески доступного набора.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В последнее десятилетие растет интерес к роли экзосом, таких как жидкостная биопсия, в обнаружении биомаркеров рака. Эти исследования подчеркнули острую необходимость в новых технологиях для быстрого и точного разделения экзосом в жидкостях организма с минимальными этапами подготовки проб [21-25]. Подверженность экзосом загрязнению и механическим повреждениям приводит к серьезным проблемам с чистотой и сохранением работоспособности. Экстракция экзосом на основе микрофлюидной технологии улучшает методы многих более ранних методов, во многих аспектах, включая изоляцию, молекулярный анализ и обнаружение. С помощью микрофлюидной технологии

были получены высокопроизводительные анализы экзосом до 100 мкл/мин с пределами обнаружения около 50 экзосом/мкл [3,26,27].

С развитием исследований экзосом стало признанным, что экзосомы тесно связаны со многими физиологическими действиями, а также с возникновением и развитием заболеваний. Поэтому выделение и анализ экзосом очень важны для исследований и приложений, связанных с экзосомами [14,28-30]. Однако традиционные методы выделения экзосом имеют множество ограничений, таких как дорогие инструменты и реагенты, а также значительные затраты времени. По сравнению с традиционными методами микрофлюидная технология имеет преимущества высокой эффективности и высокой чувствительности при разделении экзосом. В последние годы,

благодаря быстрому развитию технологий и расширению исследований, микрофлюидная технология позволила эффективно разделять, обогащать и обнаруживать множественную информацию экзосом, интегрированную в один чип. Это указывает на то, что микрофлюидные чипы имеют большой потенциал в клинических исследованиях, таких как тестирование на месте оказания медицинской помощи [6,13,14,17,28-30].

Аналогично этому исследованию было проведено использование анти-CD9 иммуноаффинных магнитных шариков с использованием конъюгатов стрептавидин-биотин на образцах плазмы с высокой эффективностью разделения и повышенной чувствительностью. Кроме того, протоколы на основе гранул не накладывают ограничений на размер выборки. В другом исследовании магнитные шарики, конъюгированные с анти-CD9, анти-CD81 и коктейлем антител, были использованы для иммуноаффинной изоляции, что обеспечило примерно в три раза больший выход, чем традиционные методы. Кроме того, Tim4, который специфически связывается с фосфатидилсерином, расположенным на поверхности экзосомных клеток, показал меньшую контаминацию, чем те, которые были получены с использованием традиционных методов [31-33].

Микрофлюидные устройства были внедрены для улучшения методов обнаружения и изоляции путем облегчения иммунологического разделения, скрининга и захвата экзосом. Это делает их очень привлекательными объектами для обнаружения и анализа заболеваний. Как показал ряд исследований, специфические белки и нуклеиновые кислоты – «груз» экзосом – могут быть важным источником биомаркеров, полученных из биожидкостей [34-37]. Анализ РНК экзосом из образцов жидкой биопсии может дополнить информацию классического анализа ДНК, прояснить конкретные процессы и, в конечном итоге, проложить путь к персонализированной медицине. Учитывая такие аспекты, жидкая биопсия с использованием микрофлюидных систем также

может стать важной стратегией в разработке персонализированной таргетной терапии и мониторинга заболевания [38]. Основная сфера исследований микрофлюидных устройств будет заключаться в том, как преодолеть проблемы, возникающие на пути к клинической трансляции и клиническому применению экзосом в качестве источников биомаркеров [39]. Различные новые микрофлюидные платформы LOC стремятся повысить чувствительность процесса выделения и еще больше облегчить анализ *in situ*. Это соответствует современной тенденции и спросу на реализацию «умных» систем с повышенной функциональностью и удобством использования даже неспециалистами в области ПОКТ [23]. Более того, реализация, стандартизация и использование такого современного оборудования может стать первым шагом на пути к персонализированному здравоохранению. Это также может приблизить более отдаленную цель — создание машины для целостного разделения и анализа всех компонентов жидкой биопсии, чтобы обеспечить высокоэффективную прогностическую медицину для действительно персонализированной диагностики и лечения [23]. Чтобы проложить путь к широкому признанию такого оборудования практикующими врачами во всем мире, необходимо также преодолеть сложность и трудность клинических испытаний и валидации. Более того, главной задачей клиники является совершенствование технологии, увеличение динамического диапазона платформ и производство экономически эффективных, специфичных и чувствительных устройств для персонализированной медицины [4,8,17].

В частности, захват частиц на основе иммуноаффинности — это высокоспецифичный способ разделения экзосом, который можно интегрировать в микрофлюидные платформы. В нескольких исследованиях было проведено использование магнитных шариков, конъюгированных с антителами, для разделения экзосом. Магнитные шарики, конъюгированные с CD9, разных размеров были протестированы на разделение плазменных экзосом с

использованием внешней силы для движения магнитных шариков с эффективностью в 10-15 раз выше, чем при использовании ультрацентрифуг [27]. Они обнаружили, что инкубация магнитных шариков, конъюгированных с антителами, с растворами, содержащими экзосомы, обеспечивает лучшие условия для взаимодействия между везикулами и лигандами на шариках. Кроме того, протоколы на основе гранул не накладывают ограничений на размер выборки. Также микрофлюидное устройство на основе иммуноаффинной хроматографии (CD63) использовалось для экзосом плазмы больных раком поджелудочной железы. Разделение основано на рецепторах с дополнительным входом для добавления лизирующего буфера для прямой экстракции РНК и белка из экзосом. Другой подход к разработке микрофлюидного устройства был реализован с использованием входного канала для маркировки экзосом флуоресцентным красителем для количественного определения экзосом на чипе. В этом исследовании микрофлюидное устройство было представлено в качестве платформы для разделения экзосом на чипе и флуоресцентного анализа для быстрого количественного определения экзосом. Другие микрожидкости, содержащие методы фотолитографии, основанные на микроразмерных участках оксида графена (GO)/полидофамин (PDA), покрытых белком G, были исследованы для разделения экзосом рака яичников. Разработанная система имеет потенциал использования экзосом для диагностики и прогноза [27].

Химиотерапия может уменьшить объем опухоли или вызвать кратковременную ремиссию. Однако со временем раковые клетки стали устойчивы к химиотерапии. Лекарственная устойчивость остается препятствием на пути к излечению больных раком. Экзосомы, полученные из МСК, можно модифицировать и применять в терапии рака и повышении химиочувствительности раковых клеток. Например, miP-302a из экзосом hucMSC подавляла рост и миграцию раковых клеток. В другом исследовании экзосомы, полученные из hucMSC, повышали чувствительность клеток

K562 к ИМ. Здесь снижение уровня miP-146a-5p у пациентов с ХМЛ, особенно у пациентов с резистентностью к ИМ, предполагает дополнительную роль в приобретении резистентности к ИМ. ХМЛ представляет собой миелоидное новообразование, вызванное слитым геном BCR-ABL, который вызывает нарушение регуляции клеточной пролиферации и устойчивость к апоптозу за счет вмешательства в нижестоящие сигнальные пути. Недавно сообщалось, что уровни miP-150 отрицательно коррелируют с уровнем транскрипта BCR-ABL и значительно повышаются после снижения активности тирозинкиназы BCR-ABL. Уровни экспрессии miP-31, miP-155 и miP-564 также снижались при ХМЛ и подвергались влиянию активности BCR-ABL [7,40-42].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы разработали простой микрофлюидный подход, основанный на иммуноаффинности, для разделения экзосом по емкости лекарственного средства. Разработанная система способна изолировать экзосомы с высокой чувствительностью, высокой скоростью извлечения и чистотой, а также с небольшим требуемым объемом и высокоскоростной процедурой экстракции. Чип можно масштабировать для высокопроизводительной изоляции экзосом с возможностью загрузки лекарств для клинического использования. Следовательно, эта платформа должна стать полезным инструментом в клинических приложениях для персонализированной медицины и в качестве персональных диагностических устройств в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bernardi S, Farina M. Exosomes and Extracellular Vesicles in Myeloid Neoplasia: The Multiple and Complex Roles Played by These "Magic Bullets". *Biology* (Basel) 2021, 10(2).
2. Bernardi S, Foroni C, Zanaglio C, Re F, Polverelli N, Turra A, Morello E, Farina M, Cattina F, Gandolfi L et al. Feasibility of tumor-derived exosome enrichment in the onco-hematology

- leukemic model of chronic myeloid leukemia. *Int J Mol Med*, 2019, 44(6):2133-2144.
3. Gamage SST, Pahattuge TN, Wijerathne H, Childers K, Vaidyanathan S, Athapattu US, Zhang L, Zhao Z, Hupert ML, Muller RM et al. Microfluidic affinity selection of active SARS-CoV-2 virus particles. *Sci Adv*, 2022, 8(39):eabn9665.
 4. Li Y, Cai T, Liu H, Liu J, Chen SY, Fan H. Exosome-shuttled miR-126 mediates ethanol-induced disruption of neural crest cell-placode cell interaction by targeting SDF1. *Toxicol Sci*, 2023, 195(2):184-201.
 5. Jafarzadeh N, Gholampour MA, Alivand MR, Kavousi S, Arzi L, Rad F, Sadeghizadeh M, Pornour M. CML derived exosomes promote tumor favorable functional performance in T cells. *BMC Cancer*, 2021, 21(1):1002.
 6. Kang KW, Jung JH, Hur W, Park J, Shin H, Choi B, Jeong H, Kim DS, Yu ES, Lee SR et al. The Potential of Exosomes Derived from Chronic Myelogenous Leukaemia Cells as a Biomarker. *Anticancer Res*, 2018, 38(7):3935-3942.
 7. Keramati F, Jafarian A, Soltani A, Javandoost E, Mollaei M, Fallah P. Circulating miRNAs can serve as potential diagnostic biomarkers in chronic myelogenous leukemia patients. *Leuk Res Rep*, 2021, 16:100257.
 8. Lan X, Yu R, Xu J, Jiang X. Exosomes from chondrocytes overexpressing miR-214-3p facilitate M2 macrophage polarization and angiogenesis to relieve Legg Calve-Perthes disease. *Cytokine*, 2023, 168:156233.
 9. Li MY, Zhao C, Chen L, Yao FY, Zhong FM, Chen Y, Xu S, Jiang JY, Yang YL, Min QH et al. Quantitative Proteomic Analysis of Plasma Exosomes to Identify the Candidate Biomarker of Imatinib Resistance in Chronic Myeloid Leukemia Patients. *Front Oncol*, 2021, 11:779567.
 10. Li P, Chen J, Chen Y, Song S, Huang X, Yang Y, Li Y, Tong Y, Xie Y, Li J et al. Construction of Exosome SORL1 Detection Platform Based on 3D Porous Microfluidic Chip and its Application in Early Diagnosis of Colorectal Cancer. *Small*, 2023, 19(20):e2207381.
 11. Li Y, Xu M, Zhu Z, Xu F, Chen B. Transendothelial electrical resistance measurement by a microfluidic device for functional study of endothelial barriers in inflammatory bowel disease. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11:1236610.
 12. Lu RXZ, Rafatian N, Zhao Y, Wagner KT, Beroncal EL, Li B, Lee C, Chen J, Churcher E, Vosoughi D et al. Heart-on-a-chip model of immune-induced cardiac dysfunction reveals the role of free mitochondrial DNA and therapeutic effects of endothelial exosomes. *bioRxiv*, 2023.
 13. Pattabiraman PP, Feinstein V, Beit-Yannai E. Profiling the miRNA from Exosomes of Non-Pigmented Ciliary Epithelium-Derived Identifies Key Gene Targets Relevant to Primary Open-Angle Glaucoma. *Antioxidants (Basel)*, 2023, 12(2).
 14. Han Z, Peng X, Yang Y, Yi J, Zhao D, Bao Q, Long S, Yu SX, Xu XX, Liu B et al. Integrated microfluidic-SERS for exosome biomarker profiling and osteosarcoma diagnosis. *Biosens Bioelectron*, 2022, 217:114709.
 15. Hu M, Brown V, Jackson JM, Wijerathne H, Pathak H, Koestler DC, Nissen E, Hupert ML, Muller R, Godwin AK et al. Assessing Breast Cancer Molecular Subtypes Using Extracellular Vesicles' mRNA. *Anal Chem*, 2023, 95(19):7665-7675.
 16. Jafarzadeh N, Safari Z, Pornour M, Amirizadeh N, Forouzandeh Moghadam M, Sadeghizadeh M. Alteration of cellular and immune-related properties of bone marrow mesenchymal stem cells and macrophages by K562 chronic myeloid leukemia cell derived exosomes. *J Cell Physiol*, 2019, 234(4):3697-3710.
 17. Lin S, Zhu B. Exosome-transmitted FOSL1 from cancer-associated fibroblasts drives colorectal cancer stemness and chemo-resistance through transcriptionally activating ITGB4. *Mol Cell Biochem*, 2023.
 18. Mineo M, Garfield SH, Taverna S, Flugy A, De Leo G, Alessandro R, Kohn EC. Exosomes released by K562 chronic myeloid leukemia cells promote angiogenesis in a Src-dependent fashion. *Angiogenesis*, 2012, 15(1):33-45.

19. Wan Z, Chen X, Gao X, Dong Y, Zhao Y, Wei M, Fan W, Yang G, Liu L. Chronic myeloid leukemia-derived exosomes attenuate adipogenesis of adipose derived mesenchymal stem cells via transporting miR-92a-3p. *J Cell Physiol*, 2019, 234(11):21274-21283.
20. Ninfa AJ, Ballou DP, Benore M. *Fundamental laboratory approaches for biochemistry and biotechnology*. John Wiley & Sons, 2009.
21. Patterson SD, Copland M. The Bone Marrow Immune Microenvironment in CML: Treatment Responses, Treatment-Free Remission, and Therapeutic Vulnerabilities. *Curr Hematol Malig Rep*, 2023, 18(2):19-32.
22. Song F, Wang C, Wang C, Wang J, Wu Y, Wang Y, Liu H, Zhang Y, Han L. Multi-Phenotypic Exosome Secretion Profiling Microfluidic Platform for Exploring Single-Cell Heterogeneity. *Small Methods*, 2022, 6(9):e2200717.
23. Surappa S, Multani P, Parlatan U, Sinawang PD, Kaifi J, Akin D, Demirci U. Integrated "lab-on-a-chip" microfluidic systems for isolation, enrichment, and analysis of cancer biomarkers. *Lab Chip*, 2023, 23(13):2942-2958.
24. Taverna S, Amodeo V, Saieva L, Russo A, Giallombardo M, De Leo G, Alessandro R. Exosomal shuttling of miR-126 in endothelial cells modulates adhesive and migratory abilities of chronic myelogenous leukemia cells. *Mol Cancer*, 2014, 13:169.
25. Wang QS, Xiao RJ, Peng J, Yu ZT, Fu JQ, Xia Y. Bone Marrow Mesenchymal Stem Cell-Derived Exosomal KLF4 Alleviated Ischemic Stroke Through Inhibiting N6-Methyladenosine Modification Level of Drp1 by Targeting lncRNA-ZFAS1. *Mol Neurobiol*, 2023, 60(7):3945-3962.
26. Corrado C, Raimondo S, Saieva L, Flugy AM, De Leo G, Alessandro R. Exosome-mediated crosstalk between chronic myelogenous leukemia cells and human bone marrow stromal cells triggers an interleukin 8-dependent survival of leukemia cells. *Cancer Lett*, 2014, 348(1-2):71-76.
27. Fonseca-Benitez A, Romero-Sanchez C, Lara SJP. A Rapid and Simple Method for Purification of Nucleic Acids on Porous Membranes: Simulation vs. Experiment. *Micromachines* (Basel), 2022, 13(12).
28. Giallongo C, Parrinello NL, La Cava P, Camiolo G, Romano A, Scalia M, Stagno F, Palumbo GA, Avola R, Li Volti G et al. Monocytic myeloid-derived suppressor cells as prognostic factor in chronic myeloid leukaemia patients treated with dasatinib. *J Cell Mol Med*, 2018, 22(2):1070-1080.
29. He L, Chen Y, Lin S, Shen R, Pan H, Zhou Y, Wang Y, Chen S, Ding J. Regulation of Hsa-miR-4639-5p expression and its potential role in the pathogenesis of Parkinson's disease. *Aging Cell*, 2023, 22(6):e13840.
30. Hrdinova T, Toman O, Dresler J, Klimentova J, Salovska B, Pajer P, Bartos O, Polivkova V, Linhartova J, Machova Polakova K et al. Exosomes released by imatinib-resistant K562 cells contain specific membrane markers, IFITM3, CD146 and CD36 and increase the survival of imatinib-sensitive cells in the presence of imatinib. *Int J Oncol*, 2021, 58(2):238-250.
31. Shi C, Pei S, Ding Y, Tao C, Zhu Y, Peng Y, Li W, Yi Y. Exosomes with overexpressed miR 147a suppress angiogenesis and inflammatory injury in an experimental model of atopic dermatitis. *Sci Rep*, 2023, 13(1):8904.
32. Wang M, Zhang Z, Li G, Jing A. Room-Temperature Self-Healing Conductive Elastomers for Modular Assembly as a Microfluidic Electrochemical Biosensing Platform for the Detection of Colorectal Cancer Exosomes. *Micromachines* (Basel), 2023, 14(3).
33. Wang M, Zhao H, Chen W, Bie C, Yang J, Cai W, Wu C, Chen Y, Feng S, Shi Y et al. The SMAD2/miR-4256/HDAC5/p16(INK4a) signaling axis contributes to gastric cancer progression. *Oncol Res*, 2023, 31(4):515-541.
34. Yu H, Wu Y, Zhang B, Xiong M, Yi Y, Zhang Q, Wu M: Exosomes Derived from E2F1(-/-) Adipose-Derived Stem Cells Promote Skin Wound Healing via miR-130b-5p/TGFBR3 Axis. *Int J Nanomedicine*, 2023, 18:6275-6292.
35. Yu Z, Tang H, Chen S, Xie Y, Shi L, Xia S, Jiang M, Li J, Chen D. Exosomal LOC85009 inhibits

- docetaxel resistance in lung adenocarcinoma through regulating ATG5-induced autophagy. *Drug Resist Updat*, 2023, 67:100915.
36. Zhang B, Sun C, Liu Y, Bai F, Tu T, Liu Q. Exosomal miR-27b-3p Derived from Hypoxic Cardiac Microvascular Endothelial Cells Alleviates Rat Myocardial Ischemia/Reperfusion Injury through Inhibiting Oxidative Stress-Induced Pyroptosis via Foxo1/GSDMD Signaling. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 2022:8215842.
37. Zhang X, Wang C, Huang C, Yang J, Wang J. Doxorubicin resistance in breast cancer xenografts and cell lines can be counterweighted by microRNA-140-3p, through PD-L1 suppression. *Histol Histopathol*, 2023, 38(10):1193-1204.
38. Zhong AN, Yin Y, Tang BJ, Chen L, Shen HW, Tan ZP, Li WQ, He Q, Sun B, Zhu Y et al. CircRNA Microarray Profiling Reveals hsa_circ_0058493 as a Novel Biomarker for Imatinib-Resistant CML. *Front Pharmacol*, 2021, 12:728916.
39. Wang Y, Wang S, Chen A, Wang R, Li L, Fang X. Efficient exosome subpopulation isolation and proteomic profiling using a Sub-ExoProfile chip towards cancer diagnosis and treatment. *Analyst*, 2022, 147(19):4237-4248.
40. Cetin Z, Ilker Saygili E, Yilmaz M. Crosstalk between CML cells with HUVECS and BMSCs through CML derived exosomes. *Front Biosci (Landmark Ed)*, 2021, 26(3):444-467.
41. Chinnappan R, Ramadan Q, Zourob M. An integrated lab-on-a-chip platform for pre-concentration and detection of colorectal cancer exosomes using anti-CD63 aptamer as a recognition element. *Biosens Bioelectron*, 2023, 220:114856.
42. Edlinger L, Berger-Becvar A, Menzl I, Hoermann G, Greiner G, Grundschober E, Bago-Horvath Z, Al-Zoughbi W, Hoefler G, Brostjan C et al. Expansion of BCR/ABL1(+) cells requires PAK2 but not PAK1. *Br J Haematol*, 2017, 179(2):229-241.
- Амир Монфарадан**
PhD
Тегеранский университет медицинских наук
Тегеран, Иран
E-mail: monfaredanamir@gmail.com
- Фахер Рахим**
PhD
Университет Джихан-Сулеймания
Курдистан, Ирак
E-mail: rahim.fakher@sulicihan.edu.krd
- Кожобеков Кудайберди Гапаралиевич**
д.ф.-м.н.
Ошский государственный университет
331, ул. Ленина, Ош 723500, Кыргызстан
E-mail: kudayberdi.kozhobekov@oshsu.kg
- Голамреза Тавусидана**
PhD
Тегеранский университет медицинских наук
Тегеран, Иран
E-mail: g-tavoosi@tums.ac.ir
- Мохаммад Хоссейн Модарресси**
PhD
Тегеранский университет медицинских наук
Тегеран, Иран
E-mail: modaresi@sina.tums.ac.ir
- Алавиесадат Хоссейнинасаб**
PhD
Компания GeneDia Life science
Тегеран, Иран
E-mail: hrzd.hsni@gmail.com
- Али-Акбар Агаджани-Афрузи**
PhD
Университет Пайаме Нур
Тегеран, Иран
E-mail: aghajani3@gmail.com
- Махди Шафи Сабет**
PhD
Тегеранский университет медицинских наук
Тегеран, Иран
E-mail: mshafiees@sina.tums.ac.ir
- Элахе Мотеvasели**
PhD
Тегеранский университет медицинских наук
Тегеран, Иран
E-mail: e_motevaseli@tums.ac.ir.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.239

Диагностика сигналов ЭКГ на основе их цифровой обработки и оптимизированной модели трансформера

¹Анас Фуад Ахмед, ²Халида С. Риджаб, ¹Ахмед Талаал Камил

¹Университет Аль-Иракия, Инженерный колледж, факультет электротехники, <https://en.aliraqia.edu.iq/>
Аль-Адмия-Хайба Хатон, 6029, Багдад, Ирак

²Технологический университет, факультет электротехники, <https://uotechnology.edu.iq/>
Аль-Вехад, 19006, Багдад, Ирак

E-mail: anas.abmed@aliraqia.edu.iq, khalida.s.rijab@uotechnology.edu.iq, abmed.talal@aliraqia.edu.iq

Поступила 13.02.2024, рецензирована 29.02.2024, принята 04.03.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Дилемма массивных параметров сигналов ЭКГ является проблемой для современных методов их классификации. Большинство современных методов демонстрируют недостаточную эффективность диагностики сигналов ЭКГ в межпациентном режиме. В попытке справиться с вышеуказанными ограничениями данное исследование предлагает модель, которая использует оптимизированную структуру преобразователя для классификации сердечных сокращений в соответствии с требованиями «Ассоциации по развитию медицинского оборудования, ААМІ» и подчиняется условиям приема пациентов. Построена архитектура, названная оптимизированной сетью, для замены блока самообслуживания (SAU) в кодирующей части модели трансформера. Предлагаемая модель, включающая оптимизированную сеть, превосходит модель трансформера на основе SAU и требует меньше вычислений. Представлена надежная архитектура внедрения, основанная на сверточной нейронной сети со схемой реализации на основе сети сжатия и возбуждения, которая использовалась для взвешивания функций шаблона формы локального сердцебиения. Проведено обширное тестирование для сравнения предложенной модели с существующими схемами. Тесты показали близость их результатов.

Ключевые слова: концы с концами; классификация ЭКГ; трансформерная архитектура; сжатие и возбуждение; глубинная свертка)

УДК 53.047:57(075.8)

Для цитирования: Анас Фуад Ахмед, Халида С. Риджаб, Ахмед Т. Камил. Диагностика сигналов ЭКГ на основе их цифровой обработки и оптимизированной модели трансформера. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):239-248. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.239.

A Novel and Efficient Framework for Diagnosing ECG Signals Based on the Digital Signal Processing and Optimized Transformer Model

Anas Fouad Ahmed

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

E-mail: anas.abmed@aliraqia.edu.iq

Khalida S. Rijab

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

E-mail: khalida.s.rijab@uotechnology.edu.iq

Ahmed Talal Kamil

Al-Iraqia University, College of Engineering, Computer Engineering Department,
Al Adhmia - Haiba Khaton, 6029, Baghdad, Iraq

E-mail: ahmed.talal@aliraqia.edu.iq

Received February 13, 2024, peer-reviewed February 29, 2024, accepted March 04, 2024, published April 25, 2024

Abstract: Heartbeat disorders are considered one of the main maladies that cause mortality. Therefore, their precocious diagnosis via ECG signal is critical for introducing prompt therapy. The advanced automatic classification of ECG signals has the potential to save cardiologists a tremendous amount of time while simultaneously decreasing the chance of misdiagnosis. The dilemma of massive parameters is troubling the current methods of ECG signal classification. Most recent methods exhibit inadequate performance for diagnosing ECG signals in the inter-patient mode. In an attempt to deal with the above limitations, this study offers an innovative, efficient, and end-to-end model. The suggested model uses the optimized transformer framework to classify the heartbeats according to the "Association for the Advancement of Medical Instrumentation, AAMI," and obeys the inter-patient setting. We constructed an efficient architecture called the optimized network to substitute the Self Attention Unit (SAU) in the encoder part of the transformer model. The suggested model, which includes an optimized network, outperforms the SAU-based transformer model and requires fewer computations. A robust embedding architecture based on a Convolutional Neural Network (CNN) with a Squeeze and Excitation (SE) network-based attention scheme that has been used for weighting the Local Heartbeat Shape Pattern (LHSP) features is presented. The introduced model exceeds the state-of-the-art. An extensive test has been done to compare the achievements of the suggested model with those of the cardiologists. The results proved the closeness of their performances.

Keywords: End-to-End; ECG Classification; Transformer Architecture; Squeeze and Excitation (SE); Depth Wise Convolution (DWC)

UDC 53.047:57(075.8)

For citation: Anas Fouad Ahmed, Khalida S. Rijab, Talal K. Ahmed. A Novel and Efficient Framework for Diagnosing ECG Signals Based on the Digital Signal Processing and Optimized Transformer Model. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):239-248e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.239.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (240)
 2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МОДЕЛЬ (241)
 - 2.1 ВСТРАИВАНИЕ ВХОДНЫХ ДАННЫХ (242)
 - 2.2 ПОЗИЦИОННОЕ КОДИРОВАНИЕ (243)
 - 2.3 УРОВЕНЬ 2 ВНИМАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ СЕТИ (243)
 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАСТРОЙКИ (244)
 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (244)
 - 4.1 ВЛИЯНИЕ АРХИТЕКТУРНЫХ ЧАСТЕЙ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ (245)
 - 4.2 СОКРАЩЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ (246)
 - 4.3 СРАВНЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ МОДЕЛИ И ВРАЧЕЙ (246)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (247)
- ЛИТЕРАТУРА (247)

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрокардиограмма (ЭКГ) является популярным инструментом для наблюдения за электрическими показателями сердца и имеет решающее значение для выявления сердечно-сосудистых нарушений [1,2]. Типичный сигнал ЭКГ состоит из серии комплексов, включающих набор последовательных волн [3,4]. Из этих волн можно извлечь медицинские данные о различных участках сердечной мышцы [5–8]. На **Рис. 1** показан стандартный образец сигнала ЭКГ. Для диагностики проблем с сердцем сигнал ЭКГ должен наблюдаться и оцениваться врачом-экспертом [9]. Эта цель труднодостижима, поскольку требует привлечения большого количества врачей-кардиологов и требует длительного

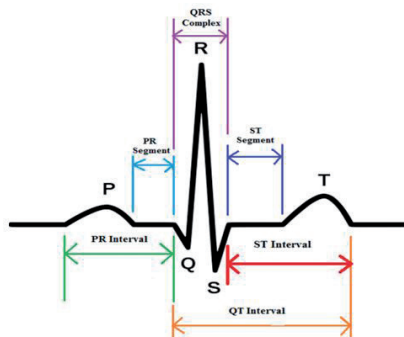


Рис. 1. Стандартная картина сигнала ЭКГ.

времени, а также не исключает возможности врачебных ошибок в диагностике, которые могут привести к летальному исходу [10]. Чтобы решить вышеуказанные проблемы, исследователи представили множество усовершенствованных автоматических классификаторов сердцебиения. Есть два основных направления. Первый основан на классических методах, которые используют ручные функции и требуют ручного вмешательства. Кроме того, также требуется процесс выбора функций. Однако они имеют ограниченное самообучение и требуют много времени [11–14]. Второй зависит от схем глубокого обучения (DL), которые комплексно объединяют извлечение и классификацию признаков [15]. Подходы DL включают три модели: первая основана на сверточной нейронной сети (CNN) [16,17], вторая зависит от рекуррентной нейронной сети (RNN) [18,19], и третья представляет собой гибрид, сочетающий в себе CNN и RNN [20,21]. С другой стороны, методы на основе DL также имеют определенные ограничения. Например, многие схемы на основе DL требуют большого количества сложных операций свертки и рекуррентных архитектур; это часто приводит к серии скрытых состояний, каждое из которых зависит от предыдущего. В результате такие архитектуры имеют низкий уровень параллельных вычислений. В настоящее время структура трансформера, включающая в себя параллельный блок самообслуживания (SAU), обеспечивает более высокую производительность в области техники перевода [22,23]. Однако обычная модель-трансформер имеет масштабируемое пространство. Помимо крупномасштабных

переменных для обучения, SAU преобразователя контурирует существенные препятствия из-за размерности контекста, например, квадратичный член размера входных данных [24]. При этом сложные методы требуют тяжелых вычислений со многими переменными, потребляют большую мощность и требуют оптимизации перед внедрением на портативных устройствах ЭКГ в реальном времени. Кроме того, их производительность требует улучшения при применении в соответствии с правилами ассоциации ААМІ и в условиях приема пациентов, когда сигналы обучения и тестирования разделены. В попытке решить вышеуказанные проблемы в данной статье предлагается новая комплексная модель, основанная на адаптированной и оптимизированной архитектуре трансформера для задачи диагностики сигналов ЭКГ. Наш существенный вклад заключается в следующем:

- Мы предлагаем новую, эффективную, комплексную модель, подходящую для устройств ЭКГ с ограниченными ресурсами, на основе модифицированной и оптимизированной структуры трансформера. Кроме того, мы улучшаем более сокращенную и надежную структуру, используя технику двойного подхода (attention). Во-первых, это локальный подход к встраиванию входных данных ЭКГ. Второй – всеобщий подход, основанный на оптимизированной сети для решения сложных вычислений и большом количестве переменных.
- Результаты представленной модели, которая соответствовала предписаниям ААМІ и условиям стационарного лечения, превзошли другие схемы, описанные в литературе.
- В этом исследовании представлены эксклюзивные эксперименты, которые включают сравнение производительности, полученной в результате предложенной модели, с аналогичными результатами, полученными по решениям кардиологов, где результаты показали небольшое превосходство предлагаемой модели.

2. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МОДЕЛЬ

После нормализации и обнаружения пика R (на основе метода, описанного в [25]) для

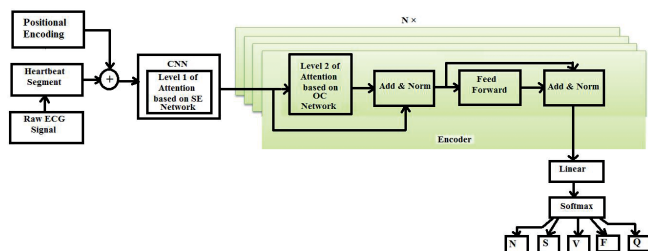


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой модели.

ЭКГ-сигнала MIT-BIH-ARR-DB (база данных аритмий MIT-BIH) проводится сегментация сердцебиений. Длина каждой доли составляет 280 семплов. Предлагаемая модель зависит от структуры преобразователя, предложенной в [22] для приложений языковой обработки. Представленная модель использует только часть кодировщика структуры преобразователя, как показано на Рис. 2. Было внесено множество модификаций и разработок в части кодера и внедрения входных данных. На входе мы представляем новую архитектуру подхода, основанную на CNN и сети сжатия и возбуждения (Squeeze and Excitation, SE) [26], чтобы усилить возможности извлечения признаков. Чтобы преодолеть дилемму большого количества параметров, представлена более эффективная и надежная схема замены CAU обычной модели [22]. Кроме того, предлагаемая модель включает в себя методы двойного подхода, как показано на Рис. 2. Локально уровень подхода 1 использует сеть SE, а универсальный уровень подхода 2 использует оптимизированную сеть. Пусть последовательность $Q = (q_1, q_2, \dots, q_1)$, L – длина тактового импульса, тогда выходные данные модели $M = (m_1, m_2, m_3, m_4)$, где m_1 – вероятность Q , присвоенная классу j .

2.1 Встраивание входных данных

Основным шагом в предлагаемой структуре является внедрение входных данных. Предлагается архитектура, основанная на сетях CNN и SE, для повышения эффективности захвата функций LHSP с помощью CNN и для взвешивания функций образца формы локального сердцебиения (Local Heartbeat Shape Pattern, LHSP) с помощью сети SE, которая представляет уровень 1 подхода, как показано на Рис. 3. Каждый сегмент пульса переконфигурирован в вектор признаков $Q = (q_1, q_2, \dots, q_1) \in \mathbb{R}^{1 \times F \times O}$, где O – количество каналов, размерность каждого канала – $1 \times F$. Процесс реконфигурации включает

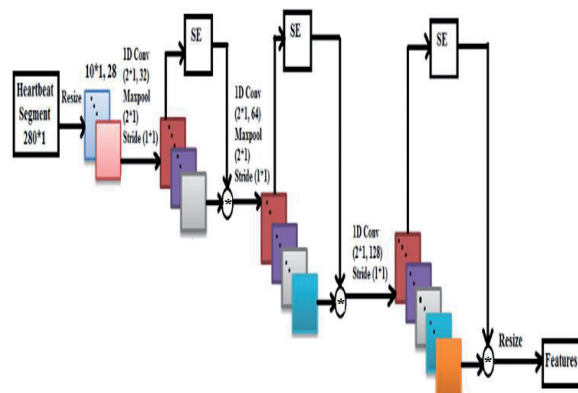


Рис. 3. Предлагаемая структура модели входного блока встраивания.

установку $F = 10$ и $O = 28$. Q последовательно передается трем архитектурам с подходом уровня 1, а затем выходной сигнал G представляет собой вектор с подключением признака LHSP в тактах сигнала ЭКГ. Более того, первые две архитектуры включают одну операцию свертки, G_{conv} , и одну операцию глобального максимального пула (GMP), G_{max} . Третья архитектура не включает GMP, как показано на Рис. 3. Предлагаемая модель реализует последовательность эффективных процессов для увеличения ее мощности при извлечении функций LHSP. Сеть SE используется для повторного расчета функций свертки и взвешивания функций LHSP. Другими словами, чтобы сосредоточиться на важных функциях LHSP и исключить бесполезные функции, такие как шум, подход уровня 1 используется для взвешивания функций LHSP. Этот уровень подхода развивает чувствительность предлагаемой модели к информации LHSP. Сеть SE состоит из глобального среднего уровня пула (GAPL) и двух полносвязных уровней (FCL), как показано на Рис. 4. После последовательности

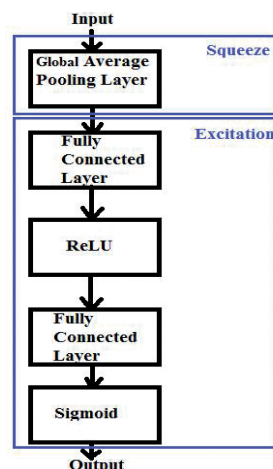


Рис. 4. Детальная структура сети SE.

процессов вес $E \in \mathbb{R}^{1 \times O'}$ каждого канала, соответствующего признаку V' , определяет вес E признака V' на основе процесса взвешивания. Эти архитектуры и процессы обеспечивают взвешивание функций LHSP, привлекают подход к важным функциям LHSP и усиливают связь между функциями LHSP. GAPL применяется для сохранения связей между функциями и создания функций канала.

$$H = G_{\text{GAPL}}(v') = \text{Concat}_{j=1}^{O'} \left(\frac{1}{B} \sum_{a=1}^B v'_a \right) \in \mathbb{R}^{1 \times O'}. \quad (1)$$

Размер функции H минимизируется, а затем размер функций максимизируется, при этом FCL настраивают О'Н для каналов на O'/CoF (CoF — коэффициент сжатия) для минимизации вычислений.

Значения CoF указаны последовательно как 4, 8 и 16.

$$E = \text{sigmoid}(\omega_2 \text{ReLU}(\omega_1 H^T)) \in \mathbb{R}^{O' \times 1}, \quad (2)$$

$$\omega_1 \in \mathbb{R}^{\frac{O'}{\text{CoF}} \times O'}, \omega_2 \in \mathbb{R}^{O' \times \frac{O'}{\text{CoF}}}.$$

ReLU используется для фиксации нелинейной взаимосвязи между функциями LHSP сердечного ритма. Сигмовидная функция используется для определения релевантности между функциями LHSP.

$$\text{ReLU}(H) = \max(0, H), \quad (3)$$

$$\text{sigmoid}(H) = \frac{1}{1 + e^{-H}}. \quad (4)$$

Полное уравнение приведено ниже:

$$V'_a = G_{\text{scale}}(V', E) = E \cdot V' \in \mathbb{R}^{O' \times \frac{F'}{2}}. \quad (5)$$

2.2 ПОЗИЦИОННОЕ КОДИРОВАНИЕ

Необходимо передать позиционные данные сигнала ЭКГ через кодер и смонтировать его с помощью предусмотренного на предыдущем шаге встраивания. Встраивание синусоидальной позиции (SPE) используется, поскольку оно обрабатывает более длинные последовательности с меньшим временем на этапе обучения. SPE описывается формулами, приведенными ниже [22]:

$$\text{PoEn}(PO, 2n) = \sin\left(PO / 10000^{2n/z_{\text{model}}}\right), \quad (6)$$

$$\text{PoEn}(PO, 2n+1) = \cos\left(PO / 10000^{2n/z_{\text{model}}}\right), \quad (7)$$

где n — размерность, PO — позиция, z_{model} — размерность выходного встраивания.

2.3. УРОВЕНЬ 2 ПОДХОДА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ СЕТИ

В этом разделе обсуждается применение подхода уровня 2 и архитектура оптимизированной сети. Новая оптимизированная архитектура применяется для замены SAU исходной модели, представленной в [22]. Оптимизированная сеть в основном зависит от оптимизированной свертки (OC). Вначале, чтобы понять OC, необходимо объяснить глубину мудрой свертки (DWC). DWC реализует свертку по каждому каналу индивидуально. Количество параметров можно минимизировать от $z^2 w$ до $z w$, где w — ширина ядра. Выход $T \in \mathbb{R}^{t \times z}$ (t — количество временных шагов) DWC с весом $\omega \in \mathbb{R}^{w \times z}$ для p^{th} -го элемента и размером вывода o можно рассчитать с помощью уравнения (8):

$$T_{p,o} = \text{Depthwise Conv}(Q, \omega_o, :, p, o) = \sum_{a=1}^w \omega_{o,a} \cdot Q_{\left(p+a-\frac{[w+1]}{2}, o\right)}. \quad (8)$$

OC можно определить с помощью уравнения (9):

$$\begin{aligned} \text{OC}\left(Q, \omega_{\left[\frac{oY}{z}\right]}, :, p, o\right) &= \\ &= \text{DWC}\left(Q, \text{soft max}\left(\omega_{\left[\frac{oY}{z}\right]}, :\right), p, o\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Каналы z сегментируются на наборы Y , а затем параметры каждого канала z/Y объединяются. Следовательно, параметры № минимизируются до z/Y , например, классическая свертка требует $1310720 (z^2 \times w)$ весов для $z = 512$ и $w = 5$, тогда как DWC имеет $2560 (z \times w)$ весов, и свойство распределения веса $Y = 8$, т.е. мы получаем только 40 ($Y \times w$); веса $\omega \in \mathbb{R}^{Y \times w}$ нормализуются с использованием функции softmax .

OC — это глубинная свертка (Depth Wise Convolution, DWC), которая использует функцию softmax для нормализации своих весов и совместно использует определенные выходные каналы. В отличие от SAU, OC имеет постоянное окно контекста и использует веса, которые не меняются во время временных шагов, для оценки релевантности компонентов контекста.

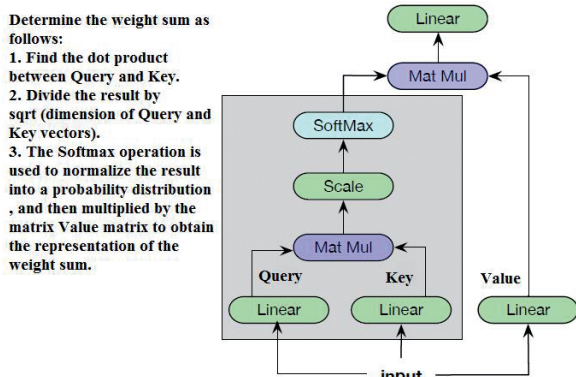


Рис. 5. Архитектура SAU.

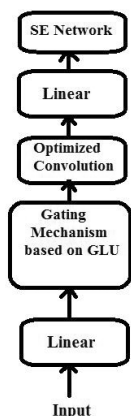


Рис. 6. Структура оптимизированной сети.

Рис. 5 иллюстрирует архитектуру SAU, а Рис. 6 демонстрирует структуру оптимизированной сети. Вход оптимизированной сети отображается от z до $2z$. После этого применяются сети GLU, ОС и SE соответственно. Gated Linear Unit (GLU) использует 50% входов в качестве вентиля с использованием сигмовидных модулей, а затем определяет поточечное произведение с оставшимися входами. DropConnect считается эффективным регуляризатором для ОС. Более того, DropConnect предполагает игнорирование некоторых промежуточных данных внутри канала [24]. Оптимизированная сеть отвечает за сбор и оценку функций Global Heartbeat (GH).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАСТРОЙКИ

Эксперименты для этого исследования проводились с использованием MIT-BIH-ARR-DB [27], следуя рекомендациям ААМІ (как показано в Таблице 1) и стратегии взаимодействия с пациентами. Чтобы соответствовать методу между пациентами, наборы данных сигналов обучающего теста делятся на DS1 и DS2, как объяснено в [28].

Таблица 1
Переименование ритмов MIT-BIH на основе рекомендаций ААМІ.

AAMI Classes with Explanation	MIT-BIH Beats with Labels	
Normal beats (N)	N	Normal beat
	L	Left bundle branch block beat
	R	Right bundle branch block beat
	e	Atrial escape beat
Supraventricular ectopic beats (SVEB)	j	Nodal (junctional) escape beat
	A	Atrial premature beat
	a	Aberrated atrial premature beat
Ventricular ectopic beats (VEB)	J	Nodal (junctional) premature beat
	S	Supraventricular premature beat
	V	Premature Ventricular contraction
Fusion beats (F)	E	Ventricular escape beat
	F	Fusion of ventricular and normal beat
Unknown beats (Q)	/	Paced beat
	f	Fusion of paced and normal beat
	Q	Unclassified beat

DS1 увеличивается с помощью SMOTE [29] для решения дилеммы несбалансированных данных.

Чтобы определить оптимальные переменные для модели, мы используем подход управляющих переменных. Поиск фокусируется на четырех важнейших переменных, а именно: z_{model} , уровнях подхода, количестве ОС в каждой голове и циннере. Хотя три переменные остаются постоянными, мы исследуем влияние остальных переменных на результаты. Оптимальное сочетание переменных показано в Таблице 2.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение представленной модели и подходов конкурентов в литературе представлено путем определения следующих показателей: показатель F1, положительная прогностическая ценность (PPV), чувствительность (SEN) и точность (ACC), как указано в уравнениях 10-13.

$$F1 - Score = \frac{2 \cdot PPV \cdot SEN}{PPV + SEN}, \quad (10)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (11)$$

$$SEN = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (12)$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{TN + FN + TP + FP}, \quad (13)$$

Таблица 2
Оптимальное объединение переменных для предлагаемой модели

Переменные	Численная величина
Размерность вывода встраивания (z_{model})	64
Слои подхода	7
Размер партии (BS)	64
№ ОС в каждой голове	7
Выходной размер линейного модуля (z_{inner})	512

Таблица 3

Сравнение достижений представленной модели и современной модели.

Reference	N (%)				S (%)				V (%)				Overall (%) ACCo
	PPV	SEN	ACC	F1-score	PPV	SEN	ACC	F1-score	PPV	SEN	ACC	F1-score	
[30]	99.90	99.10	-	99.49	75.70	100	-	86.16	100	95.40	-	97.11	98.10
[31]	98.17	99.42	-	98.79	89.54	74.65	-	81.37	93.25	95.65	-	94.43	-
[32]	98.00	94.00	-	95.96	53.00	62.00	-	57.15	59.40	87.30	-	70.70	-
[19]	97.60	99.80	97.80	98.68	95.70	66.90	98.30	78.74	98.20	92.30	99.20	95.15	98.40
[33]	97.60	97.50	-	97.54	59.40	83.80	-	69.52	90.20	80.40	-	85.01	95.10
[34]	98.50	97.60	96.80	98.64	74.00	76.80	97.50	75.37	92.40	93.80	98.60	93.09	97.60
[35]	93.33	94.54	-	93.33	65.88	35.22	-	45.90	79.86	88.35	-	83.89	88.99
Our model	99.89	99.93	99.76	99.91	99.79	99.88	99.80	99.83	99.85	99.94	99.95	99.89	99.94

где FN – ложноотрицательный результат, FP – ложноположительный результат, TP – истинно положительный результат.

Результаты предлагаемой структуры и новейших исследований в современной литературе показаны в Таблице 3. В целом, современные методы обеспечивают разумные достижения в идентификации V-класса. Но их достижения в признании S-класса заметно снизились. По сути, это результат отличительных особенностей LHSP для V-категории. Класс S обычно имеет LHSP, который похож на класс N, что затрудняет различие между ними. Результаты показывают, что наша модель превосходит самые современные модели, особенно в обнаружении S-класса. Во всех категориях наша модель превосходит существующие методологии, демонстрируя эффективность представленной архитектуры структуры. Ссылаясь на [30], которое является лучшим из опубликованных исследований, наша модель увеличила показатель F1 для обнаружения классов S и V на 13.67% и 2.78% соответственно. Однако авторы работы [30] смогли получить оптимальные PPV и SEN для классов V и S, но сделали это за счет снижения SEN для V и плохого PPV для классов S. Кроме того, подход, предложенный в [30], не является сквозным, как наша модель. По сравнению с [35], самой новой из опубликованных работ, представленная модель повысила показатель F1 для S, V и N на 53.93%, 16% и 6.58% соответственно. Поскольку

большинство предыдущих исследований были сосредоточены на классификации классов N, V и S, обнаружение класса F в предложенной схеме сравнивалось только с результатами кардиологов.

4.1 Влияние архитектурных частей предлагаемой модели

Чтобы проверить, может ли введенная структура ускорить процесс обнаружения, мы провели следующие тесты: (результаты представлены в Таблице 4)

- Уровень подхода 2 на основе оптимизированной сети и уровень подхода 1 на основе сети SE (уровень Wi 2 и уровень Wi 1): предлагаемая модель.
- Уровень подхода 2, основанный только на оптимизированной сети (уровень Wi 2 и уровень Wo 1): представленная структура без уровня подхода 1.
- Уровень подхода 1, основанный только на сети SE (уровень Wo 2 и уровень Wi 1): предлагаемая модель без подхода, часть оптимизированной сети.

Трансформерная структура (типичная модель трансформера): типичная трансформирующая структура, требующая подхода к себе [22].

Результаты испытаний показали, что оптимизированная сеть может заменить технику самообслуживания. Таким образом, схема самообслуживания может оказаться ненужной архитектурой. Особенно с использованием второго уровня техники подхода эффективность модели была значительно повышена, особенно

Таблица 4

Результаты внедрения модели с различными структурами

Architecture	Overall (%) ACC	N (%)				S (%)				V (%)			
		SEN	PPV	ACC	F1-score	SEN	PPV	ACC	F1-score	SEN	PPV	ACC	F1-score
Wi level 2 and Wi level 1	99.94	99.93	99.89	99.76	99.91	99.88	99.79	99.80	99.83	99.94	99.85	99.95	99.89
Wi level 2 and Wo level 1	98.72	91.84	99.58	98.63	95.55	90.00	99.86	98.59	94.67	98.84	95.83	98.93	97.31
Wo level 2 and Wi level 1	98.82	99.33	99.65	98.48	99.49	91.03	88.18	98.52	89.58	99.96	99.44	98.89	99.70
Typical transformer model	97.53	99.11	99.34	97.42	99.22	85.33	93.21	97.37	89.09	99.98	99.73	97.88	99.85

для S-класса. Использование сети SE в этой архитектуре играет значительную роль в взвешивании функций GN. Архитектура встраивания входных данных с подходом уровня 1 также может усилить ритмическую информацию и, таким образом, повысить производительность представленной модели. Мы можем заметить небольшие изменения в обоих типах сердечных сокращений (N-класса и V-класса), особенно в V-классе, что подтверждает нашу предыдущую оценку, поскольку форма сердечных сокращений V-класса значительно отличается от формы сердечных сокращений N-класса.

4.2 СОКРАЩЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Одна из наших целей — разработать вычислительно эффективную модель классификации сигналов ЭКГ. Для этой задачи мы настраиваем тест сравнения переменных. **Таблица 5** иллюстрирует сравнение № параметров предложенной модели и модели трансформера. Заметим, что число параметров для всей представленной модели на 17.79% меньше, чем для типовой конструкции трансформера, а его значение для 2-го уровня подхода на основе оптимизированной сети на 44% меньше, чем для SAU (это связано с использованием ОК). В результате наш метод дает отличный результат. Предлагаемая новая архитектура служит оптимизированной основой для будущих устройств классификации сигналов ЭКГ в реальном времени. Полученные результаты показывают потенциал преобразовательной

структуры для обработки сигналов ЭКГ. Представленная архитектура подхода устраняет недостатки экспоненциального роста параметров SAU и обеспечивает более высокую производительность, поскольку представленная модель использует иерархическую архитектуру; это серьезная проблема, поскольку данные синхронизации оказывают сильное влияние на ритм сердечных сокращений для данного сигнала ЭКГ.

4.3 СРАВНЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ МОДЕЛИ И ВРАЧЕЙ

В начале этого раздела важно отметить, что группа экспертов-кардиологов обсудила и единогласно отметила сердцебиения MIT-BIH-ARR-DB [36]. Мы считаем это "Основной истинной классификацией" (GTC) для сравнения достижений предлагаемой модели с достижениями врачей, специализирующихся в кардиологии. Данные тестирования сигналов ЭКГ были переданы в модель и предоставлены трем отдельным (с разными залами и разными рабочими местами [37,38]) врачам для диагностики сердечных сокращений. Чтобы обеспечить идентичность процедуры маркировки, всем врачам были даны конкретные указания по стилю обозначений переходов между сокращениями сердца, а затем рассчитывались F1-Score, PPV, SEN и ACC как для предложенной модели, так и для врачей. Чтобы определить эффективность врачей, решения как минимум двух врачей должны совпадать для диагностики сердцебиения. Результаты показаны в **Таблице 6**. Результаты показывают, что предложенная модель и врачи работают одинаково, но модель имеет небольшой прирост, особенно в обнаружении S-класса (4.77%); это могло быть связано со значительной аналогией в морфологии между классами N и S. Кроме того, близость результатов указывает на то, что предложенная система надежна в выявлении заболеваний сердца.

Таблица 5

Сравнение № параметров предложенной модели и модели трансформера.

Architecture	No. Parameters	Parameter Decrease (%)
Transformer model	3.26 M	17.79
Presented model	2.68 M	
Only SAU	0.1114 M	44
Only level 2 attention Based on the optimized network	0.0623 M	

Таблица 6

Сравнение достижений предлагаемой модели и результатов кардиологов

	N (%)			S (%)			V (%)			F (%)			Overall (%) ACCo
	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	
Cardiologists	98.97	98.66	98.81	95.13	95.01	95.06	98.18	98.79	98.48	97.88	99.54	98.70	98.92
Our model	99.89	99.93	99.91	99.79	99.88	99.83	99.85	99.94	99.89	98.65	99.61	99.12	99.94

Таблица 7

Разделение сердечных сокращений для внутрибольничных условий

	N (%)			S (%)			V (%)			F (%)			Overall (%) ACCo
	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	
Presented model	99.90	99.95	99.92	98.87	97.04	97.94	99.85	99.95	99.99	99.93	99.97	99.95	99.96

Таблица 8

Результаты предлагаемой модели в условиях стационара

	N (%)			S (%)			V (%)			F (%)			Overall (%) ACCo
	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	PPV	SEN	F1-Score	
Presented model	99.90	99.95	99.92	98.87	97.04	97.94	99.85	99.95	99.99	99.93	99.97	99.95	99.96

Представленная модель может использоваться в условиях стационара и давать выдающиеся результаты.

Распределение сердечных сокращений показано в Таблице 7, а результаты проиллюстрированы в Таблице 8. Эта схема менее надежна, реалистична и универсальна, чем интер-пациентская схема.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании была представлена улучшенная, сквозная, мощная и эффективная в вычислительном отношении модель преобразователя для классификации заболеваний сердца с использованием сигналов ЭКГ, соответствующих стандартам ААМІ и межпациентному режиму. Представленная структура использует методы подхода. Уровень 1 подхода предполагает использование сети SE, которая отвечает за взвешивание функций LHSP, захватываемых CNN. Уровень 2 подхода включает замену САУ традиционной трансформенной схемы предлагаемой оптимизированной сетью. Оптимизированная сеть отвечает за взвешивание функций GH и включает в себя недорогой ОС. Результаты показали, что достижения представленной модели превосходят современные и сопоставимы с достижениями кардиологов. Будущим горизонтом этой работы является реализация предложенной модели с использованием FPGA.

ЛИТЕРАТУРА

- Rasti-Meymandi A, Ghaffari A. A deep learning-based framework For ECG signal denoising based on stacked cardiac cycle tensor. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, 71:103275.
- Jovanović B, Milenković S, Pavlović M. VT/VF detection method based on ECG signal quality assessment. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2018, 27(11):1850169.
- Zhao T, Wang XA, Qiu C. An Early Warning of Atrial Fibrillation Based on Short-Time ECG Signals. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022:2022.
- Silva JHBD, Cortez PC, Jagatheesaperumal SK, de Albuquerque VHC. ECG Measurement Uncertainty Based on Monte Carlo Approach: An Effective Analysis for a Successful Cardiac Health Monitoring System. *Bioengineering*, 2023. 10(1):115.
- Chandra S, Sharma A, Singh GK. Feature extraction of ECG signal. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2018, 42(4):306-316.
- Sahoo S, Kanungo B, Behera S, Sabut S. Multiresolution wavelet transform based feature extraction and ECG classification to detect cardiac abnormalities. *Measurement*, 2017, 108:55-66.
- Gupta V, Mittal M, Mittal V, Saxena NK. A critical review of feature extraction techniques for ECG signal analysis. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 2021, 102(5):1049-1060.
- Patro KK, Kumar PR. Effective feature extraction of ECG for biometric application. *Procedia computer science*, 2017, 115:296-306.
- Ramesh GP, Kumar NM. Design of RZF antenna for ECG monitoring using IoT. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(5):4011-4026.
- Gómez-Clapers J, Casanella R. A fast and easy-to-use ECG acquisition and heart rate monitoring system using a wireless steering wheel. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 12(3):610-616.
- 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.
- Abdulbaqi AS, Al-din S. Feature Extraction and Classification of ECG Signal Based on The Standard Extended Wavelet Transform Technique: Cardiology Based Telemedicine. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 928(3):032029. IOP Publishing.

13. Basu S, Khan YU. On the aspect of feature extraction and classification of the ECG signal. *In 2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS)*, 2015, pp. 190-193. IEEE.
14. Li H, Yuan D, Wang Y, Cui D, Cao L. Arrhythmia classification based on multi-domain feature extraction for an ECG recognition system. *Sensors*, 2016, 16(10):1744.
15. Xu SS, Mak MW, Cheung CC. Towards end-to-end ECG classification with raw signal extraction and deep neural networks. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 2018, 23(4):1574-1584.
16. Shaker AM, Tantawi M, Shedeed HA, Tolba MF. Generalization of convolutional neural networks for ECG classification using generative adversarial networks. *IEEE Access*, 2020, 8:35592-35605.
17. Wang T, Lu C, Sun Y, Yang M, Liu C, Ou C. Automatic ECG classification using continuous wavelet transform and convolutional neural network. *Entropy*, 2021, 23(1):119.
18. Singh S, Pandey SK, Pawar U, Janghel RR. Classification of ECG arrhythmia using recurrent neural networks. *Procedia computer science*, 2018, 132:1290-1297.
19. Saadatnejad S, Oveisi M, Hashemi M. LSTM-based ECG classification for continuous monitoring on personal wearable devices. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 2019, 24(2):515-523.
20. Cheng J, Zou Q, Zhao Y. ECG signal classification based on deep CNN and BiLSTM. *BMC medical informatics and decision making*, 2021, 21(1):1-2.
21. Zhang P, Cheng J, Zhao Y. Classification of ECG Signals Based on LSTM and CNN. *International Conference on Artificial Intelligence and Security*, 2020, pp. 278-289. Springer, Singapore.
22. Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez AN, Kaiser Ł, Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 2017:30.
23. Li B, Jing Y, Tan X, Xing Z, Xiao T, Zhu J. TranSFormer: Slow-Fast Transformer for Machine Translation. *arXiv preprint 2023*, arXiv:2305.16982.
24. Wu F, Fan A, Baevski A, Dauphin YN, Auli M. Pay less attention with lightweight and dynamic convolutions. *arXiv preprint 2019*, arXiv:1901.10430.
25. Pan J, Tompkins WJ. A real-time QRS detection algorithm. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 1985:230-236.
26. Hu J, Shen L, Sun G. Squeeze-and-excitation networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 7132-7141.
27. <https://physionet.org/content/mitdb/1.0.0/>.
28. 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):1196-11206.
29. Chawla NV, Bowyer KW, Hall LO, Kegelmeyer WP. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, 2002, 16:321-357.
30. Yang P, Wang D, Zhao WB, Fu LH, Du JL, Su H. Ensemble of kernel extreme learning machine based random forest classifiers for automatic heartbeat classification. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 63:102138.
31. Wang T, Lu C, Sun Y, Yang M, Liu C, Ou C. Automatic ECG Classification Using Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *Entropy*, 2021, 23(1):119.
32. Garcia G, Moreira G, Menotti D, Luz E. Inter-patient ECG heartbeat classification with temporal VCG optimized by PSO. *Scientific reports*, 2017, 7(1):1-1.
33. He J, Rong J, Sun L, Wang H, Zhang Y. An advanced two-step DNN-based framework for arrhythmia detection. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, 2020, 12085:12422.
34. Zhai X, Tin C. Automated ECG classification using dual heartbeat coupling based on convolutional neural network. *IEEE Access*, 2018, 6:27465-27472.
35. Li Y, Qian R, & Li K. Inter-patient arrhythmia classification with improved deep residual convolutional neural network. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2023, 214:106582.
36. <https://physionet.org/physiobank/database/html/mitdbdir/intro.htm>.
37. Baghdad Heart Disease Center, Baghdad Medical City Hospital, Baghdad, Iraq.
38. Ibn Al-Nafees Cardiology Hospital, Baghdad, Iraq.

Анас Фуад Ахмед

доцент

Университет Аль-Иракия, факультет электротехники
Аль-Адмия-Хайба Хатон, Багдад 6029, Ирак
E-mail: anas.ahmed@aliraqia.edu.iq

Халида С. Риджаб

PhD

Технологический ун-т, факультет электротехники
Аль-Вехада, Багдад 19006, Ирак
E-mail: khalida.s.rijab@uotechnology.edu.iq

Ахмед Талаал Камил

магистр

Университет Аль-Иракия, факультет
 компьютерной инженерии
Аль-Адмия-Хайба Хатон, Багдад 6029, Ирак
E-mail: ahmed.talal@aliraqia.edu.iq

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.249

Внутризонное поглощение электромагнитного излучения электронами с оптическим фононным участием в сверхрешетках квантовых точек

Ибрагимов Г.Б., Ибаева Р.З.

Институт физики НАН Азербайджана, <https://physics.gov.az/>

33, просп. Г.Джавида, г. Баку AZ1143, Азербайджан

E-mail: guseyn_gb@mail.ru, raidaibayeva1@gmail.com

Поступила 08.12.2023, рецензирована 15.12.2023, принята 22.12.2023, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.А. Бушуевым

Аннотация: Исследуется поглощение электромагнитного излучения свободным электронным газом, взаимодействующим с колебаниями решетки, в сверхрешетке квантовых точек. Предполагается, что электронный газ в сверхрешетке квантовых точек ограничен анизотропным параболическим потенциалом. Поглощение света свободными носителями при участии фононов рассчитывается во втором порядке теории возмущения. При вычислении коэффициента поглощения используются матричные элементы электрон-фотонного и электрон-фононного взаимодействий электрона (с полярными и неполярными оптическими фононами). При рассеянии электронов на полярных оптических фононах возможны три следующих перехода: (1) переход между размерными подуровнями только в x-направлении, (2) переход между размерными подуровнями только в y-направлении, (3) переход между размерными подуровнями как в x-, так и y-направлениях. Показано, что для рассеяния электрона на неполярных оптических фононах возможен только один переход - переход, обусловленный размерными подуровнями как для x-, так и для y-направлений.

Ключевые слова: квантовая точка, сверхрешетка, минizona, внутризонное поглощение

УДК 621.315.592

Для цитирования: Ибрагимов Г.Б., Ибаева Р.З. Внутризонное поглощение электромагнитного излучения электронами с оптическим фононным участием в сверхрешетках квантовых точек. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):249-254. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.249.

Intraband absorption of electromagnetic radiation by electrons with optical phonon participation in quantum dot superlattices

Ibragimov Guseyn Behbud, Ibayeva Raida Zabit

Physics Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences, <https://physics.gov.az/>

33, ave. G. Javida, Baku AZ1143, Azerbaijan

E-mail: guseyn_gb@mail.ru, raidaibayeva1@gmail.com

Received December 08, 2023, peer-reviewed December 15, 2023, accepted December 22, 2023, published April 25, 2024

Abstract: In this paper, we investigate the absorption of electromagnetic radiation by a free electron gas interacting with lattice vibrations in a quantum dot superlattice. It is assumed that the electron gas in the quantum dot superlattice is limited by the anisotropic parabolic potential. The absorption of light by free carriers with the participation of phonons is calculated in the second order of the perturbation theory. When calculating the absorption coefficient, the matrix elements of the electron-photon and electron-phonon interactions (with polar and nonpolar optical phonons) are used. We can expect three possible transitions in the absorption coefficient for electron-polar phonon scattering: (1) a transition due to the size subband levels for only the x direction,

(2) a transition due to the size subband levels for only the y direction and (3) a transition due to the size subband levels for both the x direction and the y direction. For electron-nonpolar phonon scattering we can expect only one possible transitions in the, the absorption coefficient: a transition due to the size subband levels for both the x direction and the y direction.

Keywords: quantum dot, superlattice, miniband, intraband absorption

UDC: 621.315.592

For citation: Guseyn B. Ibragimov, Raida Z. Ibayeva. Intraband absorption of electromagnetic radiation by electrons with optical phonon participation in quantum dot superlattices. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):249-254e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.249.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (250)
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ (250)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ (252)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (253)

ЛИТЕРАТУРА (253)

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов выращивания кристаллов с размерами, близкими к межатомному расстоянию, таких как молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений, позволило получить такие низкоразмерные системы, как квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые точки и т.д. Начиная с пионерской работы Эсаки и Цу [1], полупроводниковым сверхрешеткам было посвящено большое количество исследований из-за их транспортных свойств и применения в устройствах электроники, таких как генераторы, туннельные диоды, транзисторы горячих электронов и оптико-электронные приборы [2,3]. Современная нанотехнология позволяет изготавливать квантовые точки различной формы, которые с успехом применяются в различных устройствах, квантовых каскадных лазерах на основе сверхрешеток квантовых точек [1–3], которые имеют значительно большую производительность по сравнению с существующими квантовыми каскадными лазерами на основе сверхрешеток из квантовых ям [4]. Сверхрешетки из квантовых точек привлекают внимание исследователей также благодаря своим необычным оптическим и оптоэлектронным свойствам, которые могут быть использованы для разработки новых оптоэлектронных приборов [5-13].

Хорошо известно, что электрон-фононное взаимодействие является важным фактором,

влияющим на физические свойства полярных кристаллов, такие как энергия связи примесей, перенос заряда, линейные и нелинейные оптические свойства, особенно в низкоразмерных квантовых системах [14,15].

В настоящей работе развита теория поглощения света свободными носителями в сверхрешетке квантовых точек с анизотропным параболическим потенциалом при рассеянии носителей на полярных и неполярных оптических фононах.

В объемных полупроводниках квантовомеханическая теория поглощения света свободными носителями, использующая теорию возмущений второго порядка, была предложена Думке [16]. Позднее он был подробно изучен для акустических фононов (через деформационный потенциал и пьезоэлектрическую связь), неполярных и полярных оптических фононов и примесей в объемных полупроводниках [17]. Эти исследования показали различную степенную зависимость коэффициента поглощения от длины волны излучения для разных механизмов рассеяния. Более того, эти степенные законы отличаются от классической зависимости k^2 коэффициента поглощения. Поглощение света свободными носителями при рассеянии электронов на фононах теоретически исследовалось в полупроводниковых квантовых ямах и проволоках [18-28] и в квантовых точках [29,30].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что движение электрона в сверхрешетке является ограниченным и его энергетический спектр квантуется. Предполагается, что квантование имеет место в x -направлении. Рассматривается электрон-фононное взаимодействие в сверхрешетке квантовых точек

с периодическим потенциалом $U(\xi)$ периода d вдоль ξ -направления вида [31]:

$$V(x, y) = \frac{m^*}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2), \quad (1)$$

где m^* — эффективная масса, а ω_x, ω_y — частоты конфинмента в x - и y -направлениях соответственно. В приближении сильной связи гамильтониан для носителей тока в сверхрешетке квантовых точек может быть записан, как [8,9]:

$$H = \frac{(p_x^2 + p_y^2)}{2m^*} + \frac{m^*}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2) + \frac{\Delta}{2} (1 - \cos \frac{p_z d}{\hbar}), \quad (2)$$

где Δ — ширина минизоны. Нормированные собственные волновые функции электрона $\Psi_{n,e,k_z}(\mathbf{r})$ и собственные значения энергии $E_{n,l}(k_z)$ в зоне проводимости задаются, соответственно, в виде [10]:

$$\Psi_{n,l,k_z}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{L_z}} \Psi_n(x) \Psi_l(y) \xi_{k_z}(z), \quad (3)$$

$$E_{n,l}(k_z) = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_x + (l + \frac{1}{2})\hbar\omega_y + \frac{\Delta}{2} (1 - \cos k_z d) = \varepsilon_{n,l} + \varepsilon(k_z), \quad (4)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ и $l = 0, 1, 2, \dots$ — индексы уровней электронных подзон, k_z — составляющая волнового вектора в ξ -направлении,

$$\Psi_n(x) = \sqrt{1/\sqrt{\pi} l_x} 2^n n! \exp[-x^2/2l_x^2] H_n(x/l_x),$$

$\Psi_l(y) = \sqrt{1/\sqrt{\pi} l_y} 2^l l! \exp[-y^2/2l_y^2] H_l(y/l_y)$ — собственные волновые функции гармонического осциллятора, $H_n(x)$ — полином Эрмита, $l_x = \sqrt{\hbar/(m^* \omega_x)}, l_y = \sqrt{\hbar/(m^* \omega_y)}, \xi_{k_z}(z)$ — функция Блоха в приближении сильной связи в ξ -направлении и L_z — нормализованная длина в ξ -направлении.

Поглощение света свободными носителями при участии фононов рассчитывается во втором порядке теории возмущений. Коэффициент поглощения определяется при этом известной формулой [20]:

$$\alpha = \frac{\varepsilon^{1/2}}{n_0 c} \sum_i W_i f_i, \quad (5)$$

где ε — диэлектрическая постоянная, n_0 — число фотонов в поле излучения, f_i — функция распределения свободных носителей тока, W_i — вероятность перехода, определяемая следующим выражением:

$$W_i = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{f,q} \left[|\langle f | M_+ | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\Omega - \hbar\omega_q) + |\langle f | M_- | i \rangle|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\Omega + \hbar\omega_q) \right], \quad (6)$$

где E_i и E_f — энергии начального и конечного состояний электронов, соответственно, $\hbar\Omega$ — энергия фотона, $\hbar\omega_q$ — энергия фонона, $\langle f | M_{\pm} | i \rangle$ — элементы матрицы перехода от начального состояния к конечному состоянию взаимодействия между электронами, фононами и фотонами. Элементы матрицы перехода можно представить в виде:

$$\langle f | M_{\pm} | i \rangle = \sum_{\alpha} \left(\frac{\langle f | H_R | \alpha \rangle \langle \alpha | V_s | i \rangle}{E_i - E_{\alpha} \mp \hbar\omega_q} + \frac{\langle f | V_s | \alpha \rangle \langle \alpha | H_R | i \rangle}{E_i - E_{\alpha} - \hbar\Omega} \right), \quad (7)$$

где индексы i, a, f обозначают начальное, промежуточное и конечное состояния электрона с квантовыми числами k, n, l, H_R — оператор электрон-фотонного взаимодействия, V_s — оператор электрон-фононного взаимодействия.

Подставив выражения для волновых функций (3) в выражение (7) для матричных элементов электрон-фотонного взаимодействия, получим:

$$\langle n'l'k'_z | H_R | nk_z \rangle = \frac{e\Delta d \sin(k_z d)}{2\hbar} \left(\frac{2\pi\hbar n_0}{V\Omega\varepsilon} \right)^{1/2} \delta_{nn'} \delta_{ll'} \delta_{kk_z} \quad (8)$$

где V — объем кристалла, поле излучения поляризовано вдоль ξ -направления, ε — вектор поляризации.

Функция распределения электронов для невырожденного электронного газа имеет вид:

$$f_0(E_{nk_z}) = \frac{2n_{1D} d e^{\frac{\Delta}{k_B T}} \sinh\left(\frac{\hbar\omega_x}{2k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\hbar\omega_y}{2k_B T}\right)}{M\left(\frac{1}{2}, 1, \frac{\Delta}{k_B T}\right)} \exp\left(-\frac{E_{nk_z}}{k_B T}\right), \quad (9)$$

где n_{1D} — число электронов на единицу длины, а $M(a, c, x)$ — вырожденная гипергеометрическая функция [31]

$$M(a, c, x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a)_n x^n}{(c)_n n!}. \quad (10)$$

Матричный элемент электрон-фононного взаимодействия имеет следующий вид:

$$|\langle k'_z n'l' | V_s | k_z nl \rangle|^2 = C_j'^2 J_{nn'}(x) J_{ll'}(y) I(q_z), \quad (11)$$

где V_s — оператор энергии взаимодействия электрона с фононом, C_j — функция, характеризующая взаимодействие электронов и фононов,

$$\begin{aligned} J_{nm'}(q_x) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{iq_x x} dx \Psi_n(x) \Psi_{n'}(x), \\ J_{l'l'}(q_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{iq_y y} dy \Psi_l(y) \Psi_{l'}(y), \\ I(q_z) &= \int_0^d \xi_{k_z}(z) \xi_{k'_k}(z) e^{iq_z z} dz, \end{aligned} \quad (12)$$

При взаимодействии электрона с полярными оптическими фононами имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{POL}^2 &= 2\pi e^2 \hbar \omega_0 \left\{ \frac{1}{\varepsilon_{\infty}} - \frac{1}{\varepsilon_0} \right\}, \\ F_{POL} &= \frac{N_0^{\pm}}{q^2}, \quad N_0 = \left[\exp\left(\frac{\hbar \omega_0}{K_B T}\right) - 1 \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $N_0^- = N_0$, $N_0^+ = N_0 + 1$.

Здесь ε_{∞} и ε_0 — высокочастотная и статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника, соответственно. Энергия фононов принята $\hbar \omega_q = \hbar \omega_0 = \text{const}$.

$$N_0 = \left[\exp\left(\frac{\hbar \omega_0}{K_B T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad N_0^- = N_0, \quad N_0^+ = N_0 + 1, \quad (14)$$

где $N_0^- (N_0^+)$ описывает уничтожение и рождение фонона.

Для взаимодействия электрона с неполярными оптическими фононами

$$C_{np}^2 = \frac{\hbar D}{2\rho \omega_0 V}, \quad F_{np}(q) = N_0^{\pm}, \quad (15)$$

где D — константа потенциала неполярной оптической деформации.

Учитывая формулы (6) и (11) в (5) и суммируя по k'_z , для коэффициента поглощения получим:

$$\begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{\pi e \Delta d}{\hbar^2} \right)^2 \frac{1}{CV \Omega^3 \varepsilon^{\frac{1}{2}}} \times \\ &\times \sum_{n'e'} \sum_{n''e''} \sum_{q} f_{nk_z} C_j^2 |I_{m'}(q_x)|^2 |I_{e''}(q_y)|^2 (\sin(k_z + q_z)d - \sin k_z d)^2 \times \\ &\times \left\{ N_0 \delta\left((n'-n)\hbar \omega_x + (e'-e)\hbar \omega_y + \frac{\Delta}{2}(\cos k_z d - \cos(k_z + q_z)d - \hbar \Omega + \hbar \omega_0)\right) + \right. \\ &\left. + (N_0 + 1) \delta\left((n'-n)\hbar \omega_x + (l'-l)\hbar \omega_y + \frac{\Delta}{2}(\cos k_z d - \cos(k_z + q_z)d - \hbar \Omega - \hbar \omega_0)\right) \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

В формуле (16), переходя от суммирования по k'_z и q к интегрированию по k_z и q , используя выражение:

$$\sum_q \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\pi/d}^{\pi/d} dq_x dq_y dq_z, \quad (17)$$

$$\sum_{k_z}(\dots) = \left(\frac{L_z}{2\pi} \right) \int_{-\pi/d}^{\pi/d}(\dots), \quad (18)$$

и используя свойства δ -функции Дирака:

$$\delta[f(x)] = \sum_i \frac{\delta(x-x_i)}{|f'(x_i)|}, \quad (19)$$

где x_i — простые нули функции $f(x)$,

$$\int_{-\pi/d}^{\pi/d} dq_z f(q_z) \delta(q_z - a) = f(a). \quad (20)$$

для коэффициента поглощения при рассеянии на полярных и неполярных оптических фононах получим:

$$\begin{aligned} \alpha_{pol} &= \frac{4\pi e^4 \Delta d \omega_0 L_z}{c \Omega^3 \varepsilon^{\frac{1}{2}} \hbar^3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} - \frac{1}{\varepsilon_0} \right) \times \\ &\times \sum_{n'e'} \sum_{n''e''} \sum_{\pm} \int_{-\pi/d}^{\pi/d} dk_z f_{nek_z} \left(N_0 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \frac{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_{\pm}^2 - \sin k_z d}}{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_{\pm}^2}} \times \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &\times \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{|I_{nm'}(q_x)|^2 |I_{e''}(q_y)|^2}{(q_x^2 + q_y^2) + a_{\pm}^2} dq_x dq_y, \\ \alpha_{n.pol} &= \frac{D^2 e^2 \Delta d}{\pi c \rho \omega_0 \Omega^3 L_x L_y \varepsilon^{\frac{1}{2}}} \times \\ &\times \sum_{n'e'} \sum_{n''e''} \sum_{\pm} \int_{-\pi/d}^{\pi/d} dk_z f_{nek_z} \left(N_0 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \frac{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_{\pm}^2 - \sin k_z d}}{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_{\pm}^2}} \times \end{aligned} \quad (22)$$

$$\times \frac{1}{n'-n} \cdot \frac{1}{l'-l},$$

где

$$\begin{aligned} \Theta_{\pm}(k_z d) &= (n'-n)\hbar \omega_x + (l'-l)\hbar \omega_y \pm \\ &\pm \hbar \omega_0 + \hbar \Omega + \frac{\Delta}{2} \cos k_z d, \end{aligned} \quad (23)$$

$$a_{\pm}^2 = \frac{1}{d^2} \left(k_z d - \cos^{-1} \left(\frac{2}{\Delta} \Theta_{\pm}(k_z d) \right) \right)^2,$$

При выводе формулы (22) было учтено, что

$$\int_0^{\infty} \frac{|I_{m'}(u)|^2 du}{u} = \frac{1}{n'-n}.$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из выражения (22) видно, что коэффициент поглощения расходится всякий раз, когда выполняется условие $1 - 4\Theta_i^2/\Delta^2 = 0$. Кроме того, из того факта, что значения действительны и положительны, мы можем найти интервал энергий для допустимых значений коэффициента поглощения.

Как следует из уравнений (21-22), пики наблюдаются при определенных частотах

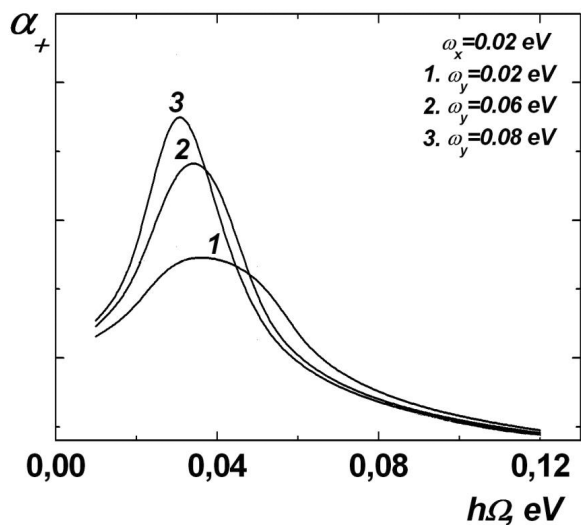


Рис. 1. Зависимость α_+ от $h\Omega$ при $h\omega_x = 0.03$ эВ и $h\omega_y = 0.02$ эВ, 0.06 эВ, 0.08 эВ.

падающего фотона. Резонансное поведение коэффициента поглощения для электрон-фононного рассеяния проявляется для частот, удовлетворяющих соотношению

$$N\hbar\omega_x + P\hbar\omega_y \pm \hbar\omega_0 = \hbar\Omega, \quad (24)$$

здесь $N = n' - n = 1, 2, 3, \dots$ и $P = l' - l = 1, 2, 3, \dots$

Из уравнения (24) следует, что в результате рассеяния электронов с подуровней, определяемых индексом $n(l)$, могут переходить на один из подуровней с индексом $n'(l')$, поглощая или испуская фотон с энергией $\hbar\Omega$ при поглощении ЛО-фонона с энергией $\hbar\omega_0$.

Уравнение (24) является основным уравнением для определения формы спектральной линии поглощения, которая позволяет анализировать резонансные эффекты в полупроводниках.

На Рис. 1 представлена зависимость α_+ от $h\Omega$ для $h\omega_x = 0.03$ эВ и $h\omega_y = 0.02$ эВ, 0.06 эВ, 0.08 эВ.

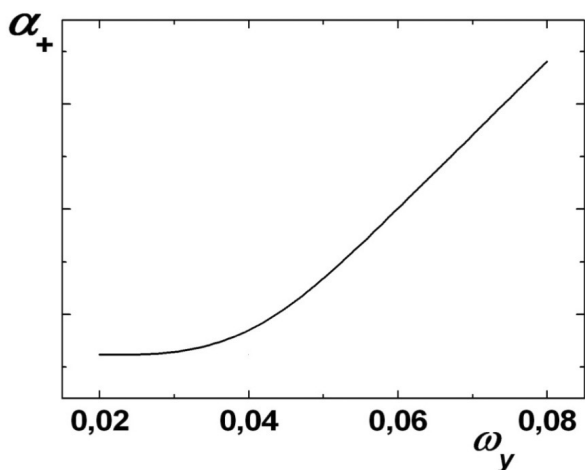


Рис. 2. Зависимость α_{+max} от ω_y при $\Delta = 0.0024$ эВ.

На Рис. 2 представлена зависимость α_{+max} от ω_y для $\Delta = 0.0024$ эВ.

Как видно, с ростом ω_y максимум α_+ растет. Значения ω_y , влияющие на изменение α_{+max} , а также частота, на которой оно достигается ($h\Omega$), смещаются в сторону малых частот.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассчитали поглощение свободными носителями электромагнитного излучения с полярными и неполярными оптическими фононами. Отметим, что суммирование в уравнении (21) по размерным подуровням содержит вклады трех типов: (i) $n' \neq n, l' = l$, (ii) $n' = n, l' \neq l$ и (iii) $n' \neq n, l' \neq l$. Исходя из правил отбора, возможны три следующих перехода при рассеянии электронов на полярных оптических фононах: (1) переход между размерными подуровнями только в x -направлении, (2) переход между размерными подуровнями только в y -направлении, (3) переход между размерными подуровнями как в x -направлении, так и y -направлении.

Из уравнения (22) следует, что для рассеяния электрона на неполярных оптических фононах возможен только один переход – переход, обусловленный размерными подуровнями как для x -направления, так и для y -направления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Esaki I, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors. *IBM J. Res. Dev.*, 1970, 14:61-65.
2. Eaves L, Sheard FW, Toombs GAT. *Band Structure Engineering in Semiconductor Microstructures*. New York, Plenum, 1989, 400 p.
3. Mendez EE. *Interfaces, Quantum Wells, and Superlattices*. New York, Plenum, 1989, 403p.
4. Suris RA, Dmitriev IA. Bloch oscillations in quantum dot superlattices. *UFN*, 2003, 46(7):769.
5. Imran A, Jiang J, Eric D, Zahid MN, Yousaf M, Shah Z. Optical properties of InAs/GaAs quantum dot superlattice structures. *Results in Physics*, 2018, 9:297-302.
6. Hiura S, Itabashi K, Takeishi K, Takayama J, Kiba T, Murayama A. Quantum spin transport to semiconductor quantum dots through superlattice. *Applied Physics Letters*, 2019, 114:072406.
7. Eric D, Jiang J, Imran A, Zahid MN, Khan AA. Effects of quantum confinement on

- optical properties of InN/GaN quantum dots. *Conference: Applied Optics and Photonics China*, 2019, vol. 11336. Beijing, China.
8. Shu WM, Lei XL. Miniband transport in semiconductor superlattices in a quantized magnetic field. *Phys. Rev. B*, 1994, 50:17378.
 9. Lee SC. Optically Detected Spin-Magnetophonon. *J. Korean Phys. Soc.*, 2007, 51:1973.
 10. Lee SC. Electrophonon Resonance in Quantum-Dot Superlattices. *J. of Korean Phys. Soc.*, 2008, 52:1081.
 11. Kang DS, Lee SC, Kim SW. Magnetophonon Resonance by Quantum Size Effects in n-Ge-based and n-GaAs-based Quantum-dot Superlattices. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, 57:760.
 12. Ermakov VA, Clemente da Silva Filho JM, Bonato LG, Vardhan Mogili NV, Montoro FE, Iikawa F, Nogueira AF, Cesar CL, Jiménez-Villar E, Chagas Marques F. Three-Dimensional Superlattice of PbS Quantum Dots in Flakes. *ACS Omega*, 2018, 3:2027.
 13. Quang Bau N. Do Tuan Long Journal of Science: Impact of confined LO- phonons on the Hall effect in doped semiconductor superlattices. *Advanced Materials and Devices*, 2016, 1:209.
 14. Hong-Jing X, Chuan-Yu Ch, Ben-Kun M. The bound polaron in a cylindrical quantum well wire with a finite confining potential. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2000, 12:8623.
 15. Hong-Jing X, Chuan-Yu Ch, Ben-Kun M. Bound polaron in a cylindrical quantum wire of a polar crystal. *Phys. Rev. B*, 2000, 61:4827.
 16. Dumke WP. Quantum theory of free carrier absorption. *Phys. Rev.*, 1961, 124:1813.
 17. Seeger K. *Semiconductor Physics: An Introduction*, Springer Series in Solid State Sciences. 9th ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004, 538p.
 18. Spector HN. Free-carrier absorption in quasi-two-dimensional semiconducting structures. *Phys. Rev. B*, 1983, 28:971.
 19. Adamska H, Spector HN. Free-carrier absorption from electrons in confined systems. *J. Appl. Phys.*, 1986, 59:619.
 20. Wu CC, Lin CJ. Free-carrier absorption in n-type piezoelectric semiconductor films. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1994, 6:10147.
 21. Adamska H, Spector HN. Free carrier absorption in quantum well structures for polar optical phonon scattering. *J. Appl. Phys.*, 1984, 56:1123.
 22. Kubakaddi SS, Mulimani BG. Free-carrier absorption in semiconducting quantum well wires for nonpolar optical phonon scattering. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63:1799.
 23. Kubakaddi SS, Mulimani BG. Free-carrier absorption in semiconducting quantum well wires. *J. Phys. C: Solid State. Phys.*, 1985, 18:6647.
 24. Ibragimov GB. Intersubband optical absorption in parabolic quantum wires under a tilted magnetic field. *Phys. stat. sol. (b)*, 2004, 241:1923.
 25. Ibragimov GB. Free-carrier magnetoabsorption in quantum well wires. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2003, 15:8949.
 26. Ibragimov GB. Free-carrier magnetoabsorption in quantum well structures. *Ukr. J. Phys.*, 2003, 48:527.
 27. Ibragimov GB, Huseyin D, Halil Y. Confined LO phonon limited free carrier absorption in quantum well wires. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2006, 9:12.
 28. Ibragimov GB, Ibaeva RZ. Theory of intraband absorption of electromagnetic radiation in cylindrical quantum wires. *Journal of Non-Oxide Glasses*, 2020, 12:4.
 29. Shorokhov AV, Margulis VA. Intraband resonance scattering of electromagnetic radiation in anisotropic quantum dots. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2010, 1:178.
 30. Khoa DQ, Hieu NN, Bich TN, Phuong Le TT, Hoi BD, Tran PTL, Quach KQ, Nguyen CV, Phuc HV. Magneto-optical absorption in quantum dot via two-photon absorption process. *Optik*, 2018, 173:263.
 31. George B. Arfken, Hans J. Weber. *Mathematical Methods for Physicists*. Academic Press, New York, 2001, 1182 p.

Ибрагимов Гусейн Бехбуд

д.ф.-м.н., проф.

Институт физики НАН Азербайджана

33, пр. Г.Джавида, Баку 1143, Азербайджан

E-mail: guseyn_gb@mail.ru

Ибаева Раида Забит

кандидат физических наук

Институт физики НАН Азербайджана

33, пр. Г.Джавида, Баку 1143, Азербайджан

E-mail: raidaibayeva1@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.255

Ключевые особенности протоколов квантового распределения ключей на непрерывных переменных

Бурлаков Е.В., Коробов А.В.

Московский технический университет связи и информатики, <https://mtuci.ru/>

Москва 111024, Российская Федерация

E-mail: e.v.burlakov@mtuci.ru, a.v.korobov@mtuci.ru

Поступила 08.11.2023, рецензирована 15.11.2023, принята 22.11.2023, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: В работе рассмотрены ключевые особенности протоколов квантового распределения ключей на непрерывных переменных. Обоснована мотивация изучения и разработки методов квантовой криптографии. Выделены основные моменты, присущие протоколам на непрерывных переменных, и проведена их классификация по различным признакам, особенностям и вариантам реализации. Подробно рассмотрен пример протокола с дискретной модуляцией и регистрацией сигнала по средствам балансного гомодинного детектирования. Приведена классификация атак на квантовый протокол. Дана общая характеристика методам постобработки. Обозначена роль шумов, и рассмотрены подходы к оценке уровня секретности, которые применимы для протоколов на непрерывных переменных. В заключении приведены основные выводы касательно текущего статуса данной проблемы, а также определены аспекты, которые требуют дальнейшего изучения.

Ключевые слова: квантовая информатика, квантовая криптография, квантовое распределение ключей, непрерывные переменные, гомодинное детектирование

PACS: 03.67.Dd, 42.50.Dv, 89.70.+c

Для цитирования: Бурлаков Е.В., Коробов А.В. Ключевые особенности протоколов квантового распределения ключей на непрерывных переменных. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):255-266. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.255.

Key features of continuous-variable quantum key distribution protocols

Evgenii V. Burlakov, Alexander V. Korobov

Moscow Technical University of Communications and Informatics, <https://mtuci.ru/>

Moscow 111024, Russian Federation

E-mail: e.v.burlakov@mtuci.ru, a.v.korobov@mtuci.ru

Received November 08, 2023, peer-reviewed November 15, 2023, accepted November 22, 2023, published April 25, 2024

Abstract: The key features of continuous-variables quantum key distribution protocols are considered in the paper. The motivation for studying and developing methods of quantum cryptography is substantiated. The main aspects inherent to continuous-variable protocols are highlighted, and they are classified based on various characteristics, peculiarities, and implementation variants. A detailed examination of a protocol example with discrete modulation and signal registration through balanced homodyne detection is provided. A classification of attacks on the quantum protocol is presented. A general overview of post-processing methods is given. The role of noise is indicated, and approaches to assessing the level of security applicable to continuous-variable protocols are discussed. In conclusion, the main conclusions regarding the current status of this problem are presented, and aspects requiring further study are identified.

Keywords: quantum information, quantum cryptography, quantum key distribution, continuous variables, homodyne detection

PACS: 03.67.Dd, 42.50.Dv, 89.70.+c

For citation: Evgenii V. Burlakov, Alexander V. Korobov. Key features of continuous-variable quantum key distribution protocols. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):255-266e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.255.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (256)
 2. ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ПРОТОКОЛОВ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ (257)
 3. ОПИСАНИЕ МЕТОДА БАЛАНСНОГО ГОМОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ (257)
 4. ОПИСАНИЕ ПРОТОКОЛА CV QKD С ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ (259)
 5. КЛАССИФИКАЦИЯ АТАК НА КВАНТОВЫЙ ПРОТОКОЛ (260)
 6. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТОБРАБОТКИ (261)
 7. РОЛЬ ШУМОВ В РЕАЛИЗАЦИИ CV QKD (261)
 8. ОБОСНОВАНИЯ СЕКРЕТНОСТИ (262)
 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (263)
- ЛИТЕРАТУРА (263)

1. ВВЕДЕНИЕ

В наше время происходит такое стремительное развитие квантовых технологий, которое можно назвать второй квантовой революцией [1, 2]. Действительно, многие из фундаментальных свойств квантовой механики, такие как квантовая запутанность [3], телепортация [4], теорема о запрете копирования [5], получили экспериментальную проверку и легли в основу идей, которые могут быть использованы для практических целей. В то же время, мы живем в век информационных технологий, информация, в том или ином виде, все больше входит в нашу повседневную жизнь. Естественным образом возникает процесс слияния квантовых технологий и информатики, появляется такая область науки как квантовая информатика [6, 7]. Одним из разделов квантовой информатики является квантовая криптография [8-11]. На протяжении всей своей истории человечество искало конфиденциальный способ обмениваться информацией, с течением времени актуальность этой проблемы только возрастает. Сейчас без криптографии не мыслимо функционирование армии, правительства и банковской сферы.

Известно, что, чтобы достичь теоретически защищенной коммуникации, достаточно использовать метод одноразового блокнота

(шифр Вернама) [12]. Этот метод частично сводит проблему обмена секретными сообщениями к проблеме распределения секретного ключа, которым кодируются сообщения, передаваемые между двумя абонентами. В настоящее время чаще всего используются классические алгоритмы шифрования для распределения секретного ключа [13]. Надежность большинства таких алгоритмов математически не доказана и основывается на том, что на сегодняшний день пока не существует классического эффективного алгоритма факторизации больших чисел [14]. Поэтому в будущем, после возможного создания эффективных алгоритмов факторизации больших чисел или достаточно мощных квантовых компьютеров [15], от современных методов классического распределения ключей придется отказаться.

Идея квантовой криптографии направлена на решение проблемы распределения секретного ключа таким образом, что безопасность ключа будет гарантироваться законами квантовой механики, тем самым секретность обеспечивается на уровне фундаментальных законов природы. Протокол квантового распределения ключей BB-84 [16] опирается на квантово-механическую теорему о запрете копирования неизвестного квантового состояния [5]. Протокол устроен таким образом, что любая попытка подслушателя (Ева) перехватить информацию о ключе всегда может быть обнаружена при определенных согласованных действиях пользователей, распределяющих ключ (Алиса и Боб). BB-84 был исторически первым протоколом квантового распределения ключей и до сих пор остается одним из самых надежных протоколов. Однако исследования в этом направлении ведутся непрерывно, позже были предложены другие протоколы квантовой криптографии: E-91 [17], B-92 [18], GG-02 [19], Lo-05 [20], со своими уникальными особенностями. Отдельного

внимания заслуживают протоколы на так называемых непрерывных переменных (CV QKD) [19,21]. Целью данной работы является обобщить результаты научных исследований по ключевым особенностям протоколов квантового распределения ключей на непрерывных переменных, обосновать необходимость дальнейшего изучения и разработки данной проблемы, а также определить те ее аспекты, которые требуют дальнейшего изучения.

2. ОСОБЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ПРОТОКОЛОВ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

К началу 2000-х годов стало ясно, что для целей квантовой криптографии можно использовать методы, при которых информация о секретном ключе кодируется в значение комплексной амплитуды (амплитуды и фазы) оптического поля (CV QKD) [19,21-23]. Данная величина является непрерывной квантовой переменной, то есть при измерении дает величину, непрерывно меняющуюся в определенном интервале значений. В этом состоит отличие непрерывной квантовой переменной от кубита [6], результаты измерения которого образуют дискретный спектр. Для непрерывных переменных так же, как и для дискретных переменных справедлива теорема о запрете копирования неизвестного квантового состояния, что также является фактором, лежащим в основе секретности подобных протоколов [24].

По сравнению с протоколами КРК на дискретных переменных, протоколы на непрерывных переменных экспериментально реализуются несколько реже. Причиной этого служат возникающие сложности с обоснованиями секретности [24], особенно для протоколов с так называемой негауссовой модуляцией, а также чувствительность реализаций протокола к всевозможным шумам [25]. Однако CV QKD имеет несколько привлекательных особенностей, которых нет у протоколов на дискретных переменных. В CV QKD применяются многофотонные лазерные импульсы (порядка 250 фотонов в импульсе) [21], что благоприятно сказывается на скорости генерации секретного ключа,

кроме того не требуется применение источника [26-28] и детектора [29] одиночных фотонов, которые являются коммерчески дорогими и на сегодняшний день пока несовершенными для нужд квантового распределения ключей (КРК).

Все большее число исследователей обращают свое внимание на протоколы семейства CV QKD . Уже были реализованы протоколы CV QKD в оптоволокне [30], в свободном пространстве [31], по схеме реализации в однопроходном [19] и двухпроходном вариантах [32]. Так же были реализованы варианты CV QKD с локальным осциллятором (опорным сигналом) доступным только на стороне получателя (дважды локальный осциллятор) [33]. Такой вариант схемы значительно повышает надежность протокола. По типу модуляции протоколы CV QKD делятся на протоколы с гауссовой [19] модуляцией и протоколы с дискретной модуляцией [34]. Протоколы с гауссовой модуляцией сложнее в реализации, но для них обоснована секретность против атак общего типа (когерентных атак) [35]. Протоколы с негауссовой модуляцией часто имеют более простую техническую реализацию и алгоритмы постобработки, но для них возникают сложности с обоснованиями секретности. В качестве сигнальных состояний чаще всего используются когерентные состояния оптического поля, но могут быть использованы также сжатые [36] и тепловые состояния [37]. Специфической частью для протоколов CV QKD является процедура балансного гомодинного детектирования [38]. Существуют варианты CV QKD в которых эта процедура заменена на процедуру гетеродинирования [38], что не только благоприятно сказывается на скорости генерации секретного ключа, но позволяет отказаться от источника генерации случайных [39,40] или псевдослучайных чисел на стороне получателя.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДА БАЛАНСНОГО ГОМОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Как было отмечено выше, проведение балансного гомодинного детектирования является важной и специфической частью протоколов CV QKD , поэтому эту процедуру имеет смысл описать отдельно. Лазерное поле с высокой степенью точности может быть

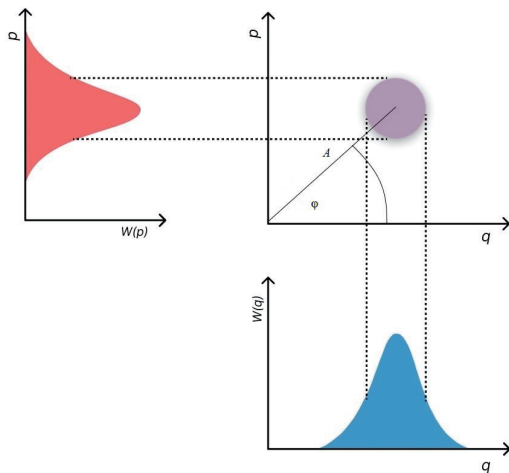


Рис. 1. Наглядное представление комплексной амплитуды сигнального когерентного состояния $|\alpha\rangle$. Конец вектора амплитуды окружен "кругом неопределенностей", это отражает факт, присутствия неустраняемого квантового шума.

описано когерентным состоянием $|\alpha\rangle$, где $a = A \exp(i\varphi) = q + ip$ комплексный параметр кодирующий амплитуду и постоянную (начальную) компоненту фазы оптического сигнала. Данные характеристики однозначно образом могут быть пересчитаны в квадратурные компоненты сигнала: "координату" q и "импульс" p [22]. Эти величины получили такое название потому, что при квантовом рассмотрении электромагнитного поля, они имеют такое же (с точностью до константы) коммутационное соотношение, как и операторы координаты и импульса квантово-механической частицы: $[\hat{q}, \hat{p}] = i$. Это в свою очередь означает, что для них справедлив принцип неопределенности Гейзенберга, то есть определенное соотношение на дисперсии этих величин (**Рис. 1**). "Координата" q и "импульс" p сигнального состояния могут быть экспериментально измерены следующим образом [22]: сигнальное состояние подвергается интерференции со вспомогательным пучком, той же частоты (локальным осциллятором, гомодином), на симметричном светоделителе. Затем, каждый из выходных пучков светоделителя попадает

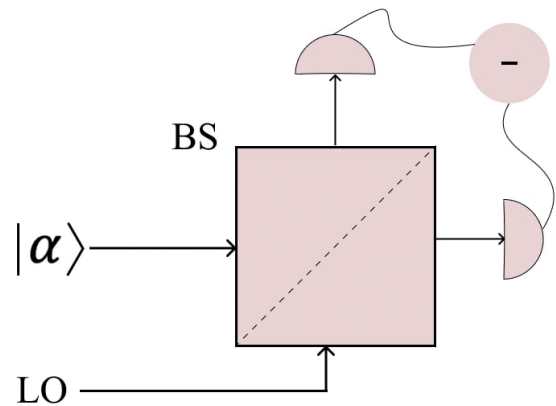


Рис. 2. Сигнальное когерентное состояние $|\alpha\rangle$ смешивается на симметричном свето-делителе с опорным оптическим полем (гомодином, локальным осциллятором), результирующие пучки падают на фотодиоды гомодинного детектора, который трансформирует падающее излучение в разностный фототок.

на фотодиоды гомодинного детектора (**Рис. 2**). Можно показать, что, в зависимости от разности фаз между сигналом и гомодином θ , результирующий разностный фототок I пропорционален либо "координате" q , либо "импульсу" p , либо их комбинации:

$$I \sim q \cos \theta + p \sin \theta. \quad (1)$$

Данный фототок I усиливается в детекторе и трансформируется в выходное напряжение, передаваемое на осциллограф. Данные с осциллографа обрабатываются, и восстанавливается информация о квадратурах. Таким образом, регулируя на своей стороне разность фаз θ между сигналом и гомодином (опорным сигналом, локальным осциллятором), Боб фактически выбирает какую квадратуру ему предстоит измерять. Описанная схема детектирования, используется не только для CV QKD, но и для проведения, так называемой квантовой томографии [41], восстановлении квантового состояния по данным гомодинирования. Так, например, квадратурные компоненты являются аргументами функции Вигнера $W(q,p)$ [42-45] – важного объекта квантовой оптики, представляющего собой функцию квази-распределения.

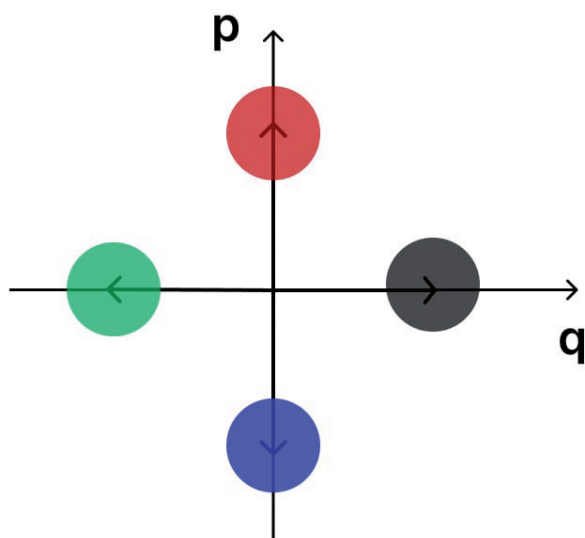


Рис. 3. Визуализация первого и второго пункта протокола с помощью метода векторных диаграмм. Алиса готовит одно из четырех состояний в каждой посылке.

4. ОПИСАНИЕ ПРОТОКОЛА CV QKD С ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Ниже представлен вариант протокола CV QKD с дискретной модуляцией с использованием когерентных состояний, детектирование предполагается гомодинным. Такой вариант протокола, как правило, имеет более простую техническую реализацию по сравнению с протоколами с гауссовой модуляцией, и в то же время отражает многие важные моменты квантового распределения ключей на непрерывных переменных. Кроме того, на его примере лучше всего прослеживается аналогия с известным протоколом BB-84, особенно, если пользоваться методом визуализации в виде векторных диаграмм (Рис. 3, 4).

Типичная схема реализации протокола CV QKD с дискретной модуляцией, выглядит следующим образом [11]:

1. Отправитель (Алиса) генерирует случайную комплексную величину $|\alpha\rangle$, где $a = A \exp(i\varphi) = q + ip$ – фиксированный параметр, φ может принимать одно из четырех значений: $\varphi = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$. Причем, значения $\varphi = \{0, \pi\}$ кодируют “координату” q , а значения $\varphi = \{\pi/2, 3\pi/2\}$ кодируют “импульс” p .

2. Алиса повторяет пункт 1 несколько раз, то есть генерирует набор комплексных параметров

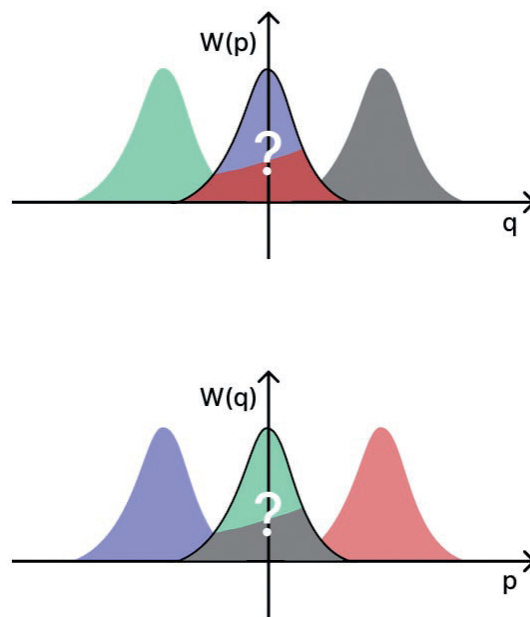


Рис. 4. Визуализация третьего пункта протокола. Боб применяя метод балансного гомодинного детектирования проецирует полученное состояние на вертикальную или горизонтальную ось, измеряя либо “координату” q либо “импульс” p .

$\{\alpha\}$. На основе этого набора, поочередно, создает и отправляет получателю (Бобу) когерентные состояния $\{|\alpha\rangle\}$ в виде отдельных посылок (лазерных импульсов).

3. Боб, пользуясь методом балансного гомодинного детектирования, в каждой посылке производит измерение одной из двух квадратурных компонент: “координаты” q или “импульса” p . Иными словами регулирует по своему усмотрению разность фаз между сигналом и гомодином θ . Согласно формуле (1), $\theta = 0$ соответствует измерению “координаты”, а $\theta = \pi/2$ измерению “импульса”. Результаты измерения составляют сырой ключ Боба.

4. Боб по открытому каналу сообщает Алисе, какую переменную: “координату” q или “импульс” p он измерил в каждой посылке, не сообщая ее конкретного значения. Предполагается, что до начала процедуры распределения ключа Алиса и Боб синхронизировали фазы сигналов и четко знают, что принимается за “координату” q , а что за “импульс” p .

5. Алиса использует информацию, полученную от Боба для получения своего “сырого” ключа,

отбрасывая те значения последовательности случайных величин, при измерении которых Боб ошибся с выбором фазы. Например, в посылке кодировалась “координата” q , а Боб измерял “импульс” p .

6. Алиса формирует бинарный ключ. Оставшимся после проведения предыдущего пункта посылкам со значениями $\varphi = \{0, \pi/2\}$ ставит в соответствие 1, а посылкам со значениями $\varphi = \{\pi, 3\pi/2\}$ ставит в соответствие 0.

7. Боб анализирует среднее значение фототока, полученное в результате гомодинирования каждой конкретной посылки из набора, полученного от Алисы. Если оно положительно и соответствует величине A , то ставит в соответствие этой посылке 1, если отрицательно и соответствует величине $-A$, то ставит в соответствие 0. Если средняя величина фототока близка к нулю, то это означает, что Боб не угадал базис, и такие посылки отбрасываются.

Если Боб замечает, что средняя величина фототока I имеет некое промежуточное значение, не соответствующее, ни A , ни $-A$, ни 0, и наблюдается рост дисперсии фототока, то это может означать, что канал связи прослушивается злоумышленником (Евой).

Ключевое отличие протоколов с гауссовой модуляцией заключается в том, что комплексные числа $a = A \exp(i\varphi) = q + ip$, которые генерирует Алиса, могут принимать не четыре разных значения, а генерируются согласно двумерному гауссовому распределению с центром в начале координат и дисперсией V_A . Тогда результирующая дисперсия квадратур с учетом квантового шума в соответствующих единицах равна $V = V_A + 1$.

Предложенный протокол не требует ни источника, ни детектора одиночных фотонов. В качестве источника излучения при реализации протокола в оптоволокне обычно используются лазеры, генерирующие излучение с длиной волны 1550 нм. [46]. В качестве устройства детектирования используются балансные гомодинные детекторы с недорогими фотодиодами на основе кремния или арсенида галлия [47]. Предложенная выше схема носит лишь

принципиальный характер и не учитывает некоторые особенности, которые возникают при технической реализации. К таким особенностям можно отнести: устройство локального осциллятора (гомодина), учет шумов и потерь в канале связи и в детекторе, поляризационные искажения сигнала, особенности работы амплитудных и фазовых модуляторов оптического поля, стабилизация видности интерференционной картины. За подробностями по этим и некоторым другим вопросам следует обратиться к списку литературы [25].

5. КЛАССИФИКАЦИЯ АТАК НА КВАНТОВЫЙ ПРОТОКОЛ

Классификация атак может быть проведена несколькими способами [11]. Злоумышленник (Ева) может проводить атаки на протокол или атаки на его техническую реализацию. Атаки на протокол могут быть в свою очередь поделены на две группы, *косвенные*: с использованием Евой вспомогательной квантовой системы, называемой анциллой (ancilla), и *прямые*: без использования анциллы. Атаки с использованием анциллы делятся на три типа: *индивидуальные*, *коллективные* и *когерентные*. При проведении *индивидуальных атак* Ева заготавливает несколько вспомогательных квантовых систем (анцилл), каждая анцилла взаимодействует с соответствующим квантовым состоянием Алисы (или Боба), которое непосредственно переносит информацию о ключе. В более поздние моменты времени Ева проводит измерения над каждой анциллой в отдельности и получает некую информацию о секретном ключе. В случае *коллективной атаки* также каждая анцилла взаимодействует с определенной информационной квантовой системой, однако Ева проводит коллективное измерение над всеми анциллами сразу, это позволяет ей получить большую информацию, чем в случае индивидуальных измерений. К третьему типу возможных атак относится *когерентная атака*, эта самый общий тип атак, при котором анцилла Евы представляет, вообще говоря, многоуровневую квантовую систему, которая взаимодействует со всеми информационными состояниями сразу, после

чего Ева производит измерения над своей анциллой в подходящий для нее момент времени. В некоторых случаях удастся показать эквивалентность коллективных и когерентных атак, в общем же случае далеко не всегда удастся явно построить когерентную атаку или указать максимальную величину информации, которую получит Ева в результате такой атаки. Анализ индивидуальных и коллективных атак, как правило, значительно проще, кроме того позволяет ответить на вопрос секретен ли протокол в принципе, то есть выполняет роль необходимого условия секретности.

6. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТОБРАБОТКИ

Как и во всех квантовых протоколах, в *CV QKD* необходимо проводить классическую пост-обработку: данные, полученные в результате квантовой части протокола должны быть классическим образом обработаны для получения окончательного секретного ключа. Классическая постобработка включает в себя [11] несколько этапов: *просеивание ключа* – Алиса и Боб отбрасывают те посылки, в которых не удалось угадать базисы друг друга. *Оценка параметров* – Алиса и Боб публично раскрывают часть ключа для оценки таких параметров как потери в канале связи и дополнительный шум, эти величины необходимы для подсчета величины взаимной информации между Алисой и Бобом и величины Халево [7]. *Согласование информации* – Алиса и Боб используют классические алгоритмы согласования информации, для проверки успешности предыдущих пунктов. К числу таких алгоритмов можно отнести Слайс-согласование [48], Мульти-размерное согласование [49], LDPC-коды [50]. Также различают *прямое* и *обратное* согласование, в случае *CV QKD* обратное согласование предпочтительнее. *Подтверждение* – на данном этапе, как правило применяют к ключу семейство универсальных хэш-функций, для того чтобы убедиться, что коррекция ошибок удалась. *Усиление секретности* – Алиса и Боб проводят процедуру хэширования для равномерного сжатия ключа и получения окончательного секретного ключа. *Аутентификация* – на каждом из этапов, приведенных выше Алиса и Боб должны быть уверены, что осуществляют обмен

информацией друг с другом, а не с третьей стороной, которая может для Алисы играть роль Боба, а для Боба играть роль Алисы.

7. РОЛЬ ШУМОВ В РЕАЛИЗАЦИИ *CV QKD*

Учет уровня шума в каналах связи и в аппаратуре играет очень важную роль во всех протоколах квантовой криптографии, так как потенциально в шумах скрыта полезная для Евы информация. Априори считается, что Ева располагает всеми необходимыми ресурсами для извлечения интересующей ее информации из доступных ей шумов. В *CV QKD* роль шума выходит на еще более высокий уровень, неустранимый квантовый шум не позволяет Еве остаться незамеченной, но влияние шумов другой природы должно быть сведено к минимуму. К дополнительным шумам относятся: шум неидеальности системы *QKD* [25], шум утечки в детекторе χ_{det} , шум перекрытия из-за неидеальной видности интерференционной картины, шум нестабильности по интенсивности сигнала и локального осциллятора χ_{Lo} , шум неидеальности модуляции, шум рамановского рассеяния χ_{Ram} , шум дискретизации измерений. Если шумы стохастически независимы, то их дисперсии складываются:

$$\chi = \chi_{\text{det}} + \chi_{\text{Lo}} + \chi_{\text{Ram}}. \quad (2)$$

С точки зрения векторных диаграмм (Рис. 1), дополнительный шум складывается с квантовым шумом, что эффективно увеличивает круг неопределенностей.

Дополнительные шумы часто классифицируют на те, к которым Ева имеет доступ, и те, к которым Ева доступ не имеет. Например, выделяется “оригинальная” (ORM) и “улучшенная” (RRM) реалистичные модели учета шумов [38]. Подобные классификации позволяют облегчить анализ секретности в некоторых случаях. Так, например, не кажется слишком грубым допущением, считать, что Ева не имеет доступ к локальному осциллятору, в том случае, если он полностью на стороне Алисы и не подлежит передаче [25]. Однако условность таких классификаций несколько ограничивает полученные выводы.

8. ОБОСНОВАНИЯ СЕКРЕТНОСТИ

Пусть N – число посылок, которые Алиса и Боб распределяют между собой в результате квантовой части протокола. После того, как Алиса и Боб производят процедуру согласования базисов, они получают список символов длиной $n \leq N$, который называется сырой ключ. После проведения классической постобработки Алиса и Боб сжимают секретный ключ и получают окончательный секретный ключ длины $l \leq n$. Можно рассмотреть случай, когда число посылок стремится к бесконечности, так называемый асимптотический режим, и ввести величину r , которую в англо-язычной литературе называют “секретная дробь” (secret fraction) или относительная скорость ключа [11]:

$$r = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{l}{n}. \quad (3)$$

Величина (3) фигурирует во многих доказательствах секретности квантовых протоколов. Также вводятся такие параметры как скорость генерации сырого ключа R , которую можно оценить экспериментально, то есть число символов сырого ключа, которое может быть сгенерировано системой КРК за единицу времени. Аналогично вводится величина $K = Rr$ – скорость генерации секретного ключа.

В случае индивидуальной атаки для величины справедлива формула Цисара-Кернера [51]:

$$r_{Shannon}^{\infty} = I_{AB} - I_{BE}, \quad (4)$$

где I_{AB} – взаимная информация Алисы и Боба в смысле Шеннона [52], доля общих секретных бит, которыми располагают Алиса и Боб. Данный параметр может быть точно вычислен на этапе обратного согласования, если согласование не идеальное, что чаще всего бывает на практике, величину I_{AB} нужно заменить на βI_{AB} , где $\beta < 1$ параметр неидеальности согласования. Аналогично определяется взаимная информация между Алисой и Евой I_{AE} , а также Бобом и Евой I_{BE} . Для случая CV QKD предпочтительнее обратное согласование, поэтому в формуле (4) фигурирует I_{BE} . Для случая прямого

согласования следует использовать I_{AE} вместо I_{BE} .

Для протокола CV QKD с гауссовой модуляцией данные величины равны [53]:

$$\begin{aligned} I_{AB} &= \frac{1}{2} \log_2 \frac{V + \chi}{1 + \chi}, \\ I_{BE} &= \frac{1}{2} \log_2 \left((\eta T)^2 (V + \chi)(V^{-1} + \chi) \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $V = V_A + 1$, где V_A – дисперсия гауссовой модуляции Алисы, χ – поправка, учитывающая влияние дополнительных шумов (2), η – квантовая эффективность детектора, T – потери в линии передачи. Выражение для I_{BE} – может отличаться от (5), эта величина зависит от модели дополнительных шумов и от допустимых действий Евы, которые диктуются выбранной моделью [53].

В случае коллективной атаки для величины r справедлива формула Деветака-Винтера [54]:

$$r_{Holevo}^{\infty} = I_{AB} - I_{BE},$$

где χ_{BE} – величина Холево [7] – фундаментальная граница информации, которая может быть получена Евой, эта величина достигается при квантовых коллективных измерениях. Величина Холево может быть вычислена после рассмотрения эквивалентной ЭПР-версии протокола с помощью симплектических собственных значений матрицы ковариаций γ_{AB} Алисы и Боба, в моменты до (γ_{AB}) и после ($\gamma_{A|B}$) проективных измерений Боба. Матрица ковариаций, в свою очередь, также выражается через параметры протокола [55]. Тогда для величины Холево имеем:

$$\begin{aligned} \chi_{BE} &= G\left(\frac{\lambda_1 - 1}{2}\right) + G\left(\frac{\lambda_2 - 1}{2}\right) - G\left(\frac{\lambda_3 - 1}{2}\right) - G\left(\frac{\lambda_4 - 1}{2}\right), \\ G(x) &= (x+1) \log_2(x+1) - x \log_2(x), \\ \lambda_{1,2} &= \frac{1}{2} [A \pm \sqrt{A^2 - 4B}], \\ \lambda_{3,4} &= \frac{1}{2} [C \pm \sqrt{C^2 - 4D}], \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= V^2(1 - 2T) + 2T + T^2(V + \chi_{line})^2, \\ B &= T^2(\chi_{line} + 1)^2, \end{aligned}$$

$$C = \frac{V\sqrt{B} + T(V + \chi_{line}) + A\chi_{hom}}{T(V + \chi_{tot})},$$

$$D = \sqrt{B} \frac{V + \sqrt{B}\chi_{hom}}{T(V + \chi_{tot})}.$$

Выражение для χ_{BE} также может отличаться от (6) в зависимости от выбранной модели шумов и возможностей Евы. Приведенное выше выражение (6) построено для так называемой “реалистичной” модели [55], для которой:

$$\chi_{tot} = \chi_{line} + \chi_{hom} / T,$$

$$\chi_{hom} = \frac{1 + v_{el}}{\eta} - 1,$$

$$\chi_{line} = \frac{1}{T} - 1 + \zeta,$$

где v_{el} – электронный шум в детекторе, ζ – дополнительный шум в линии передачи.

Существуют указания на то, что для CV QKD когерентная атака не дает никакой новой информации Еве по сравнению с коллективной [24].

Существуют другие подходы к оценке секретности, например, эпсилон-критерий Реннера [56], основанный на понятии следового расстояния:

$$\frac{1}{2} \|\rho_{S_A S_B E} - \tau_{SS} \otimes \rho_E\| \leq \epsilon,$$

где $\rho_{S_A S_B E}$ – матрица плотности Алисы, Боба и Евы, полученная после сеанса распределения ключей. S_A, S_B – окончательные ключи Алисы и Боба, индекс E обозначает квантовый регистр Евы, τ_{SS} – матрица плотности, соответствующая равномерному распределению ключа длины l . ρ_E – матрица плотности Евы, которая факторизована относительно системы Алисы и Боба и не коррелирует с ней. Критерий имеет прозрачную интерпретацию, матрица $\tau_{SS} \otimes \rho_E$ отражает некий идеальный результат квантового распределения ключей, а матрица $\rho_{S_A S_B E}$ реальную ситуацию, чем “ближе” реальная ситуация к идеальной, тем лучше для Алисы и Боба. Данный критерий справедлив в случае произвольной атаки Евы и не

опирается на асимптотический характер генерации ключа.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, потенциал протоколов на непрерывных переменных достаточно высокий и может быть раскрыт на современном уровне развития технологий. Такие протоколы по-прежнему остаются одними из лидеров по скорости генерации секретного ключа (порядка 2.3 Мбит/с на дистанции 25 км. [57]), а благодаря относительно недавно разработанным методам классической постобработки значительно увеличена дальность, на которую может быть распределен секретный ключ. Дальнейшего изучения как теоретического, так и экспериментального требует учет и построение моделей шумов, возникающих при практической реализации протокола, а также анализ и приведение к единообразному виду большого числа уже существующих моделей. Другим важным полем для исследований являются обоснования секретности протоколов CV QKD , лишь для некоторых из них доказана безусловная секретность, для большинства доказана секретность против коллективных атак и в асимптотическом режиме. Несмотря на свою специфику, протоколы CV QKD в будущем могут составить серьезную конкуренцию для протоколов с дискретными переменными, к которым относится, например, BB-84.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dowling JP, Milburn GJ. Quantum technology: the second quantum revolution. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 2003, A361:1655-1674.
2. Lars J. *The Second Quantum Revolution*. Springer International Publishing, 2018, 339 p.
3. Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, Horodecki K. Quantum entanglement. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81:865-942.
4. Bennett CH, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters WK. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70:1895-1899.

5. Wootters W, Zurek W. A Single quantum cannot be cloned. *Nature*, 1982, 299:802-803.
6. Nielsen A, Chuang IL. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 676 p.
7. Holevo AS. Quantum Systems, Channels, Information: A Mathematical Introduction. *De Gruyter Studies in Mathematical Physics*, 2012, 16, 362 p, Berlin, Germany, ISBN 978-3-11-027325-0.
8. Kulik SP. Quantum cryptography. Part 1. *Photonics Russia*, 2010, 2:36-41.
9. Kulik SP. Quantum cryptography. Part 2. *Photonics Russia*, 2010, 3:56-60.
10. Kulik SP. Quantum cryptography. Part 2. *Photonics Russia*, 2010, 4:28-34.
11. Wolf R. Quantum Key Distribution: An Introduction with Exercises. *Lecture Notes in Physics*, Switzerland, Springer, 2021, 229 p.
12. Vernam GS. Cipher printing telegraph systems for secret wire and radio telegraphic communications. *J. Amer. Inst. Elec. Eng.*, 1926, 45:109-115.
13. Rivest RL, Shamir A, Adleman LM. A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 1978, 21:120-126.
14. Lenstra AK. *Integer Factoring in Encyclopedia of Cryptography and Security*. Boston, Springer US, 2011, p 297.
15. Shor PW. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. *SIAM Review*, 1999, 41:303-332.
16. Bennett CH, Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing*, Bangalore, 1984, p. 175-179.
17. Ekert AK. Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67:661-663.
18. Bennett CH. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68:3121-3124.
19. Grosshans F, Grangier P. Continuous Variable Quantum Cryptography Using Coherent States. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88:057902-1-4.
20. Lo H, Ma X, Chen K. Decoy State Quantum Key Distribution. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94:230504-1-4.
21. Grosshans F, Assche GV, Wenger J, Brouri R, Cerf NJ, Grangier P. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states. *Nature*, 2003, 421:238-241.
22. Schleich WP. *Quantum Optics in Phase Space*. Berlin, Wiley-VCH, 2001, 717 p.
23. Braunstein SL, Van Loock P. Quantum information with continuous variables. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, 77:513-577.
24. Diamanti E, Leverrier A. Distributing secret keys with quantum continuous variables: principle, security, and implementations. *Entropy*, 2015, 17(12):6072-6092.
25. Laudenbach F, Pacher C, Fung CHF, Poppe A, Peev M, Schrenk B, Hentschel M., Walther P, Hübel H. Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Gaussian Modulation – The Theory of Practical Implementations. *Adv. Quantum Technol.*, 2018, 1:1800011-1-37.
26. Миронов ЮБ, Казанцев СЮ, Шаховой РА, Колесников ОВ, Машковцева ЛС, Зайцев АИ, Коробов АВ. Анализ перспектив развития источников одиночных фотонов в системах квантового распределения ключей. *Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли*, 2021, 13(6):22-33.
27. Машковцева ЛС, Болотов ДВ, Казанцев СЮ, Колесников ОВ, Миронов ЮБ, Селюков АС. Научометрический анализ публикаций по источникам одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей. *Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы*, 2022, 1:22-31.
28. Зайцев А, Зубилевич А, Колесников О, Коробов А. Источники одиночных фотонов для инфокоммуникационных систем. *Первая мила*, 2022, 6(106):64-69.
29. Cabrera B. Detection of single infrared, optical, and ultraviolet photons using superconducting transition edge sensors. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73:735.
30. Zhang Y, Chen Z, Pirandola S, Wang X, Zhou C, Chu B, Zhao Y, Xu B, Yu S, Guo H. Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key

- Distribution over 202.81 km of Fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 125:010502-1-6.
31. Hosseinidehaj N, Babar Z, Malaney R, Ng SX, Hanzo L. Satellite-Based Continuous-Variable Quantum Communications: State-of-the-Art and a Predictive Outlook. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2019, 21:881-919.
32. Weedbrook C, Ottaviani C, Pirandola S. Two-way quantum cryptography at different wavelengths. *Phys. Rev. A*, 2014, 89:012309-1-8.
33. Qi B, Lougovski P, Pooser R, Grice W, Bobrek M. Generating the local oscillator "locally" in continuous-variable quantum key distribution based on coherent detection. *Phys. Rev. X*, 2015, 5:041009-1-12.
34. Samsonov E, Goncharov R, Gaidash A, Kozubov A, Egorov V, Gleim A. Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation: mathematical model and finite-key analysis. *Scientific Reports*, 2020, 10:10034-1-9.
35. Leverrier A, Grangier P. Unconditional Security Proof of Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Discrete Modulation. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:180504-1-4.
36. Cerf NJ, Levy M, Assche GV. Quantum distribution of Gaussian keys using squeezed states. *Phys. Rev. A*, 2001, 63:052311-1-5.
37. Filip R. Continuous-variable quantum key distribution with noisy coherent states. *Phys. Rev. A*, 2008, 77:022310-1-5.
38. Chi YM, Qi B, Zhu W, Qian L, Lo HK, Youn SH, Lvovsky AI, Tian L. A balanced homodyne detector for high-rate Gaussian-modulated coherent-state quantum key distribution. *New J. Phys.*, 2011, 13:013003-1-18.
39. Arbekov IM, Molotkov SN. Extraction of quantum randomness. *UFN*, 2021, 191:651-669.
40. Shakhovoy R. Digitization of a Random Signal from the Interference of Laser Pulses: Issue of Randomness Extraction for a Quantum Random Number Generator. *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, St. Petersburg, 2023, p. 1-7.
41. Smithey DT, Beck M, Raymer MG, Faridani A. Measurement of the Wigner distribution and the density matrix of a light mode using optical homodyne tomography: application to squeezed states and the vacuum. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70:1244-1247.
42. Wigner EP. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. *Phys. Rev.*, 1932, 40:749-759.
43. Perepelkin EE, Sadovnikov BI, Inozemtseva NG, Burlakov EV. The Wigner function negative value domains and energy function poles of the harmonic oscillator. *Journal of Computational Electronics*, 2021, 20:2148-2158.
44. Perepelkin EE, Sadovnikov BI, Inozemtseva NG, Burlakov EV, Afonin PV. The Wigner function negative value domains and energy function poles of the polynomial oscillator. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 598:127339-1-15.
45. Perepelkin EE, Sadovnikov BI, Inozemtseva NG, Burlakov EV. Extended Wigner Function for the Harmonic Oscillator in the Phase Space. *Results in Physics*, 2020, 19:103546-1-8.
46. Dianov EM. Fiber lasers. *UFN*, 2004, 174:1139-1142.
47. Blakemore JS. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53:123-181.
48. Assche GV, Cardinal J, Cerf NJ. Reconciliation of a quantum-distributed Gaussian key. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2004, 50:394-400.
49. Leverrier A, Alléaume R, Boutros J, Zémor G, Grangier P. Multidimensional reconciliation for a continuous-variable quantum key distribution. *Phys. Rev. A*, 2008, 77:042325-1-8.
50. Richardson T, Urbanke R. *Modern Coding Theory*. New York, Cambridge University Press, 2008, 590 p.
51. Csiszár I, Körner J. Broadcast channels with confidential messages. *IEEE transactions on information theory*, 1978, 3:339-348.
52. Shannon CE. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 1948, 27(3):379-423.

53. Scarani V, Bechmann-Pasquinucci H, Cerf N, Dušek M, Lütkenhaus N, Peev M. The security of practical quantum key distribution. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 8(3):1301-1350.
54. Devetak I, Winter A. Distillation of secret key and entanglement from quantum states. *Proc. R. Soc. A*, 2005, 461:207-235.
55. Lodewyck J, Bloch M, García-Patrón R, Fossier S, Karpov E, Diamanti E, Debuisschert T, Cerf NJ, Tualle-Brouri R, McLaughlin SW, Grangier P. Quantum key distribution over 25 km with an all-fiber continuous-variable system. *Phys. Rev. A*, 2007, 76:042305.
56. Renner R. Security of quantum key distribution. *Int. J. Quantum Inf.*, 2008, 6:1-127.
57. Weerasinghe A, Alhussein M, Li H, Wonfor A, Penty R. Experimental demonstration of practical high-speed Gaussian coherent state continuous variable quantum key distribution with real-time parameter monitoring and key distillation. *SPIE Photonex* (Birmingham, 2022). 2023, V. 12335.

Бурлаков Евгений Владимирович

к.ф.-м.н.

Московский технический университет связи и информатики

8А, ул. Авиамоторная, Москва 111024, Россия

E-mail: e.v.burlakov@mtuci.ru

Коробов Александр Владимирович

аспирант

Московский технический университет связи и информатики

8А, ул. Авиамоторная, Москва 111024, Россия

E-mail: a.v.korobov@mtuci.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.267

Об одном подходе к групповой навигации необитаемых подводных аппаратов

¹Щербатюк А.Ф., ²Матвиенко Ю.В., ³Кузькин В.М., ⁴Переселков С.А., ⁵Грачев В.И.

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, <http://www.iacp.dvo.ru/>

Владивосток 690041, Российская Федерация

²Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН, <http://www.febras.ru/>

Владивосток 690950, Российская Федерация

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Москва 119991, Российская Федерация

⁴Воронежский государственный университет, <https://www.vsu.ru/>

Воронеж 394006, Российская Федерация

⁵Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: alex-scherba@yandex.ru, ymat33@yandex.ru, pereselkov@yandex.ru, grachet@cplire.ru

Поступила 07.02.2024, рецензирована 14.02.2024, принята 21.02.2024, опубликована 25.04.2024

Аннотация: Изложен один из методов навигационного обеспечения группы автономных необитаемых подводных аппаратов, выполняющих общую миссию в мелководной акватории, в состав которой входит подводный аппарат лидер с высокоточными средствами навигации. Работа всех аппаратов синхронизирована и предполагает информационное взаимодействие между ними. Определение координат каждого аппарата строится на основе измерения дальностей между ними и аппаратом лидером. Рассмотрен алгоритм оценивания местоположения отдельных аппаратов. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность и требуемую точность рассмотренного алгоритма.

Ключевые слова: навигационное обеспечение, подводный аппарат, численное моделирование, фильтр частиц

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: Щербатюк А.Ф., Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Переселков С.А., Грачев В.И. Об одном подходе к групповой навигации необитаемых подводных аппаратов. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(2):267-274. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.267.

One approach for group navigation of unmanned underwater vehicles

Alexander F. Scherbatyuk

Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, <http://www.iacp.dvo.ru/>

Vladivostok 690041, Russian Federation

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

Yury V. Matvienko

M.D. Ageev Institute of Problems of Marine Technology of the FEB RAS, <http://www.febras.ru/>

Vladivostok 690950, Russian Federation

E-mail: ymat33@yandex.ru

Venedikt M. Kuz'kinProkhorov General Physics Institute of RAS, <http://gpi.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

*E-mail: kumiov@yandex.ru***Sergey A. Pereselkov**Voronezh State University, <https://www.vsu.ru/>

Voronezh 394006, Russian Federation

*E-mail: pereselkov@yandex.ru***Vladimir I. Grachev**Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

*E-mail: grachev@cplire.ru**Received Februar 07, 2024, peer-reviewed Februar 14, 2024, accepted Februar 21, 2024, published April 25, 2024*

Abstract: A method for the group navigation support of autonomous underwater vehicles performing a common mission in shallow waters, which includes a leader underwater vehicle with high-precision navigation tools, is described. The operation of all devices is synchronized and involves information interaction between them. The determination for coordinates of the vehicles is based on measuring the distances between them and the leader device. An algorithm for estimating the location of individual devices is considered. The results of numerical modeling are presented, confirming the operability and required accuracy of the considered algorithm.

Keywords: navigation software, underwater vehicle, numerical simulation, particle filter

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: Alexander F. Scherbatyuk, Yury V. Matvienko, Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev. One approach for group navigation of unmanned underwater vehicles. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):267-274e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.267.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (268)
 2. АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ ГРУППЫ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ (269)
 - 2.1. ОЦЕНКА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АППАРАТОВ ГРУППЫ (269)
 - 2.2. ФИЛЬТРЫ ЧАСТИЦ КАК ОСНОВА АЛГОРИТМА (270)
 - 2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ (271)
 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (273)
- ЛИТЕРАТУРА (274)

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для выполнения задач, связанных с подводными миссиями, большое значение придается

использованию групп автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Ценность информации, получаемой группой АНПА, существенно зависит от точности их навигационной привязки. Подходы, традиционно используемые для навигации единичного АНПА, не обеспечивают оперативной навигации для группы АНПА. Состояние вопроса о подходах, предназначенных для решения задач навигации групп АНПА, изложено в обзоре [1]. В статье описан один из приоритетных путей навигационного обеспечения группы специализированных подводных аппаратов (СПА), основанный на наличии в ней одного АНПА-лидера с

высокоточными средствами навигации для определения местоположения, угловой ориентации, скорости и глубины.

2. АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ ГРУППЫ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ

Предполагается, что АНПА и все СПА имеют синхронизированные часы, оборудованы гидроакустическими модемами и синхронно обмениваются друг с другом навигационными пакетами, содержащими метку времени излучения пакета, оценку координат подводного аппарата в момент излучения пакета, а также параметры движения АНПА. Бортовой комплекс навигационно-пилотажных датчиков каждого СПА включает недорогие датчики углового положения (датчики курса, крена и дифферента), давления для измерения глубины и оценки скорости движения относительно толщ воды. При проведении работ СПА стартуют от поверхности моря из точек с координатами, определенными посредством спутниковой навигационной системы.

Для определения координат СПА на борту АНПА путем измерения гидроакустической системой связи задержек распространения звукового сигнала между СПА и АНПА формируется информация о дальностях D_{lk} и взаимных дальностях между СПА $D_{ljk}, l, j = \overline{1, L}$, где L – число СПА, k – номер текущего шага работы навигационной системы. Соотношения, связывающие дальности и координаты АНПА (x_{Ak}, y_{Ak}, z_{Ak}) и СПА (x_{lk}, y_{lk}, z_{lk}) , имеют вид:

$$D_{lk}^2 = (x_{Ak} - x_{lk})^2 + (y_{Ak} - y_{lk})^2 + (z_{Ak} - z_{lk})^2, \quad (1)$$

$$D_{ljk}^2 = (x_{jk} - x_{lk})^2 + (y_{jk} - y_{lk})^2 + (z_{jk} - z_{lk})^2. \quad (2)$$

Для измерения дальностей в рамках одного такта работы навигационной системы все аппараты группы поочередно излучают сигнал и принимают отклики от остальных аппаратов. Обозначим через Δ временной интервал между излучениями отдельных аппаратов, тогда один такт работы занимает время $T = (L + 1)\Delta$. Пусть, например, группа локализована в районе

диаметром 600 м и включает $L = 4$ СПА. Тогда временной интервал Δ равен 0.8 с (с учетом скорости распространения звукового сигнала в воде около 1500 м/с и распространения звукового сигнала от источника к приемнику и обратно). Один такт работы описываемой навигационной системой, составляет $T = 4$ с.

2.1. Оценка местоположения аппаратов группы

Оценивание местоположения отдельных СПА на k -м шаге работы навигационного алгоритма выполняется на борту АНПА на основе решения системы уравнений (1), (2) относительно неизвестных (x_{lk}, y_{lk}, z_{lk}) с учетом ограничения

$$(x_{l(k-1)}, y_{l(k-1)}, z_{l(k-1)}) \in R_{l(k-1)}, \quad (3)$$

где $R_{l(k-1)}$ – область неопределенности местоположения l -го СПА, сформированная на $(k - 1)$ -м шаге навигационного алгоритма. Она представляет собой область с центром в точке $(\hat{x}_{l(k-1)}, \hat{y}_{l(k-1)}, \hat{z}_{l(k-1)})$, рассчитанной на основе ковариационной матрицы ошибок $Q_{l(k-1)}$. Соотношение (3) связывает фактические координаты СПА $(x_{l(k-1)}, y_{l(k-1)}, z_{l(k-1)})$ с измеренными оценками координат $(\hat{x}_{l(k-1)}, \hat{y}_{l(k-1)}, \hat{z}_{l(k-1)})$, и ковариационной матрицей ошибок $Q_{l(k-1)}$, определенными на $(k - 1)$ -м шаге навигационного алгоритма.

Учитывая, что глубина всех подводных аппаратов измеряется с требуемой точностью, для простоты ограничимся рассмотрением движения АНПА и СПА в горизонтальной плоскости на одинаковой глубине. В начальный момент времени все СПА находятся на поверхности и их координаты определяются с помощью спутниковой навигационной системы с известной ошибкой σ_1 . Фактические координаты l -го СПА $(x_l(t), y_l(t))$ связаны с фактическими значениями модуля скорости $u_l(t)$ и курса $\varphi_l(t)$ кинематическими уравнениями

$$x'_l(t) = u_{lx}(t), \quad y'_l(t) = u_{ly}(t), \quad (4)$$

$$u_{lx}(t) = u_l(t) \cos \varphi_l(t), \quad u_{ly}(t) = u_l(t) \sin \varphi_l(t). \quad (5)$$

Измеренные и фактические значения параметров СПА связаны соотношениями

$$u_{ix}(t) = (\hat{u}_l(t) - \xi_u) \cos(\hat{\phi}_l(t) - \xi_\varphi) + w_x(t), \quad (6)$$

$$u_{iy}(t) = (\hat{u}_l(t) - \xi_u) \sin(\hat{\phi}_l(t) - \xi_\varphi) + w_y(t), \quad (7)$$

$$w^2(t) = w_x^2(t) + w_y^2(t). \quad (8)$$

где $\hat{u}_l(t)$ и $\hat{\phi}_l(t)$ измерения скорости и курса СПА; ξ_u и ξ_φ – случайные ошибки измерения относительной скорости и курса СПА; $w(t)$ – скорость течения в районе работ.

Задача заключается в получении оценок местоположения каждого СПА при условии, что измерения дальностей в уравнениях (1), (2) содержат систематические и случайные ошибки, связанные с неточными знаниями скорости распространения звукового сигнала в воде (\bar{c}, ξ_c) и времени прихода сигнала ($\bar{\tau}_l, \xi_\tau$) Фактические и измеренные значения дальностей равны

$$D_l = c\tau_l, \quad \hat{D}_l = \hat{\tau}_l \hat{c}, \quad (9)$$

где $\tau_l = \hat{\tau}_l - \bar{\tau}_l - \xi_\tau$, $c = \hat{c} - \bar{c} - \xi_c$. В промежутках времени между тактами работы гидроакустической системы связи, когда осуществляется формирование текущих навигационных сигналов, выполняется счисление координат СПА. Перемещение СПА рассчитывается на основе данных о его скорости и курсе, передаваемых им на каждом такте работы в АНПА. Примем, что углы дифферента и крена малы и их погрешностями можно пренебречь. Для определения перемещений группы подводных аппаратов используется система координат, в которой оси OX , OY и OZ направлены соответственно на север, восток и вертикально вниз.

Проиллюстрируем сказанное на одном такте работы навигационной системы для случая с четырьмя СПА, который включает пять циклов опроса. Так как излучения сигналов разными подводными аппаратами выполняются с интервалом Δ , то уравнения, связывающие дальности и координаты подводных аппаратов при излучении АНПА и отдельными СПА, имеют вид

$$D_{lk}^2 = (x_{Ak} - x_{lk0\Delta})^2 + (y_{Ak} - y_{lk0\Delta})^2 \quad (10)$$

– для излучения АНПА,

$$D_{ijk}^2 = (x_{jkl\Delta} - x_{ikl\Delta})^2 + (y_{jkl\Delta} - y_{ikl\Delta})^2 \quad (11)$$

– для излучения l -го СПА, $l = \overline{1,4}$. Здесь нижние индексы 0Δ и $l\Delta$ обозначают моменты времени $(k-1)T + \Delta$ и $(k-1)T + (l+1)\Delta$. В (10), (11) предполагается, что перемещения подводных аппаратов в рамках цикла опроса от момента излучения до момента приема сигнала незначительны и ими можно пренебречь.

В первом цикле k -го такта работы опрос выполняет АНПА. К моменту его окончания АНПА получает от всех СПА отклики с временными задержками τ_{lk} , по которым рассчитываются дальности от АНПА до СПА $-D_{lk} = c\tau_{lk}$, которые связаны с координатами АНПА и СПА соотношениями (1), (2). Далее опрос выполняют поочередно СПА, при этом они за время каждого цикла Δ перемещаются. В результате получаем соотношения, связывающие координаты СПА в момент опроса с дальностями

$$D_{ijk}^2 = \left[(x_{jk} - x_{ik}) + l\Delta(u_{jk} \cos \varphi_{jk} - u_{ik} \cos \varphi_{ik}) \right]^2 + \left[(y_{jk} - y_{ik}) + l\Delta(u_{jk} \sin \varphi_{jk} - u_{ik} \sin \varphi_{ik}) \right]^2, \quad (12)$$

где $l, j = \overline{1,4}$, $l \neq j$. Таким образом, согласно (1), (2) и (12), имеется 16 квадратных уравнений с 8 неизвестными (x_{lk}, y_{lk}) которые линейризуются относительно неизвестных. Кроме того, имеются ограничения на допустимую область решений (3).

2.2. Фильтры частиц как основа алгоритма

Предположим, что случайные погрешности всех измерений являются независимыми, с известными плотностями распределения, не обязательно гауссовскими. В последнее время для оценивания местоположения мобильных объектов, в том числе и АНПА, все шире используются варианты фильтра частиц [2]. Алгоритм на его основе работоспособен в нелинейных и негауссовских средах. Рассмотрим использование фильтра частиц для оценивания местоположения l -го СПА. В начале работы координаты точки старта СПА совпадают с координатами (x_{l1}, y_{l1}) , полученными с помощью спутниковой навигационной системой и центр облака частиц располагается в указанной точке.

Предположим, что для оценки местоположения СПА используется I частиц и в начальный момент времени частицы распределены равномерно в круговой области радиуса σ_1 , а вес всех частиц p_i одинаков и равен $1/I$. Вес частицы определяет вероятность того, что координаты данной частицы совпадают с координатами СПА.

Такт работы алгоритма оценивания на основе фильтра частиц включает два этапа – предсказание (экстраполяция) и коррекция координат. На этапе экстраполяции выполняется расчет вектора состояния $(\hat{x}_{lk}, \hat{y}_{lk})$. Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки $(\hat{x}_{l(k-1)}, \hat{y}_{l(k-1)})$. Предсказанные местоположения подводных аппаратов в начале текущего такта в момент времени $t = Tk$ формируются с учетом перемещения за время такта. Для ситуации, когда в течение такта скорость и курс СПА u_l и φ_l постоянные, получаем

$$\hat{x}_{lk} = \hat{x}_{l(k-1)} + T\hat{u}_l \cos \hat{\varphi}_l, \quad \hat{y}_{lk} = \hat{y}_{l(k-1)} + T\hat{u}_l \sin \hat{\varphi}_l. \quad (13)$$

На этапе предсказания область неопределенности R_{lk} местоположения l -го СПА на k -м шаге работы навигационного алгоритма формируется с учетом $R_{l(k-1)}$, полученной на $(k-1)$ -м шаге и возможного перемещения СПА на k -м шаге за время T .

На этапе коррекции, после измерения на k -м шаге работы гидроакустической системой связи времени прихода сигналов, выполняется расчет координат частиц на основе решения уравнений (1), (2) и (12). Далее выполняется коррекция весов частиц [2]. Рассчитываются приращения весов частиц Δp_{lki} , учитывающие степень несоответствия координат частиц полученным измерениям дальностей до них. Новые полученные веса частиц p_{lki} нормализуются в соответствии с условием $\sum p_{lki} = 1$. После этого, по мере необходимости, выполняется регенерация частиц. Только небольшое число частиц будет иметь веса, отличные от нуля. Большинство частиц вырождаются, их веса уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми. Частицы, имеющие малые веса, удаляются, и вместо них создаются новые частицы, которые распределяются в некоторой области вокруг

оставшихся частиц пропорционально их весам. Затем веса всех частиц из вновь сформированного облака нормализуются.

Оценка местоположения l -го СПА на k -м такте формируется либо на основе координат частицы с максимальным весом, превышающим заданный порог, либо посредством вычисления среднего значения координат всех частиц (x_{jlk}, y_{jlk})

$$\hat{x}_{lk} = \sum_{i=1}^I x_{lki} p_{lki}, \quad \hat{y}_{lk} = \sum_{i=1}^I y_{lki} p_{lki}. \quad (14)$$

Для оценки точности полученного решения на k -м шаге работы алгоритма применяется ковариационная матрица ошибок Q_k , которая для облака частиц $X_{lki} = (x_{lki}, y_{lki})$ равна

$$Q_k = \sum_{i=1}^I p_{lki} (X_{lki} - \hat{X}_{lk})(X_{lki} - \hat{X}_{lk})^T. \quad (15)$$

Она характеризует степень разброса облака частиц относительно полученной оценки местоположения подводного аппарата. Область R_{lk} формируется на этапе коррекции на основе $R_{l(k-1)}$ с использованием ковариационной матрицы Q_k .

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ

Оценка точности и работоспособности навигационного алгоритма определения местоположения СПА выполнена в рамках численного моделирования с применением фильтра частиц (ФЧ). Модельные эксперименты выполнены в среде IDLE (Python 3.12 64-bit). Рассмотрена ситуация, когда в состав группы входят АНПА лидер и четыре СПА. Период ГАНС составлял 1 сек, число циклов ГАНС в рамках одного такта излучения всеми АНПА – 5. Скорость распространения звукового сигнала 1500 м/с.

При реализации работы ФЧ использовалось 1000 частиц, которые при инициализации равномерно распределялись в области неопределенности. На этапе коррекции в каждом такте определялись частицы, в сумме доставляющие вероятность 0.90, рассчитывалась занимаемая ими прямоугольная область и в нее случайным образом с равномерным распределением добавлялись

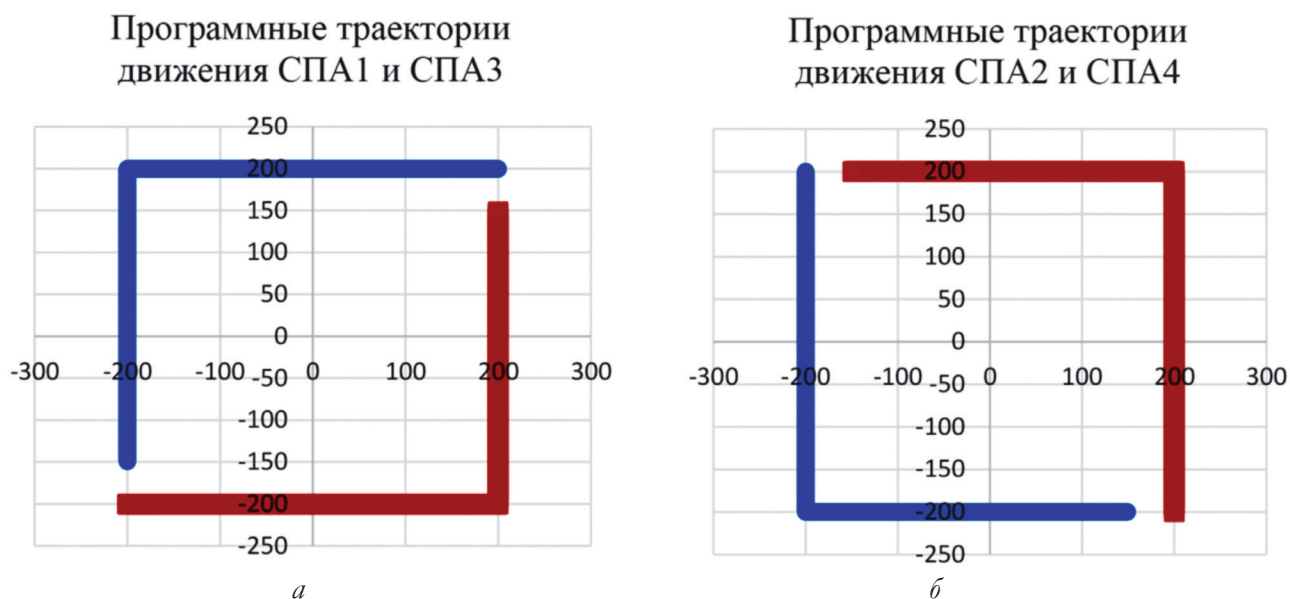


Рис. 1. Программные траектории движения СПА1-4 в течении 150 тактов работы системы.

недостающие частицы. При расчете невязок по дальностям данные от АНПА учитывались с большим коэффициентом по сравнению с СПА так как местоположение АНПА определялось с более высокой точностью по сравнению с СПА.

Полагалось, что АНПА расположен в начале системы координат и неподвижен. Начальное местоположение, скорость и курс СПА 1 (-200 м, -200 м, 1.0 м/с, 0.0 град.), СПА 2 (200 м, -200 м, 1.0 м/с, 90.0 град.), СПА 3 (200 м, 200 м, 1.0 м/с, 180.0 град.), СПА 4 (-200 м, 200 м, 1.0 м/с, 270.0 град.).

В процессе моделирования выполнялось оценивание местоположения СПА 4 на основе данных бортовой системы счисления пути и взаимных измерений дальностей на основе ГАНС между АНПА и СПА 1-4. Области неопределенности местоположения СПА1, СПА2 и СПА3 представляли собой окружности с диаметром 15 метров относительно текущего программного значения каждого СПА в процессе всего эксперимента. Случайная ошибка определения скорости СПА1-4 лежала в диапазоне (0, 0.1) м/с, случайная ошибка определения курса СПА1-4 находилась в интервале (0, 1.0) град. Ошибка скорости распространения звукового сигнала в воде была принята равной 15 м/с.

На Рис. 1 приведены программные траектории СПА1-4 (движение против часовой стрелки) в течении 150 тактов работы системы, которые используются при патрулировании границы заданного района. Дальности между программными положениями АНПА и СПА1-4 в течении 150 тактов работы системы показаны на Рис. 2. Ошибка оценивания местоположения СПА1-3 (ряд 1-3) в течении 150 тактов работы системы изображены на Рис. 3.

Моделирование выполнялось методом Монте-Карло, при этом каждый эксперимент выполнялся в цикле по 100 раз с разными случайными ошибками и на основе полученных результатов рассчитывались

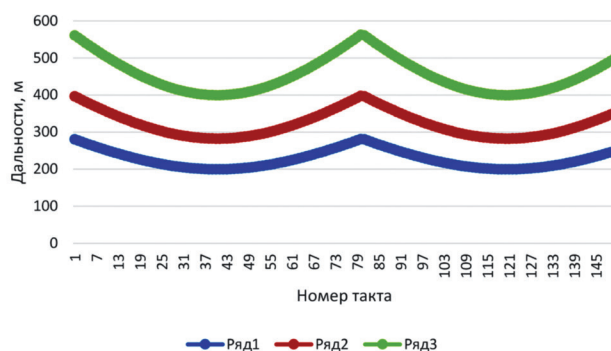


Рис. 2. Дальности между программными положениями АНПА и СПА1-4 (ряд 1), соседними СПА (ряд 2) и не соседними СПА (ряд 3) в течении 150 тактов работы системы.

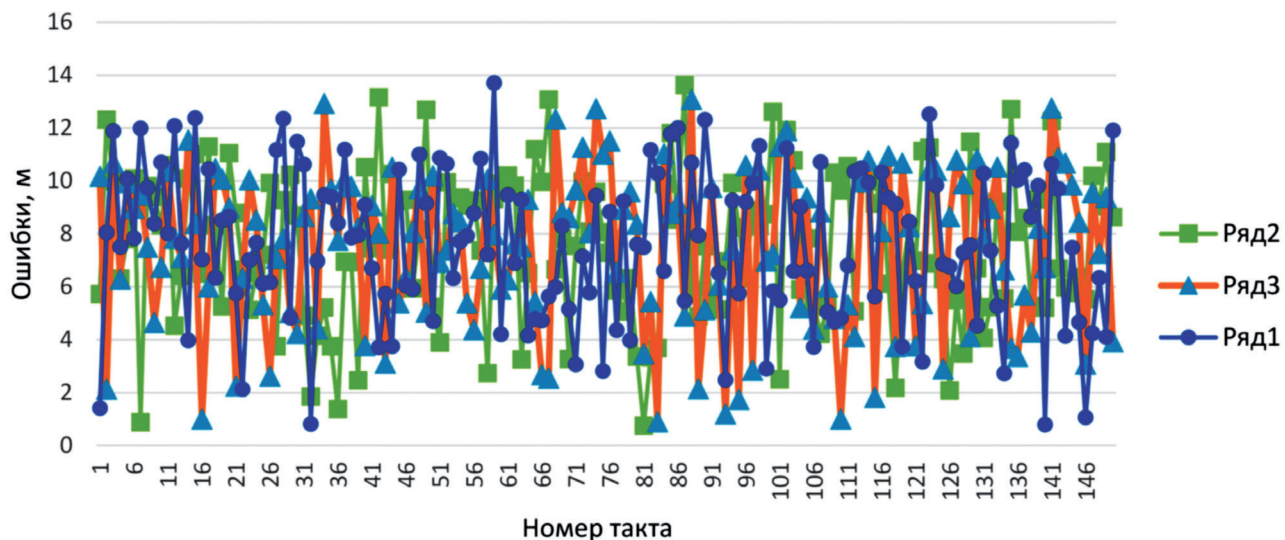


Рис. 3. Ошибка оценивания местоположения СПА1-3 (ряд 1-3) в течении 150 тактов работы системы.

среднее значение и дисперсия. В указанном эксперименте среднее значение ошибки определения местоположения СПА 4 составило 5.15 м, среднее квадратическое отклонение – 2.73 м, среднее значение ошибки определения скорости составило 0.011 м/с и ее среднее квадратическое отклонение – 0.014 м/с.

На Рис. 4 изображена траектории движения СПА4 с отмеченными точками его местоположения в течении 150 тактов работы

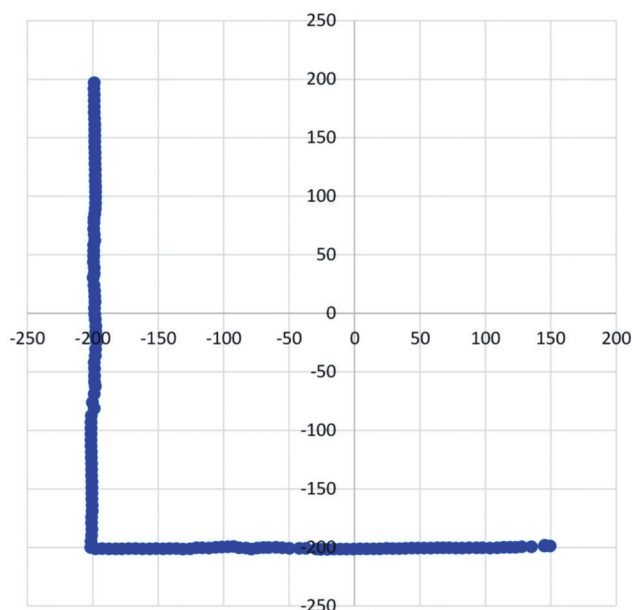


Рис. 4. Оценка траектории движения СПА4 в течении 150 тактов работы системы.

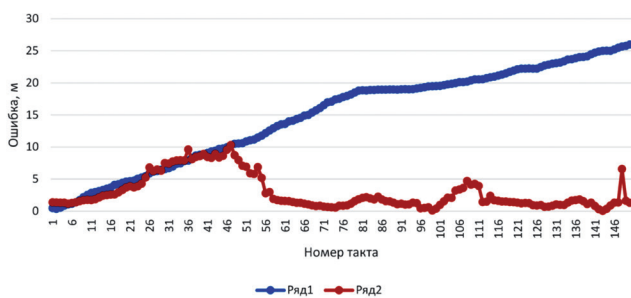


Рис. 5. Ошибка оценивания положения СПА4 с коррекцией (ряд 2) и без нее (ряд 1) в течении 150 тактов работы системы.

системы, которая была получена в одном из экспериментов. Пройденный путь составил около 750 метров и время в пути – около 12.5 минут. Ошибки оценивания траектории движения СПА4 в течении 150 тактов работы системы с коррекцией и без нее показаны на Рис. 5. Из приведенных графиков следует, что ошибка определения местоположения СПА4 без коррекции за указанное время движения составляет около 30 метров, а с коррекцией не превышает 10 метров.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен алгоритм навигационного обеспечения группы специализированных подводных аппаратов, основанный на наличии в ней одного лидера группы автономных необитаемых подводных аппаратов с высокоточными навигационными

средствами определения местоположения, угловой ориентации, скорости и глубины. Для позиционирования, навигации и отслеживания местоположения подвижных объектов использовался вариант фильтра частиц. Представлены результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность и требуемую точность рассматриваемого алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваулин ЮВ, Дубровин ФС, Щербатюк ДА, Щербатюк АФ. О методах обеспечения навигации группы АНПА: краткий обзор. *Подводные исследования и робототехника*, 2019, 4(30):27-36; doi: 10.25808/24094609.2019.30.4.004.
2. Gustafsson F, Bergman N, Forssell U, Jansson J, Karlsson R, Nordlund P-J. Particle filters for positioning, navigation and tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(2):425–437; doi: 10.1109/78.978396.

Щербатюк Александр Федорович

д.т.н., член-корреспондент РАН

Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН

5а, ул. Радио, Владивосток 690041, Россия

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

Матвиенко Юрий Викторович

д.т.н.

Институт проблем морских технологий им.
акад. М.Д. Агеева ДВО РАН

5а, ул. Суханова, Владивосток 690950, Россия

E-mail: yumat33@yandex.ru

Кузькин Венедикт Михайлович

д.ф.-м.н.

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

38, ул. Вавилова, Москва, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

Переселков Сергей Алексеевич

д.ф.-м.н.

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394006, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

Грачев Владимир Иванович

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия

E-mail: grachev@cplire.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.275

Акустический пограничный слой твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности

¹Легуша Ф.Ф., ²Кузькин В.М., ³Разрезова К.В., ⁴Переселков С.А.

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, <https://www.smtu.ru/>
Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>
Москва 119991, Российская Федерация

³Звукоизоляционные Европейские Технологии, <https://soundguard.ru/>
Санкт-Петербург 195027, Российская Федерация

⁴Воронежский государственный университет, <https://www.vsu.ru/>
Воронеж 394006, Российская Федерация

E-mail: legusha@smtu.ru, kumion@yandex.ru, kv_neveselova@mail.ru, pereselkov@yandex.ru

Поступила 16.03.2024, рецензирована 19.03.2024, принята 20.03.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: В работе представлены результаты анализа теоретических описаний формирования акустического пограничного слоя вблизи твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности, полученных Г. Кирхгофом и Л.Д. Ландау. В обоих случаях акустический пограничный слой формируют неоднородные вязкие и тепловые волны в пристеночном слое жидкой среды, контактирующей с поверхностью твёрдого тела, от которой отражается плоская бегущая звуковая волна. На основании анализа можно сделать выводы: анализируемые решения задач являются физически обоснованными, независимыми и дополняющими друг друга. При формировании акустического пограничного слоя вязкие и тепловые волны возбуждаются синхронно парами. Внутри акустического пограничного слоя каждая пара неоднородных волн распространяется навстречу друг другу. Неоднородные волны зарождаются на параллельных поверхностях, ограничивающих объём акустического пограничного слоя. Проведён анализ процесса трансформации тепловых волн в дополнительные одномерные неоднородные волны, появление которых в пограничном слое предсказано Г. Кирхгофом. Показано, что при взаимодействии с поверхностью тела бегущей звуковой волны в звуковом диапазоне частот эти волны не влияют на процесс формирования пограничного слоя. Уточнены выражения, позволяющие провести численную оценку плотности мощности тепловыделения в пограничном слое. Получена формула, позволяющая определить долю энергии звуковой волны, которая поглощается в акустическом пограничном слое. На практике полученные в статье результаты могут быть использованы, например, в аэроакустике для оценки диссипативных свойств поверхностей твёрдых тел.

Ключевые слова: звуковая волна, поверхность твёрдого абсолютно теплопроводного тела, вязкая волна, тепловая волна, акустический пограничный слой, диссипация энергии

УДК 534.21

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.

Для цитирования: Легуша Ф.Ф., Кузькин В.М., Разрезова К.В., Переселков С.А. Акустический пограничный слой твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(2):275-290. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.275.

Acoustic boundary layer of a solid absolutely thermally conductive surface

Fedor F. Legusha

St. Petersburg State Marine Technical University, <https://www.smtu.ru/>

St. Petersburg 190121, Russian Federation

E-mail: legusha@smtu.ru

Venedikt M. Kuz'kin

A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, <http://www.gpi.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: kumiov@yandex.ru

Kseniya V. Razrezova

Soundproof European Technologies, <https://soundguard.ru/>

St. Petersburg 195027, Russian Federation

E-mail: kv_neveselova@mail.ru

Sergey A. Pereselkov

Voronezh State University, <https://www.vsu.ru/>

Voronezh 394006, Russian Federation

E-mail: pereselkov@yandex.ru

Received March 16, 2024, peer-reviewed March 19, 2024, accepted March 20, 2024, published April 25, 2024

Abstract: The paper presents the analysis results of formation theoretical descriptions of an acoustic boundary layer near solid absolutely thermally conductive surface, obtained by G. Kirchhoff and L.D. Landau. In both cases, the acoustic boundary layer is formed by inhomogeneous viscous and thermal waves in the wall layer of a liquid medium in contact with the surface of a solid body, from which a plane traveling sound wave is reflected. Based on the analysis, conclusions can be drawn: the analyzed problem solutions are physically sound, independent and complementary to each other. During the formation of an acoustic boundary layer, viscous and thermal waves are excited synchronously in pairs. Inside the acoustic boundary layer, each pair of inhomogeneous waves propagates towards each other. Inhomogeneous waves originate on parallel surfaces that limit the volume of the acoustic boundary layer. The analysis of the process of transformation of heat waves into additional one-dimensional inhomogeneous waves, the appearance of which in the boundary layer was predicted by G. Kirchhoff. It is shown that when interacting with the surface of the body of a traveling sound wave in the sound frequency range, these waves do not affect the formation of the boundary layer. The expressions allowing for a numerical estimation of the heat dissipation power density in the boundary layer are refined. A formula has been obtained that allows us to determine the proportion of the energy of the sound wave that is absorbed in the acoustic boundary layer. In practice, the results obtained in the article can be used, for example, in aeroacoustics to assess the dissipative properties of solid surfaces.

Keywords: sound wave, surface of a solid absolutely thermally conductive body, viscous wave, heat wave, acoustic boundary layer, energy dissipation

UDC 534.21

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.

For citation: Fedor F. Legusha, Venedikt M. Kuz'kin, Kseniya V. Razrezova, Sergey A. Pereselkov. Acoustic boundary layer of a solid absolutely thermally conductive surface. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):275-290e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.275.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (277)
 2. НЕОДНОРОДНЫЕ ВОЛНЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ АКУСТИЧЕСКИЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ (279)
 3. СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНЫХ ВЯЗКИХ И ТЕПЛОВЫХ ВОЛН (280)
 4. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТВЁРДОЙ АБСОЛЮТНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (282)
 5. СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ (284)
 6. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ В НЕОДНОРОДНУЮ ВОЛНУ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ (285)
 7. ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ (286)
 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (288)
- ЛИТЕРАТУРА (289)

1. ВВЕДЕНИЕ

Основы теории акустического пограничного слоя (АПС) были разработаны Г. Кирхгофом. В 1868 году он опубликовал статью [1], в которой впервые была рассмотрена задача о взаимодействии звуковой волны, распространяющейся в газе, с плоской бесконечной поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела. При этом было показано, что АПС формируется в слое жидкой среды, находящейся вблизи поверхности твёрдого тела. Основу АПС составляют неоднородные вязкие и тепловые волны, которые возбуждаются при взаимодействии звуковой волны с поверхностью твёрдого тела.

Дальнейшее развитие теории АПС получила в работе Б.П. Константинова, в которой представлена методика расчёта акустического поля, которое формируется в жидкой среде в результате отражения бегущей звуковой волны от бесконечной плоской поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела. В статье [2] показано, что в результате возбуждения АПС, коэффициент отражения звуковой волны по давлению становится комплексной величиной, зависящей от частоты звуковой волны, а также появляется разность фаз между падающей и отражённой звуковыми волнами. При любых углах падения звуковой волны происходит диссипация энергии волны, обусловленная процессами затухания вязких и тепловых волн в АПС. Б.П. Константинов также показал, что

за пределами АПС физические процессы, протекающие в нём, не влияют на процесс взаимодействия между собой падающей и отражённой от поверхности звуковых волн. Кроме того, формирующийся АПС не влияет на закон отражения звуковой волны от поверхности твёрдого тела.

В ходе исследований, представленных в работе [1], Г. Кирхгоф указывает на возможные области применения разработанной им теории в акустике. Например, он решил задачу о распространении и затухании бегущей звуковой волны с плоским фронтом в цилиндрической трубе с твёрдыми абсолютно теплопроводными стенками. Формула для расчёта частотной зависимости пространственного коэффициента затухания (ПКЗ) бегущей звуковой волны, полученная в ходе решения этой задачи, до сих пор используется в аэродинамике. Было также показано, что диссипация энергии в АПС у стенок узких труб достаточно велика и должна влиять на скорость распространения фронта звуковой волны, бегущей в трубе.

В декабре 1867 года А. Кундт опубликовал работу [3,4], в которой впервые экспериментально установил факт замедления скорости распространения фронта звуковой волны нулевого порядка. Исследования А. Кундт проводил на узких стеклянных трубах, имеющих различные диаметры. В результате исследований было показано, что скорость звука в воздухе, находящемся в трубе, меньше скорости звука в свободном воздушном пространстве и становится зависящей от частоты. При этом было установлено, что скорость звука тем меньше, чем меньше радиус трубы и чем ниже частота звуковой волны.

Экспериментальные данные, полученные А. Кундтом, были использованы Г. Кирхгофом для проверки разработанной им теории. Для этого он рассмотрел задачу о замедлении скорости движения фронта плоской звуковой волны, бегущей в цилиндрической трубе с твёрдыми абсолютно теплопроводными стенками. В результате этого исследования Г. Кирхгоф получил выражение для расчёта частотной зависимости скорости звука в цилиндрических трубах с твёрдыми абсолютно теплопроводными стенками.

Сопоставление результатов расчётов скоростей звука в воздухе, заполняющем трубы, выполненных с использованием формулы Г. Кирхгофа, с экспериментальными данными, полученными А. Кундтом, позволило установить следующее. Формула Г. Кирхгофа правильно предсказывает тенденцию изменения скорости звука в газе при изменениях частоты звуковой волны и радиуса трубы. Однако, во всём диапазоне частот теоретические значения скорости звука превышали результаты измерений. Причины расхождения результатов расчёта и измерений в статье [1] не установлены.

Выяснение причин такого расхождения результатов расчёта и экспериментальных данных требует проведения дополнительных исследований особенностей формирования АПС. Для этого было решено повторить эксперимент А. Кундта с использованием современной акустической аппаратуры. При подготовке к эксперименту было учтено следующее обстоятельство. В работах [5-7] было показано, что по условиям формирования АПС и диссипативным свойствам границы раздела сред газ-твёрдое тело, вещество которого имеет конечные значения теплофизических параметров, по акустическим характеристикам близка к границе газ-твёрдое абсолютно теплопроводное тело. На этом основании для проведения экспериментальных исследований можно использовать трубы, стенки которых изготовлены из любого существующего в природе вещества.

Для повторения эксперимента А. Кундта был изготовлен цилиндрический четвертьволновой резонатор, стенки которого выполнены из поливинилхлорида. Описание установки, условия эксперимента и его результаты представлены в работе [8]. Анализ результатов измерений позволяет сделать следующие выводы. Экспериментально подтверждается наличие частотной зависимости скорости распространения фронта нормальной звуковой волны нулевого порядка, распространяющейся в воздухе, заполняющего объём цилиндрической трубы. Формула Г. Кирхгофа для расчёта дисперсионной кривой верно предсказывает зависимость скорости звука от частоты. Разность между теоретическими и экспериментальными

значениями скорости звуков в трубе велика и возрастает по мере уменьшения частоты волны.

В исследованном диапазоне частот экспериментальные значения скорости звука также оказались меньше теоретических значений. Если предположить, что реальная диссипация энергии в АПС трубы, примерно в 2.5 раза больше диссипативных потерь, предсказываемых теорией Г. Кирхгофа, то теоретическая дисперсионная кривая смещается в область экспериментальных значений скорости звука и практически совпадает с экспериментальной дисперсионной кривой.

Полученный результат указывает на то, что в АПС твёрдой поверхности кроме диссипативного процесса, теоретическое описание которого сделал Г. Кирхгоф, должен существовать дополнительный диссипативный процесс, компенсирующий недостающее количество тепла, выделяющегося в АПС твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности. Такой процесс действительно существует. Его описание можно найти, например, в 6 томе курса Л.Д. Ландау [9], где с общих позиций гидродинамики решается задача формирования АПС в вязких и теплопроводных жидких средах, контактирующих с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела. При этом показано, что в рассматриваемом случае АПС также формируется за счёт возбуждения в пристеночном слое жидкости неоднородных вязких и тепловых волн.

Полученные в [9] уравнения движения вязких и тепловых волн отличаются от аналогичных уравнений неоднородных волн, используемых в теории Г. Кирхгофа [1]. В первую очередь неоднородные волны, описание которых находим в [9], имеют распределение амплитуд вдоль направления их распространения, отличающиеся от аналогичных распределений амплитуд неоднородных волн, описание которых проводится в статье [1]. Кроме того, согласно Л.Д. Ландау, неоднородные волны в его решении возбуждаются в плоскости, находящейся на расстоянии порядка толщины пограничного слоя от поверхности твёрдого тела, и распространяются вдоль нормали к поверхности тела. Неоднородные волны, описание которых приводит Г. Кирхгоф,

возбуждаются на поверхности твёрдого тела и распространяются вдоль нормали в жидкой среде от поверхности твёрдого тела.

Поля колебательных скоростей, взаимодействующих с поверхностями твёрдых абсолютно теплопроводных тел, в задачах Г. Кирхгофа и Л.Д. Ландау являются потенциальными физическими полями. На этом основании можно предположить, что обе задачи независимо друг от друга дают описание единого процесса формирования АПС. Следовательно, в процессе формирования АПС одновременно участвуют две вязкие и две тепловые волны. Учитывая эти обстоятельства необходимо исследовать влияние этой совокупности неоднородных волн на физические процессы, происходящие в АПС.

2. НЕОДНОРОДНЫЕ ВОЛНЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ АКУСТИЧЕСКИЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Рассмотрим совокупность неоднородных волн, участвующих в формировании АПС вблизи поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела. В статьях [1,2] показано, что в формировании АПС участвуют вязкая и тепловая волны, возбуждающиеся на поверхности физического контакта сред и распространяющиеся вглубь жидкой среды. В то же время в книге [9] находим решение задач в виде вязких и тепловых волн, зарождающихся в жидкой среде и двигающихся к поверхности твёрдого тела. Обе пары неоднородных волн существуют в жидкой среде независимо друг от друга и вносят свой вклад в формирование АПС. Для оценки физических свойств АПС, возникающего в пристеночном слое жидкой среды в результате возбуждения в ней всей совокупности неоднородных волн, рассмотрим уравнения движения этих волн. Вначале рассмотрим случай взаимодействия плоской бегущей звуковой волны с бесконечной плоской поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела, исследованный Л.Д. Ландау. Согласно решению задачи, представленного в книге [9], в результате такого взаимодействия в пристеночном слое жидкой среды возбуждается неоднородная вязкая волна:

$$u_{v11} = u_{0\eta11} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(1-i)x}{\delta} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$ – толщина пограничного слоя; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости; $u_{0\eta11} = 2u_m \sin \theta$ – амплитуда вязкой волны; u_m – амплитуда колебательной скорости звуковой волны, падающей на отражающую поверхность; θ – угол падения волны.

В уравнении (1) и далее везде гармонический множитель $\exp(i\omega t)$ для краткости записей опущен. Вязкая волна (1) возбуждается в плоскости $x = \Delta$, где Δ – эффективная толщина АПС (см. Рис. 1) и распространяется в отрицательном направлении оси $0x$ к поверхности твёрдого тела. Амплитуда вязкой волны $u_{0\eta11}$ равна амплитуде колебательной скорости в поле скоростей возбуждённого в жидкости за пределами АПС.

В книге [9] также находим решение задачи для случая, когда волна распространяется в теплопроводной среде. Результатом взаимодействия звуковой волны с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела является возбуждение в пристеночном слое жидкой среды неоднородной тепловой волны, уравнение движения которой имеет вид

$$T'_{h11} = T'_{m11} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(1-i)x}{\delta_T} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\delta_T = \sqrt{2a/\omega}$ – толщина теплового пограничного слоя; a – коэффициент температуропроводности жидкой среды; $T'_{m11} = 2T'_m$ – амплитуда тепловой волны; T'_m – амплитуда акустической добавки к температуре среды в бегущей звуковой

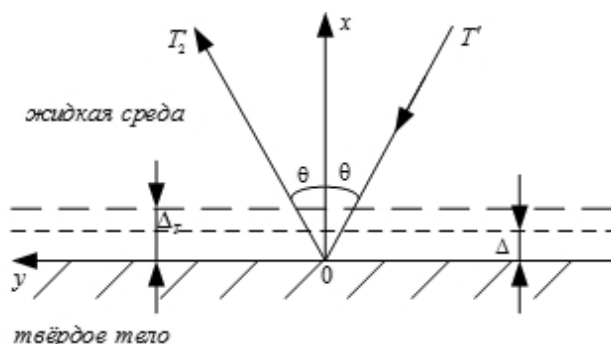


Рис. 1. Формирование акустического поля над плоской поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела.

волне, взаимодействующей с отражающей поверхностью.

Тепловая волна (2) возбуждается в плоскости $x = \Delta_T$, где Δ_T – эффективная толщина теплового пограничного слоя (см. Рис. 1) и распространяется вдоль оси $0x$ по направлению к отражающей поверхности ($x = 0$).

Отметим, что для получения выражения тангенциальной составляющей колебательной скорости, необходимого для вывода формулы (2), Л.Д. Ландау использовал распределение амплитуд вязкой волны (1) вдоль направления её распространения.

В результате решения задачи о взаимодействии звуковой волны, распространяющейся в вязкой и теплопроводной среде, с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела Г. Кирхгоф установил, что на поверхности тела возбуждаются неоднородные волны, уравнения движения которых имеют вид, отличающийся от уравнения движения волн (1) и (2). Согласно статьям [1,2], уравнение движения вязкой волны в этом случае имеет вид

$$u_{v12} = u_{0v12} \exp\left[\frac{-(1+i)x}{\delta}\right], \quad (3)$$

где $u_{0v12} = 2u_m \sin \theta$ – амплитуда вязкой волны.

В соответствии с решением Г. Кирхгофа на поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела возбуждается также и тепловая волна. Уравнение движения этой неоднородной волны имеет вид

$$T'_{h12} = T'_{m12} \exp\left[\frac{-(1+i)x}{\delta_T}\right], \quad (4)$$

где $T'_{m12} = T'_m$ – амплитуда тепловой волны.

Вязкая (3) и тепловая (4) волны зарождаются на поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела в плоскости $x = 0$. Фронты волн двигаются в положительном направлении оси $0x$. Волны полностью затухают соответственно на расстояниях $x = \Delta$ и $x = \Delta_T$ от поверхности $x = 0$ (см. Рис. 1).

3. СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНЫХ ВЯЗКИХ И ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

Физические характеристики АПС определяются параметрами неоднородных вязких и тепловых волн, принимающих участие в его

формировании. Для установления в дальнейшем причинно-следственных связей между физическими процессами, протекающими в АПС, рассмотрим основные характеристики вязких и тепловых волн. Выражения для расчёта параметров вязких и тепловых волн, которые приводятся ниже, в основном взяты из книги [9]. К ним добавлены формулы, позволяющие рассчитать параметры, характеризующие затухание во времени колебательных процессов в вязких и тепловых волнах.

Остановимся на параметрах вязких волн. Если из выражений (1) и (3) выделить реальные части, то получим уравнение распространения вязких волн в виде:

$$u_{v12} = u_{0v1} e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right), \quad (5)$$

где u_{0v1} амплитуда вязкой волны;

$$u_{v11} = u_{0v1} \left[1 - e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t + \frac{x}{\delta}\right)\right]. \quad (6)$$

Вязкие волны (5) и (6) относятся к классу одномерных неоднородных поперечных волн. Волновые векторы этих волн совпадают с направлением нормали к поверхности твёрдого тела, вблизи которой они возбуждены. В вязких волнах частицы жидкой среды совершают колебания в плоскости перпендикулярной волновому вектору. Волновые векторы волн (5) и (6) направлены навстречу друг к другу.

Вязкие волны имеют следующий набор физических параметров:

– фазовая скорость волны

$$c_v = \omega \delta = \sqrt{2\nu\omega}, \quad (7)$$

– длина волны

$$\lambda_v = 2\pi\delta; \quad (8)$$

– комплексное волновое число

$$\tilde{k}_v = (1+i)/\delta; \quad (9)$$

– волновое число

$$k_v = 1/\delta, \text{ м}^{-1}; \quad (10)$$

– пространственный коэффициент затухания

$$\alpha_v = 1/\delta, \text{ м}^{-1}; \quad (11)$$

– временной коэффициент затухания

$$\beta_v = \alpha_v c_v = \omega, \text{ с}^{-1}; \quad (12)$$

– постоянная времени волны

$$\tau_v = 1/\beta_v = 0/159T, \quad (13)$$

где T – период колебания звуковой волны.

Теперь рассмотрим физические параметры неоднородных тепловых волн. Если из выражений (2) и (4) выделить реальные части, то можно написать одномерные уравнения распространения тепловых волн:

$$T'_{h12} = T'_{m1} e^{-\frac{x}{\delta_T}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta_T}\right), \quad (14)$$

где T'_{m1} амплитуда тепловой волны;

$$T'_{h11} = T'_{m1} \left[1 - e^{-\frac{x}{\delta_T}} \cos\left(\omega t + \frac{x}{\delta_T}\right) \right]. \quad (15)$$

Тепловые волны (14) и (15) относятся к классу одномерных скалярных волн. Волновые векторы этих волн совпадают с направлением нормали к поверхности твёрдого тела, в АПС которой они возбуждаются, и направлены навстречу друг другу.

Свойства тепловой волны можно охарактеризовать следующими параметрами:

– фазовая скорость

$$c_T = \omega \delta_T = \sqrt{2\omega\alpha}; \quad (16)$$

– длина волны

$$\lambda_T = 2\pi\delta_T; \quad (17)$$

– комплексное волновое число

$$\tilde{k}_T = (1+i)/\delta_T; \quad (18)$$

– волновое число

$$k_T = 1/\delta_T, \text{ м}^{-1}; \quad (19)$$

– пространственный коэффициент затухания

$$\alpha_T = 1/\delta_T, \text{ м}^{-1}; \quad (20)$$

– временной коэффициент затухания

$$\beta_T = \alpha_T c_T = \omega, \text{ с}^{-1}; \quad (21)$$

– постоянная времени волны

$$\tau_T = 1/\beta_T = 0.159T, \quad (22)$$

где T – период колебания звуковой волны.

Если сопоставить варианты записи уравнений движения вязких волн (5) и (6) с записью аналогичных уравнений для тепловых волн (14) и (15), то нетрудно заметить, что формы записи этих выражений полностью совпадают. Это связано с тем обстоятельством, что эти уравнения движения являются решениями одномерных дифференциальных уравнений типа уравнения теплопроводности. С этим также связано то, что формулы для расчёта физических параметров этих волн имеют похожие формы записи.

Здесь необходимо отметить удивительное свойство вязких и тепловых волн. Согласно

формулам (12) и (21) затухание вязких и тепловых волн во времени в любых средах не зависит от физических параметров вещества этих сред и определяется только частотой ω звуковой волны, в результате взаимодействия которой с отражающей твёрдой поверхностью появились эти вязкие и тепловые волны.

Постоянные времени всех затухающих колебательных процессов в этих неоднородных волнах определяются формулами (13) и (22). Из этих выражений видно, что значения постоянных времени также не зависят от физических параметров вещества среды, в которой вязкие и тепловые волны возбуждены. Значения постоянных времени τ_v и τ_T малы. Это позволяет считать, что вязкие и тепловые волны возбуждаются и исчезают практически в реальном времени, следуя за изменением амплитуды внешнего акустического поля. На этом основании можно считать, что в момент включения поля акустической добавки к температуре среды вязкие волны (5) и (6), а также тепловые волны (14) и (15) возбуждаются практически мгновенно и синхронно.

Вязкие и тепловые волны существуют в жидкости за счёт энергии, отбираемой у акустического поля. Эти волны сильно затухают по мере распространения их в веществе. Например, если фронт вязкой волны (5) пройдёт расстояние $x = 0.5\lambda_v$, а фронт тепловой волны (14) расстояние $x = 0.5\lambda_T$, то амплитуды этих волн уменьшатся в $\exp(\pi) = 23.1$ раза и составляют 4.3% от первоначальной величины.

Таким образом, на расстояниях $x > \pi\delta$ вязкие волны (5) и на расстояниях $x > \pi\delta_T$ тепловые волны (14) полностью затухают и уже не влияют на параметры акустического поля за пределами АПС и на поверхности твёрдого тела. На этом основании параметр $\Delta = \pi\delta$ для вязких волн и параметр $\Delta_T = \pi\delta_T$ для тепловых волн выбраны в качестве характеристических размеров соответственно толщины вязкого и теплового пограничных слоёв.

Для поддержания непрерывных колебательных процессов в вязких и тепловых волнах происходит непрерывный отбор колебательной энергии внешнего акустического поля. Эта энергия неоднородными волнами необратимо превращается в тепло, обеспечивая

процесс диссипации энергии в АПС. При формировании АПС вблизи твёрдой и абсолютно теплопроводной поверхности амплитуды вязких волн (5) и (6), а также амплитуды тепловых волн (14) и (15) попарно равны друг другу. На этом основании можно предположить, что тепловыделение в АПС твёрдой абсолютно теплопроводной границы должно быть примерно в 2 раза больше по сравнению с количеством тепла, значение которого получаем, используя раздельно теорию Г. Кирхгофа и решение Л.Д. Ландау.

Заметим, что имеются отличия в последствиях возбуждения вязких и тепловых волн в АПС. Если вязкие волны просто затухают внутри АПС, то при возбуждении тепловых волн, кроме процесса их затухания, наблюдаются дополнительные физические эффекты. Прежде всего отметим, что за счёт трансформации тепловых волн в АПС дополнительно возникают неоднородные продольные волны. Возможность появления таких волн в АПС предсказана Г. Кирхгофом в статье [1]. Физические свойства волн трансформации до сих пор не изучены. По этой причине ниже проведено исследование условий их возбуждения и основных характеристик этих волн.

Кроме того, распространение тепловых волн в веществе всегда сопровождается излучением вторичных звуковых волн. В физике это явление называется термоакустическим эффектом. Термоакустический эффект хорошо изучен. Современное теоретическое описание термоакустического эффекта можно найти в книге [9]. На этом эффекте, например, работают электротермические источники звука – термофоны. Экспериментальные исследования акустических параметров термофонов, которые представлены, например, в статьях [10-13], подтверждают существование термоакустического эффекта и показывают возможность построения на этом эффекте широкополосных поршневых источников звука. Исследования последних лет позволили установить, что при определённых условиях эти источники могут служить приёмниками акустических сигналов [14, 15].

4. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТВЁРДОЙ АБСОЛЮТНО ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Задачу о формировании акустического поля при отражении плоской бегущей звуковой волны от бесконечной поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела решил Б.П. Константинов [2]. В ходе решения задачи Б.П. Константинов кроме звукового давления p и колебательной скорости u , учитывал наличие акустической добавки к температуре среды T' в бегущей звуковой волне.

Геометрия задачи показана на Рис. 1. Верхнее полупространство заполнено вязкой и теплопроводной жидкой средой. Звуковая волна падает под произвольным углом падения θ на бесконечную гладкую поверхность твёрдого абсолютно теплопроводного тела. Значения акустических параметров волны заданы. Отражающая поверхность совпадает с плоскостью $x = 0$. В исходном состоянии верхнее и нижнее полупространства неподвижны относительно введённой на Рис. 1 системы координат. Жидкая среда и твёрдое тело находятся в термодинамическом равновесии при статической температуре T_0 . Поверхность твёрдого тела непроницаема для жидкости.

Распространение плоской бегущей гармонической звуковой волны в виде акустической добавки к температуре среды описывается уравнением

$$T' = T'_m \exp[i(k_x x - k_y y)], \quad (23)$$

где T'_m – амплитуда акустической добавки к температуре среды; $k_x = k \cos \theta$; $k_y = k \sin \theta$ – проекции волнового вектора \mathbf{k} на соответствующие оси; $k = \omega / c$ – волновое число; c – скорость звука в жидкой среде; $\omega = 2\pi f$ – частота волны.

Согласно Г. Кирхгофу [1] амплитуда акустической добавки к температуре среды в бегущей звуковой волне рассчитывается при помощи выражения

$$T'_m = \frac{(\gamma - 1)}{\beta_v} \cdot \frac{u_m}{c}, \quad (24)$$

где u_m – амплитуда колебательной скорости, γ – нелинейный параметр среды, β_v – коэффициент теплового объёмного расширения среды.

Граничные условия, использованные Б.П. Константиновым для решения задачи имеют вид:

$$u_x = 0; \tag{25}$$

$$u_y = 0, \text{ by } x = 0; \tag{26}$$

$$T'_{11} = 0. \tag{27}$$

В уравнениях (25), (26) и (27) введены следующие обозначения: u_x – нормальная компонента колебательной скорости; u_y – касательная компонента колебательной скорости; T'_{11} – акустическая добавка к температуре жидкой среды в сформированном в ней акустическом поле.

Опираясь на решение задачи, представленное в работе Б.П. Константинова [2], рассмотрим особенности формирования акустического поля, возникающего над отражающей поверхностью твёрдого тела (плоскость $x = 0$, Рис. 1) при взаимодействии с ней бегущей звуковой волны (23). В качестве примера рассмотрим распределение амплитуды акустической добавки к температуре среды в этом поле. В общем случае поле акустической добавки к температуре жидкой среды имеет вид

$$T'_{11} = T'_{12} + T'_{h12}. \tag{28}$$

Компонентами скалярного уравнения (28) являются:

– акустическое поле в объёме жидкой среды

$$T'_{12} = T' + T'_2 = T'_m \left\{ \exp[i(k_x x - k_y y)] + R_p \exp[i(-k_x x - k_y y)] \right\} \tag{29}$$

где R_p – комплексный коэффициент отражения звуковой волны по давлению;

– тепловая волна (4), уравнение движения которой записано в виде

$$T'_{h12} = T'_{m12} e^{-k_T x} \cos(-k_T x - k_y y). \tag{30}$$

Если выражения (28) и (30) подставить в граничное условие (27), то для поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела при $x = 0$ получим уравнение

$$T'_m (1 + |R_p|) - T'_{m12} = 0.$$

В этом уравнении учтён тот факт, что тепловая волна, возбуждающаяся на поверхности тела, включена в противофазе по отношению к внешнему акустическому полю. Следовательно, амплитуда тепловой волны (30) может быть рассчитана по формуле

$$T'_{m12} = T'_m (1 + |R_p|). \tag{31}$$

Используя результаты расчётов, имеющихся в работах [2,5], можно установить, что для газов в звуковом диапазоне частот и углах падения θ от 0° до 75° разность $1 - |R_p| \leq 0.05$. Следовательно, можно положить, что $|R_p| = 1$. В этом случае $T'_{m12} = 2T'_m$, как это было принято в формулах (2) и (4).

В ультразвуковом диапазоне частот для расчёта амплитуды тепловых волн (2) и (4) нужно применять формулу (31), в которой для оценки величины $|R_p|$ в первом приближении можно использовать выражения для комплексных коэффициентов отражения звуковой волны, полученные в работах [2,5].

Если в уравнении (29) заменить амплитуду переменной температуры T'_m величиной $u_m \sin \theta$, где u_m – амплитуда колебательной скорости в звуковой волне, падающей на поверхность, то получим распределение тангенциальной составляющей вектора колебательной скорости и акустического поля

$$u_y = u_m \sin \theta \left\{ \exp[i(k_x x - k_y y)] + R_p \exp[i(-k_x x - k_y y)] \right\}. \tag{32}$$

Выражение (32) Б.П. Константинов [2] использовал для определения амплитуды вязкой волны (3), возбуждающейся на поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела. В результате расчёта получена формула

$$u_{0\eta} = u_m (1 + |R_p|). \tag{33}$$

Как и в случае тепловой волны (4), выражение (33) следует применять для расчёта амплитуды вязких волн (1) и (3) на высоких частотах.

Отметим, что уравнение (32) по форме записи совпадает с аналогичным распределением u_y , полученным в случае классического расчёта отражения звуковой волны от плоской бесконечной поверхности твёрдого тела [16]. Различие между рассматриваемыми случаями заключается в том, что в классическом случае величина коэффициента отражения R_p не зависит от частоты.

Скалярное уравнение (28) получено Г. Кирхгофом для описания тепловых процессов, происходящих внутри АПС при взаимодействии

звуковой волны с твёрдой абсолютно теплопроводной поверхностью. Тепловая волны (30), распространяющаяся в АПС, быстро затухает и за пределами АПС (при $x \geq \Delta_T$) не влияет на параметры акустического поля (29).

При углах падения звуковой волны $\theta > 0$ на отражающей поверхности возбуждается вязкая волна (3), которая также полностью затухает в АПС. За пределами АПС (при $x \geq \Delta_T$) вязкая волна (3) также не влияет на параметры акустического поля (29).

5. СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Рассмотрим структуру АПС, возникающего в пристеночном слое жидкой среды при взаимодействии бегущей звуковой волны с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела. В работе Г. Кирхгофа [1] показано, что распределение колебательных скоростей звукового поля внутри АПС можно описать следующим векторным уравнением

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_{v12} + \mathbf{u}_{t12}, \quad (34)$$

где \mathbf{u} – вектор полной колебательной скорости в АПС; \mathbf{u}_1 – вектор акустического поля, возникающего в результате взаимодействия прямой и отражённой звуковых волн; \mathbf{u}_{v12} – вектор вязкой волны; \mathbf{u}_{t12} – вектор неоднородной волны, появляющейся за счёт трансформации тепловой волны (30).

Уравнения (28) и (34) образуют полную систему уравнений АПС твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности. Эту систему уравнений совместно с граничными условиями (25), (26) и (27) использовал Б.П. Константинов для расчёта комплексного коэффициента отражения от поверхности абсолютно теплопроводной поверхности. Результаты расчётов представлены в работах [2,5]. Здесь нужно отметить, что при решении задачи Б.П. Константинов исключил из уравнения (34) вектор неоднородной волны \mathbf{u}_{t12} , которая появляется в АПС в результате трансформации тепловой волны (30). Основанием для исключения неоднородной волны \mathbf{u}_{t12} явилось предположение о малости её вклада в диссипативные процессы, протекающие в АПС.

Уравнения (28) и (34) получены Г. Кирхгофом [1] без учёта возбуждения в АПС

дополнительных вязкой волны (1) и тепловой волны (2), появление которых в АПС следует из решения Л.Д. Ландау [9]. Следовательно, система уравнений АПС твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности должна быть записана с учётом этих неоднородных волн. В результате учёта наличия в АПС тепловой волны (2) уравнение (28) принимает вид

$$T' = T'_{12} + T'_{h11} + T'_{h12}, \quad (35)$$

где T'_{h11} – тепловая волна (2).

Вязкая волна (1) должна быть введена в векторное уравнение (34), которое с учётом трансформации тепловой волны T'_{h11} окончательно можно записать так

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_{v11} + \mathbf{u}_{v12} + \mathbf{u}_{t11} + \mathbf{u}_{t12}, \quad (36)$$

где \mathbf{u}_{v11} – вектор вязкой волны (1); \mathbf{u}_{t11} – вектор неоднородной волны, возбуждающейся в АПС в результате трансформации тепловой волны (2).

Если не учитывать существование неоднородных волн трансформации \mathbf{u}_{t11} и \mathbf{u}_{t12} в АПС, то схематически набор основных неоднородных волн, возбуждающихся в АПС плоской поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела, может быть представлен в виде структурной схемы (Рис. 2). Схема, показанная на Рис. 2, отражает тот факт, что вязкие и тепловые волны в АПС рождаются парами и их волновые векторы направлены навстречу друг другу.

В случаях, когда влиянием неоднородных волн трансформации \mathbf{u}_{t11} и \mathbf{u}_{t12} пренебречь нельзя, волновые векторы этих волн должны быть также введены в структурную схему АПС. Однако, до сих пор этот вид неоднородных волн в должной мере не изучен.

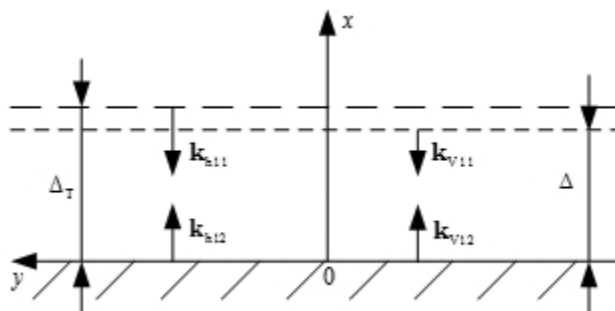


Рис. 2. Структурная схема АПС без учёта трансформации тепловых волн: \mathbf{k}_{h11} и \mathbf{k}_{h12} – волновые векторы тепловых волн; \mathbf{k}_{v11} и \mathbf{k}_{v12} – волновые векторы вязких волн.

6. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ В НЕОДНОРОДНУЮ ВОЛНУ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Как было показано Г. Кирхгофом [1], возбуждение в АПС тепловых волн должно сопровождаться появлением дополнительных неоднородных волн. Неоднородные волны \mathbf{u}_{t11} и \mathbf{u}_{t12} возникают в АПС за счёт трансформации тепловых волн T'_{h11} и T'_{h12} . Рассмотрим физические свойства этих волн на примере компоненты \mathbf{u}_{t12} . Согласно Г. Кирхгофу [1] составляющие вектора \mathbf{u}_{t12} могут быть найдены из уравнения

$$\mathbf{u}_{t12} = a(\gamma - 1) \text{grad} T'_r, \quad (37)$$

где T'_r – приведённое или безразмерное распределение амплитуд любых тепловых волн. Для перехода к размерной амплитуде температуры в тепловой волне необходимо использовать формулу $T'_r = T'_{h12} \beta_v / (\gamma - 1)$. После подстановки этого выражения в формулу (37) имеем

$$\mathbf{u}_{t12} = a \beta_v \text{grad} T'_h, \quad (38)$$

где T'_h – уравнение движения любой тепловой волны, возбуждающейся в АПС.

Проведём вычисления компонент вектора \mathbf{u}_{t12} . Для того, чтобы удовлетворять граничному условию (26), Б.П. Константинов [2] предложил в уравнениях движения вязких и тепловых волн принять зависимость от координаты y в этих волнах в виде множителя $\exp(-ik_y y)$, где $k_y = k \sin \theta$. Тогда уравнение движения тепловой волны (4) принимает вид

$$T'_{h12} = 2T'_m e^{-k_T x} \exp[-i(k_T x + k_y y)]. \quad (39)$$

При проведении расчётов будем использовать реальную часть уравнения (39)

$$T'_{h12} = 2T'_m e^{-k_T x} \cos(-k_T x - k_y y). \quad (40)$$

В соответствии со схемой взаимодействия звуковой волны с поверхностью (см. рис. 1) касательная компонента вектора (38) может быть определена из выражения

$$\begin{aligned} u_{t12y} &= a \beta_v \frac{\partial T'_{h12}}{\partial y} = \\ &= a \beta_v k_y 2T'_m e^{-k_T x} \sin(-k_T x - k_y y). \end{aligned} \quad (41)$$

После подстановки в формулу (41) касательной компоненты волнового вектора k_y и простых преобразований окончательно получаем

$$u_{t12y} = K_t f \sin \theta T'_m e^{-k_T x} \sin(-k_T x - k_y y). \quad (42)$$

где $K_t = (4\pi\alpha\beta_v) / c$.

Проведём численную оценку значений размерного коэффициента K_t , входящего в формулу (42). При нормальных термодинамических условиях расчёты дают следующие результаты. Для газов величина коэффициента K_t следующего порядка ($10^{-10} \dots 10^{-9}$) м/К, а для жидкостей порядка ($10^{-15} \dots 10^{-11}$) м/К. Значения коэффициента K_t не зависят от частоты, следовательно, во всём, практически важном диапазоне частот, касательная составляющая вектора колебательной скорости (42) очень мала и её можно исключать из решения задач АПС. Физически это означает, что вектор (37) имеет только нормальную компоненту колебательной скорости \mathbf{u}_{t12x} .

Анализ процесса трансформации тепловой волны (2) даёт результаты аналогичные результатам исследования трансформации тепловой волны (4), представленные выше. На этом основании можно сразу записать, что в результате трансформации тепловой волны (9) в АПС возбуждается одномерная неоднородная волна \mathbf{u}_{t11} , волновой вектор которой направлен вдоль направления нормали к поверхности тела. Неоднородные волны \mathbf{u}_{t11} и \mathbf{u}_{t12} относятся к классу продольных волн. В дальнейшем при составлении системы уравнений АПС (35)-(36) будем учитывать, что их касательные компоненты $u_{t11y} = 0$ и $u_{t12y} = 0$.

Для расчёта параметров нормальных компонент векторов трансформации тепловых волн волна \mathbf{u}_{t11} и \mathbf{u}_{t12} воспользуемся уравнением движения тепловой волны (15). С учётом того, что одномерная тепловая волна (15) возбуждается на плоскости $x = \Delta_T$ и движется в отрицательном направлении оси $0x$, уравнение движения тепловой волны (15) принимает вид

$$T'_{h11} = 2T'_m \left[1 - e^{(\alpha_T x - \pi)} \cos(k_T x - \pi) \right]. \quad (43)$$

Далее, воспользовавшись уравнением (38), получаем формулы, позволяющие рассчитать параметры нормальных компонент волн трансформации:

$$\begin{aligned} u_{t12x} &= a \beta_v \frac{\partial T'_{h12}}{\partial x} = \\ &= u_{t0} e^{-k_T x} \cdot [\sin(-k_T x) - \cos(-k_T x)], \end{aligned} \quad (44)$$

$$u_{i11x} = a \beta_V \frac{\partial T'_{h11}}{\partial x} = u_{i0} e^{(k_T x - \pi)} \cdot [\sin(k_T x - \pi) - \cos(k_T x - \pi)], \quad (45)$$

где $u_{i0} = \sqrt{2\omega a} \beta_V T'_m$. Нетрудно показать, что амплитуды неоднородных волн (44) и (45) имеют размерность скорости. Логично перейти в этих формулах от амплитуды акустической добавки к температуре среды T'_m к амплитуде колебательной скорости бегущей звуковой волны u_m . Для этого используем выражение (24). После преобразований уравнений движения неоднородных волн (44) и (45) получаем:

$$u_{i12x} = -u_{tm} e^{-\alpha_T x} \cdot \sin\left(k_T x + \frac{\pi}{4}\right), \quad (46)$$

$$u_{i11x} = -u_{tm} e^{(\alpha_T x - \pi)} \cdot \sin\left(k_T x - \frac{5\pi}{4}\right), \quad (47)$$

где $u_{tm} = 2\sqrt{2}b_{11}u_m$ – амплитуда волны трансформации; $b_{11} = (\gamma - 1)\sqrt{\omega a / 2c^2}$.

Ввиду того, что все выкладки в этой работе осуществляются в рамках теории Г Кирхгофа [1], выражения (46) и (47) останутся точными решениями в случаях, когда выполняется неравенство $b_{11} \ll 1$. Оценка частот, на которых выполняется это неравенство, позволяет установить, что в звуковом диапазоне частот амплитуды неоднородных волн (46) и (47) малы. Как следствие этого, амплитуда волны трансформации $u_{tm} \ll u_m$. На этом основании при решении задач формирования АПС в аэродинамике и гидроакустике на низких частотах неоднородные волны (46) и (47) и, связанные с их появлением физические эффекты, можно не учитывать.

Нетрудно заметить, что неоднородные волны (46) и (47) включены в противофазе по отношению друг к другу. Это обстоятельство приводит к следующим особенностям АПС, формирующегося в жидкой среде, контактирующего с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела. Возбуждение неоднородных волн (46) и (47) не приводит к изменениям амплитуды нормальной компоненты вектора колебательной скорости и внутри АПС. Наличие неоднородных волн (46) и (47) в АПС также не приводит к нарушению граничного условия (3).

Неоднородные волны (46) и (47) являются одномерными волнами, волновые векторы которых направлены вдоль нормали к поверхности твёрдого тела. Направление колебаний частиц жидкой среды в этих волнах также совпадает с направлением нормали и, следовательно, волны (46) и (47) можно отнести к классу неоднородных продольных волн. Причиной появления таких волн являются периодические тепловые расширения жидкой среды, в которой возбуждена неоднородная тепловая волна.

Внутри АПС неоднородные волны (46) и (47) взаимодействуют друг с другом, образуя стоячую волну, колебания в которой происходят в противофазе по отношению к падающей на поверхность тела звуковой волне (23).

В ультразвуковом диапазоне частот амплитуда неоднородной волны u_{tm} и амплитуда колебательной скорости звуковой волны u_m могут оказаться сопоставимыми по величине. В этом случае необходимо провести дополнительное исследование влияния волн трансформации (46) и (47) на физические свойства АПС. При этом дополнительно должно быть изучено влияние непроницаемой для жидкой среды твёрдой поверхности, ограничивающей АПС с одной стороны, на колебательные течения жидкости в приповерхностном слое.

7. ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Диссипативные процессы, происходящие в АПС зоны физического контакта жидкой среды с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела, обеспечиваются затуханием вязких и тепловых волн, возбуждающихся в АПС. Как показано выше, в результате взаимодействия звуковой волны (23) с поверхностью твёрдого тела в её АПС возбуждаются: вязкие волны (1) и (3), также тепловые волны (2) и (4).

Для расчёта удельной мощности тепловыделения в АПС, обеспечиваемого этими неоднородными волнами, воспользуемся методикой, описание которой представлено в книге [9]. Согласно этой методике, диссипативный интеграл для любых вязких волн принимает вид

$$q_v = -\frac{\eta}{2} \int_0^{\Delta} \left(\frac{du_v(x)}{dx} \right)^2 dx, \quad (49)$$

где η – коэффициент динамической вязкости жидкой среды; $\Delta = \pi\delta$ – эффективная толщина АПС; $u_v(x)$ – вязкая волна, возбуждённая в АПС.

Удельную мощность тепловыделения в АПС, обеспечиваемого любыми тепловыми волнами, получим, используя диссипативный интеграл

$$q_T = -\frac{\chi}{T_0} \int_0^{\Delta_T} \left(\frac{dT'_h(x)}{dx} \right)^2 dx, \quad (50)$$

где χ – коэффициент теплопроводности жидкой среды; $\Delta_T = \pi\delta_T$ – эффективная толщина теплового АПС; $T'_h(x)$ – тепловая волна, существующая в АПС; T_0 – статическая температура физической системы, в которой возбуждена звуковая волна.

Если подставить в интеграл (49) уравнение (5), то получим выражение для расчёта удельной мощности тепловыделения, возникающего в АПС за счёт затухания вязкой волны (5). После несложных вычислений имеем

$$q_{v1} = -\frac{1.5\eta u_m^2 \sin^2 \theta}{\delta}. \quad (51)$$

Аналогичным образом для вязкой волны (6) получаем

$$q_{v2} = -\frac{1.5\eta u_m^2 \sin^2 \theta}{\delta}. \quad (52)$$

Сопоставление формул (51) и (52) показывает, что вязкие волны (5) и (6) вносят одинаковый вклад в тепловые потоки, возникающие в АПС.

Определим вклад в тепловой баланс системы каждой из существующих в АПС тепловых волн. Для чего в интеграл (50) подставим уравнение (14). После несложных вычислений получаем выражение для расчёта удельной мощности тепловыделения, появляющегося в АПС за счёт затухания тепловой волны,

$$q_{T1} = -3.0 \frac{\chi}{T} \frac{T_m'^2}{\delta_T}. \quad (53)$$

Для тепловой волны (15) аналогичные вычисления позволяют получить

$$q_{T2} = -3.0 \frac{\chi}{T} \frac{T_m'^2}{\delta_T}. \quad (54)$$

Если сравнить выражения (53) и (54), то можно увидеть, что тепловые волны также вносят одинаковый вклад с тепловой баланс АПС.

Знак минус в выражениях (51)-(54) указывает на то, что все тепловые потоки направлены в отрицательном направлении оси $0x$ (см. Рис. 1) к поверхности твёрдого тела. Учитывая физические свойства твёрдого абсолютно теплопроводного тела, можно утверждать, что статическое значение температуры жидкой среды T_0 всегда остаётся постоянной величиной. На этом основании влиянием изменения температуры на физические параметры жидкой среды, находящейся в АПС, при решении подобных задач, можно пренебречь.

Вернёмся вновь к выражениям (51) и (52). Подставим в них выражение толщины АПС $\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$. После преобразований, с учётом усреднения функции по времени, эти выражения принимают вид

$$q_{v1} = q_{v2} = -D_v J_0, \quad (55)$$

где $J_0 = \rho c u_m^2 / 2$ – интенсивность звуковой волны, взаимодействующей с поверхностью тела; $D_v = b_{21} \sin^2 \theta$.

Если в формулы (53) и (54) подставить выражение толщины теплового пограничного слоя $\delta_T = \sqrt{2a/\omega}$ и амплитуду акустической добавки к температуре среды в бегущей звуковой волне (24), то после преобразований эти формулы принимают вид

$$q_{T1} = q_{T2} = -D_T J_0, \quad (56)$$

где $D_T = 3.0 b_{11} k_T$; $k_T = (\gamma - 1) C_p / \beta_V c^2$.

Полная удельная мощность тепловыделения в АПС является суммой отдельных компонент тепловых потоков

$$q = q_{v1} + q_{v2} + q_{T1} + q_{T2} \quad (57)$$

или с учётом введённых выше обозначений, получаем

$$q = (2D_v + 2D_T) J_0. \quad (58)$$

Коэффициент, характеризующий поглощение энергии звуковой волны, отражающейся от поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела, может быть найден следующим образом. Известно, что средняя плотность потока энергии, падающей в единицу времени на единицу поверхности стенки в звуковой волне равна $J_0 \cos \theta$. Поэтому доля энергии, поглощающейся при отражении звуковой волны от поверхности стенки, будет

$$M = \frac{q}{J_0 \cos \theta} = \frac{2(D_V + D_T)}{\cos \theta}. \quad (59)$$

Как видим из выражения (59), поглощение звука поверхностью твёрдого тела зависит от угла падения волны θ . При нормальном падении звуковой волны на поверхность твёрдого тела ($\theta = 0$) вязкие волны не возбуждаются, и коэффициент M имеет минимальное значение

$$M_{\min} = 2D_T. \quad (60)$$

По мере увеличения угла падения θ вклад вязких волн в диссипацию энергии в АПС возрастает (см., например, формулу (51)), это приводит к соответствующему увеличению значения коэффициента (59).

Оценка величины энергии, поглощаемой в АПС твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности, была раньше проведена Б.П. Константиновым и Л.Д. Ландау (см. работы [2,9]). Сопоставление этих расчётов показывает, что в обоих случаях величина энергии, поглощаемой в АПС, одинакова. Если воспользоваться обозначениями физических величин, принятых в статье [2], то для расчёта доли энергии волны, диссипируемой в АПС, можно использовать формулу

$$m = (b_{11} + b_{21} \sin^2 \theta) / \cos \theta. \quad (61)$$

Из сопоставления выражений (59) и (61) следует, что участие в формировании АПС вязкой волны (1) приводит к увеличению диссипации энергии в АПС за счёт вязкости жидкой среды в 3 раза.

Поглощение энергии звуковой волны в АПС, обусловленное теплопроводностью жидкой среды, в наших расчётах превышает в $6.0 k_T$ раз (см. формулу (58)). Это связано с тем, что в качестве верхнего предела диссипативного интеграла (50) выбрана величина Δ_r , а также использованием для оценки величины амплитуды тепловых волн (2) и (4) и формулы (24).

Таким образом, эффективность диссипативного процесса в АПС оказывается зависящей от теплофизических параметров жидкой среды, входящих в коэффициент k_T . Для определённости будем считать, что акустическое поле возбуждено в газе. При нормальных условиях значения k_T имеют величину: воздух 0.94; аргон 0.90; углекислый газ 0.87. Нетрудно

заметить, что значения коэффициентов k_T газов близки по величине к 1. Если полученные значения k_T подставить в формулу (56), то получим, что в воздухе диссипация энергии в АПС для тепловых волн (2) и (4) в 2.82 раза больше по сравнению с результатами расчётов, проведённых в работах [2,9].

Полученные выше выражения можно применять для предварительной оценки тепловыделения в АПС поверхностей раздела газ-твёрдое тело, вещество которого имеет конечные значения теплофизических параметров. Однако, эти формулы нельзя применять для расчёта тепловых потоков, возникающих в АПС границ жидкость-твёрдое теплопроводное тело. Это связано с тем, что при формировании АПС границы жидкость-твёрдое теплопроводное тело в системе появляется дополнительная тепловая волна. В силу граничных условий (см. статьи [5-7]) эта тепловая волна возбуждается на поверхности раздела сред и распространяется вглубь вещества твёрдого тела. Физические свойства волн в веществе твёрдого тела не отличаются от физических свойств тепловых волн, существующих в жидкости. Как следствие этого, в правой части уравнения (57) появляется дополнительный тепловой поток q_{T2} . В этом случае тепловые потоки уже $q_{T1} \neq q_{T2}$; $q_{T1} > q_{T2}$. Кроме того, распространение тепловой волны в твёрдом теле сопровождается генерацией вторичных звуковых волн и возбуждением неоднородных волн трансформации типа волн (46) и (47).

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решения задач, в которых даётся описание физических процессов возбуждения неоднородных вязких и тепловых волн, полученные Г. Кирхгофом [1] и Л.Д. Ландау [9], являются независимыми, дополняющими друг друга решениями. Эти решения дают описание синхронно протекающих в АПС твёрдой абсолютно теплопроводной поверхности физических процессов возбуждения и распространения внутри АПС вязких и тепловых волн. Вязкие и тепловые волны возбуждаются в АПС одновременно парами и синхронно затухают по мере распространения в объёме вещества, заполняющего АПС.

При взаимодействии бегущей звуковой волны с бесконечной плоской поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела возникает АПС, в котором обе пары неоднородных волн возбуждаются на параллельных поверхностях, ограничивающих объём АПС с двух сторон. Внутри АПС в каждой паре вязкие и тепловые волны распространяются навстречу друг другу.

В объёме АПС за счёт трансформации тепловых волн возбуждаются дополнительно две неоднородные продольные волны (46) и (47). Эти волны возбуждаются в АПС за счёт периодических колебаний объёма жидкости, находящейся внутри АПС, и являются следствием теплового расширения среды, в которой возбуждено поле переменных температур. В звуковом диапазоне частот влиянием неоднородных волн (46) и (47) на физические процессы, протекающие в АПС, можно пренебречь.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть процесс возбуждения неоднородных волн типа (46) и (47) в случае формирования АПС при взаимодействии стоячей звуковой волны с поверхностью твёрдого тела. На основании предварительного анализа этого процесса можно предположить, что результатом возбуждения неоднородных волн (46) и (47) является возникновение внутри АПС акустических течений типа вихрей Шлихтинга.

Неоднородные волны, возбуждающиеся в АПС существуют за счёт энергии, отбираемой у основной звуковой волны, взаимодействующей с поверхностью твёрдого абсолютно теплопроводного тела. В результате объединения решений Г. Кирхгофа и Л.Д. Ландау суммарное число неоднородных волн в АПС увеличивается, что приводит к увеличению мощности тепловыделения в АПС примерно в 2 раза. Следствием тепловыделения в АПС является уменьшение амплитуды отражений звуковой волны. Однако, диссипация энергии в АПС не влияет на процесс акустического взаимодействия падающей на границу раздела и отражённых от неё звуковых волн.

Для численной оценки параметров звуковой волны, отражённой от поверхности твёрдого абсолютно теплопроводного тела,

можно воспользоваться методикой расчёта, разработанной Б.П. Константиновым [2]. В рассматриваемом случае, полученные Б.П. Константиновым выражения для расчётов коэффициента отражения звуковой волны по давлению и его фазового угла сохраняют свой вид. Для получения результата достаточно в этих формулах расчётный комплекс (61) заменить параметром (59).

Полученные таким способом выражения могут быть использованы для оценки диссипативных свойств поверхностей твёрдых тел в аэроакустике. Однако, эти выражения нельзя применять для оценки параметров акустического поля, возникающего при взаимодействии звуковых волн, распространяющихся в жидкости, с поверхностью твёрдого теплопроводного тела. Задачу о формировании АПС и исследование его влияния на акустические свойства поверхности раздела жидкость-твёрдое тело, вещество которого имеет конечные значения теплофизических параметров, нужно рассматривать отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung. *Poggendorf's Annalen und Chemie*, 1868, 134(6):177-193.
2. Константинов Б.П. Поглощение звуковых волн при отражении от твердой границы. *ЖТФ*, 1939, 9(3):226-238.
3. Kundt A. Über eine neue Art Akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. *Annalen der Physik*, 1886, 127(4):497-523. Retrieved 2009-06-25.
4. Kundt August. *Acoustic Experiments. Journal of Science*, 1868, 35(4):41-48. Retrieved 2009-06-25.
5. Легуша ФФ. Эффект Константинова и поглощение звука в неоднородных средах. *УФН*, 1984, 144(3):509-522.
6. Легуша ФФ. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской волны на границе раздела жидких сред с учетом их вязкости и теплопроводности. *Письма в ЖТФ*, 1982, 9(22):1390-1392.
7. Легуша ФФ. Поглощение Константинова на границе раздела жидких полупространств. *ЖТФ*, 1984, 54(4):671-678.

8. Легуша ФФ, Пялов ЛН, Чижов ГВ. Дисперсия скорости звука волны, распространяющейся в среде с потерями, находящейся в цилиндрической трубе с теплопроводными стенками. *Тр. Всерос. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики"*. СПб., Изд-во "ЛЕМА", 2023, с. 448-451.
9. Ландау АД, Лифшиц ЕМ. *Теоретическая физика. Том 6. Гидродинамика*. М., Наука, 1988, 736 с.
10. Легуша ФФ, Невеселова КВ. Излучение звука поверхностью, температура которой изменяется по гармоническому закону. *Тр. XXIV сессии РАО. Физическая акустика*. М., ГЕОС, 2011, с. 83-86.
11. Легуша ФФ, Невеселова КВ. Широкополосные источники звука – термофоны. *Морские интеллектуальные технологии*, 2014, 1(3):71-77.
12. Легуша ФФ, Невеселова КВ. Экспериментальные исследования современных термофонов. *Морские интеллектуальные технологии*, 2015, 1(4):60-65.
13. Васильев БП, Легуша ФФ, Разрезова КВ, Чижов ГВ. Экспериментальные исследования плёночных термофонов. *Морские интеллектуальные технологии*, 2016, 1(4):118-123.
14. Легуша ФФ, Васильев БП, Олейник ММ, Разрезова КВ. Электротермические приемники звука. *Письма в ЖТФ*, 2023, 49(9):40-42.
15. Легуша ФФ, Васильев БП, Лукьянов ВД, Олейник ММ, Разрезова КВ. Исследование возможности использования конструктивных особенностей пленочного термофона для создания приемника акустических сигналов. *Труды СПбГМТУ*, 2023, 2(6):108-125.
16. Бреховских ЛМ, Годин ОВ. *Акустика неоднородных сред. Т. 1 Основы теории отражения и распространения звука*. М., Наука, 2007, 442 с.

Легуша Федор Федорович

д.ф.-м.н.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

3, ул. Лопманская, Санкт-Петербург 190121, Россия

E-mail: legusha@smtu.ru

Кузькин Венедикт Михайлович

д.ф.-м.н.

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

Разрезова Ксения Васильевна

к.ф.-м.н.

Звукоизоляционные Европейские Технологии

14, ул. Якорная, Санкт-Петербург 195027, Россия

E-mail: kv_neveselova@mail.ru

Переселков Сергей Алексеевич

д.ф.-м.н.

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

E-mail: pereselkov@yandex.ru

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.291

Численное исследование низкоскоростного столкновения стального шара с ледяной плитой

¹Халид В., ¹Голубев В.И., ^{1,2}Гусева Е.К.

¹Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, <https://ipmnet.ru/>

Москва 119526, Российская Федерация

E-mail: khalid@phystech.edu, golubev.vi@mipt.ru, guseva.ek@phystech.edu

Поступила 15.02.2024, рецензирована 20.02.2024, принята 26.02.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

Аннотация: Рассматривается процесс динамического деформирования при низкоскоростном столкновении деформируемых твёрдых тел. Полная трёхмерная контактная задача численно решена в проблемно-ориентированном программном комплексе Abaqus, основанном на явном конечно-элементном методе на структурных расчётных сетках. Применены две основные механико-механические модели – линейная изотропная упругая и упругопластическая. Полученные результаты моделирования продемонстрировали возможность воспроизведения результатов лабораторных экспериментов, доступных в открытой литературе, для различных скоростей столкновения. Понимание процесса деформирования льда востребовано в ряде прикладных задач, например, для оценки влияния ударов льда по крылья самолётов и фильтрации переотражённых от контактной границы лёд-вода паразитных волн, возникающих в процессе проведения сейсмической разведки в Арктическом регионе.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, реологические модели льда, деформируемое твёрдое тело, линейная упругость, пластичность

УДК 004.94

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 23-21-00384, <https://rscf.ru/project/23-21-00384/>.

Для цитирования: Халид В., Голубев В.И., Гусева Е.К. Численное исследование задачи низкоскоростного столкновения стального шара с ледяной плитой. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):291-296. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.291.

Numerical Investigation of the Steel Ball-Ice Plate Low-Speed Collision

Walid Khalid, Vasily I. Golubev

Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

E-mail: khalid@phystech.edu, golubev.vi@mipt.ru

Evgeniya K. Guseva

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, <https://ipmnet.ru/>

Moscow 119526, Russian Federation

E-mail: guseva.ek@phystech.edu

Received Februar 15, 2024, peer-reviewed Februar 20, 2024, accepted Februar 26, 2024, published April 25, 2024

Abstract: In this paper, the dynamic deformation process during the low-speed collision was investigated. The full 3D dynamic contact problem was simulated in the Abaqus software, based on the explicit finite-element method on structured meshes. Two basic mechanical models (linear isotropic elastic and elastoplastic) are considered. The obtained results showed the possibility of the experimental data, available in the open literature for different striker velocities, reproduction.

The better understanding of the ice deformation process can be useful for different applied problems, like the ice impact on the aircraft wings estimation and the ice-water contact reflected waves filtration during the seismic survey in the Arctic region

Keywords: computer simulation, ice rheology models, deformable solid body, linear elasticity, plasticity

UDC 004.94

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project 23-21-00384, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00384/>.

For citation: Walid Khalid, Vasily I. Golubev, Evgeniya K. Guseva. Numerical Investigation of the Steel Ball-Ice Plate Low-Speed Collision. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):291-296e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.291.

Содержание

1. Введение (292)
 2. Математическая модель и численный метод (293)
 3. Результаты моделирования (294)
 - 3.1. Упругая модель (294)
 - 3.2. Упругопластическая модель (294)
 4. Заключение (295)
- Литература (296)

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача корректного расчёта процесса динамического деформирования льда является актуальной. Данное явление встречается во множестве прикладных областей, например, в авиастроении и при сейсмической разведке месторождений нефти и газа в Арктике. Понимание механики льда может позволить создать новые инженерные технологии.

Существует множество исследовательских работ, направленных на изучение механических свойств льда. Например, инженерные свойства морского льда были детально освещены в работе [1]. Процесс растрескивания монокристаллического льда под высокоскоростным воздействием экспериментально был исследован в работе [2]. Более современным обзором известных механических свойств льда является работа [3]. В ней было показано, что предел растяжения на сжатие и на растяжение меняется в широком диапазоне при изменении температуры. Также были отмечены различия в механических свойствах льда при квазистатических тестах на сжатие и при тестировании на высокоскоростные удары. Недавно исследователями экспериментально были исследованы значения прочности, величины деформации и упругих

модулей льда для различных температур и скоростей нагружения [4].

Многие исследовательские коллективы работают над задачей построения надёжной механической модели льда для описания процесса его деформирования. Например, в работе [5] определяющие соотношения для описания высокоскоростного деформирования льда и алгоритм численного расчёта напряжений был предложен. Он основан на критерии перехода в пластическое состояние Drucker-Prager и описывает различное поведение при сжатии и растяжении. В работе [6] трёхмерная модель, учитывающая зависимость от скорости деформирования, была предложена и успешно валидирована на динамическом бразильском тесте для кольца из льда. В статье [7] предложено новое материальное уравнение, используемое для ледяных материалов, связанное с квазистатическими и ударными реакциями.

Недавно, подробное экспериментальное исследование процесса взаимодействия стального шара с пластиной из льда было проведено [8]. Использование широкого диапазона скоростей удара позволило получить различные деформационные кривые, содержащие информацию о реологии льда. Настоящая работа является попыткой применения простейших механических моделей для описания наблюдаемых в эксперименте деформаций льда. Для проведения компьютерного моделирования использовалась полная трёхмерная постановка, решаемая явным конечно-элементным методом в программном комплексе Abaqus. Последовательно использовались линейная упругая и упругопластическая модели для воспроизведения экспериментальных данных.

Для получения наилучшего совпадения результатов значение предела текучести рассматривалось как дополнительный свободный параметр модели.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

В настоящей работе процесс столкновения стального шара с пластиной из льда изучался численно. Ранее экспериментальные исследования были проведены другой исследовательской группой [8]. Рассматривались случаи различной скорости удара, которая варьировалась в диапазоне от 0.431 м/с до 2.230 м/с. Полученные диаграммы "сила реакции опоры – глубина проникновения шара" представлены на **Рис. 1**. Было показано, что увеличение скорости удара приводит к увеличению максимальной глубины проникновения шара.

В данной работе нами получены результаты численного расчёта в полной трёхмерной постановке. Все размеры объектов и свойства материалов были взяты из работы [8]. Радиус шара был равен 38 мм, а длина, ширина и высота ледяной пластины равнялись 2000×2000×550 мм. Используемые параметры льда: $C_p = 3940$ м/с, $C_s = 2493$ м/с, $\rho = 917$ кг/м³. Используемые параметры стали: $C_p = 5700$ м/с, $C_s = 3100$ м/с, $\rho = 7800$ кг/м³.

Использовался конечно-элементный метод, реализованный в Abaqus. Была построена структурная расчётная сетка, содержащая более 600 тысяч расчётных узлов. Полная область интегрирования приведена на **Рис. 2**.

Две различные модели были использованы для описания процесса динамического деформирования льда. Первая из них

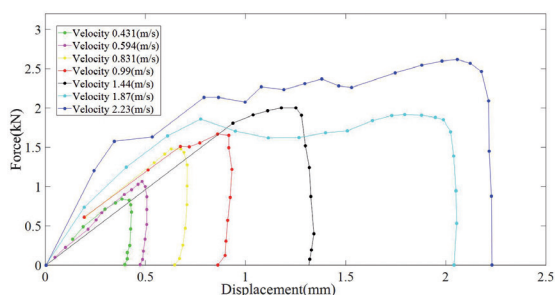


Рис. 1. Диаграмма "сила реакции опоры – глубина проникновения шара", полученная экспериментально [8]. Различные цвета отражают различные скорости удара.

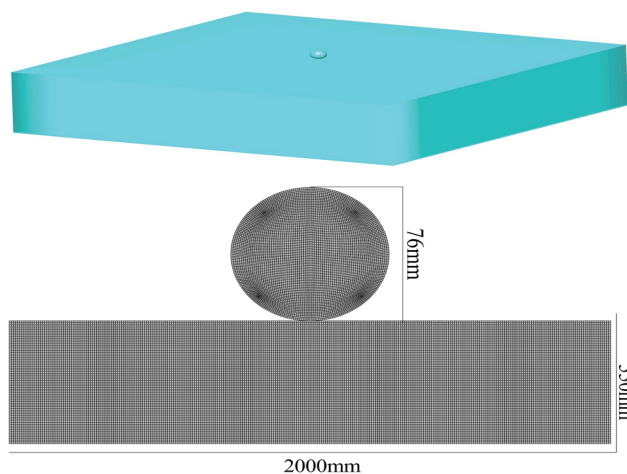


Рис. 2. Область интегрирования: 3D вид (слева) и 2D сечение (справа).

– изотропная линейно упругая модель. Соотношения между тензором напряжений и тензором деформаций задаются законом Гука в форме

$$\sigma = c \varepsilon. \tag{1}$$

Здесь σ – тензор напряжений, ε – тензор деформаций и c – тензор четвёртого ранга упругих постоянных. Механические параметры упругого материала: плотность ρ , модуль Юнга E и модуль Пуассона ν . В матричной форме для трёхмерной задачи система уравнений (1) имеет вид

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}. \tag{2}$$

Соотношение между модулем Юнга E , модулем Пуассона ν и модулем сдвига G имеет вид

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \tag{3}$$

Упругие свойства материала могут быть также выражены через параметры Ламе λ и μ , или через скорость поперечной волны C_s и скорость продольной волны C_p :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (4)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

Второй рассмотренной моделью являлась упругопластическая модель. Для перехода в пластическое состояние используется критерий Мизеса. Это условие может быть выражено в терминах второго инварианта тензора напряжений J_2 как $J_2 = k_2$, где $k = \sigma_y / \sqrt{3}$ и σ_y – значение предела текучести. С вычислительной точки зрения данная модель реализуется дополнительной корректировкой после упругого шага.

Для сокращения времени расчёта за начало расчёта принимался момент подлёта шара к пластине. Полное физическое время расчёта составляло 0.2 с, шаг по времени фиксировался равным 10^{-8} с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. УПРУГАЯ МОДЕЛЬ

На первом этапе были проведены расчёты для различных скоростей столкновения при использовании упругой модели. Зависимость от времени наблюдаемых в эксперименте параметров представлена на **Рис. 3**.

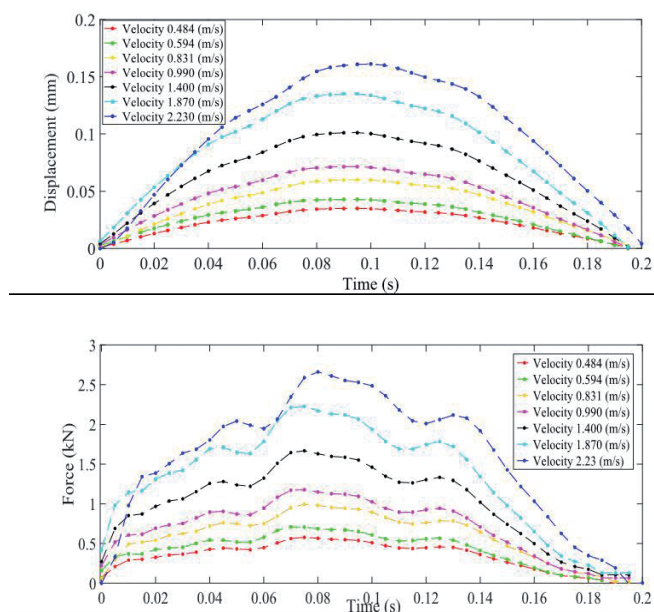


Рис. 3. Зависимость от времени величины смещения (вверху) и силы реакции (внизу). Линейно упругая модель.

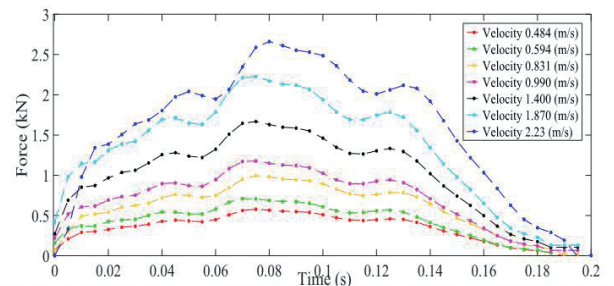


Рис. 4. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Линейно упругая модель.

По результатам рассчитанных зависимостей были построены диаграммы «сила реакции опоры – глубина проникновения шара» (см. **Рис. 4**). Результаты значительно отличаются от результатов лабораторных экспериментов. Информация о величине максимальных просадок приведена в **Таблице 1**.

Величина смещений и силы реакции опоры значительно зависят от скорости удара. Меньшие скорости приводят к меньшим глубинам проникновения, большие – к большим. Однако, во всех рассмотренных случаях результаты численного моделирования были как минимум в десять раз ниже, чем результаты экспериментов. Кроме того, расчётная величина осадки возвращается к нулевому значению к моменту окончания расчёта. Всё это ясно свидетельствует о том, что изотропная линейно упругая модель не описывает адекватно поведение льда, которое наблюдается в экспериментах.

3.2. УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На втором этапе была использована упругопластическая модель с фиксированным

Таблица 1
Численные и экспериментально [8] максимальные смещения поверхности льда. Линейно упругая модель

Скорость, м/с	Экспериментальные смещения, мм	Расчетные смещения, мм	Отличия, число раз
0.484	0.430	0.040	10.77
0.594	0.507	0.043	11.81
0.831	0.708	0.060	11.80
0.990	0.932	0.072	13.03
1.400	1.341	0.101	13.26
1.870	2.054	0.135	15.20
2.230	2.230	0.161	13.84

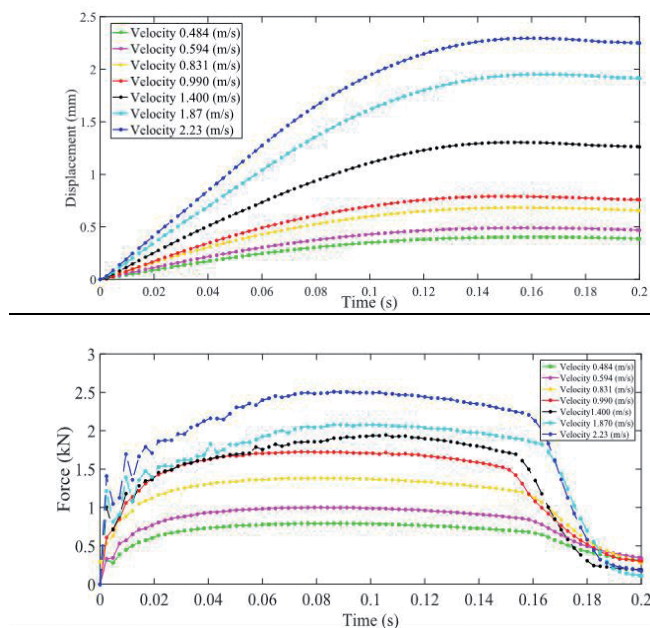


Рис. 5. Зависимость от времени величины смещения (вверху) и силы реакции (внизу). Уругопластическая модель.

значением предела текучести 0.34 МПа. Для тех же самых величин скорости удара временные зависимости наблюдаемых величин представлены на Рис. 5. Обновленные диаграммы приведены на Рис. 6. Явно видно, что теперь для значения скорости в 2.23 м/с отличия достаточно малы.

Для получения лучшего совпадения результатов расчётов с экспериментальными данными в дальнейшем величина предела текучести рассматривалась в качестве свободного параметра (отдельно для каждой скорости удара). На основе многовариантного счёта были выбраны оптимальные значения,

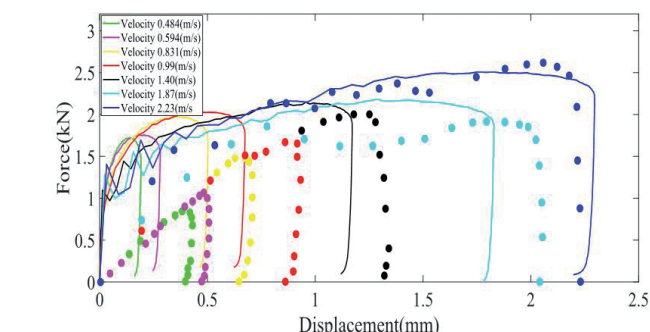


Рис. 6. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Уругопластическая модель. Значение предела текучести 0.34 МПа.

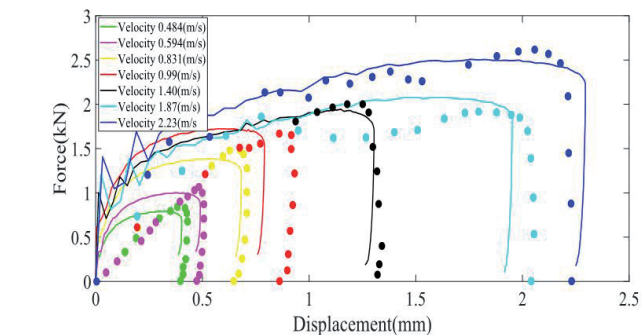


Рис. 7. Диаграмма «сила реакции опоры – глубина проникновения шара», полученная в расчётах. Уругопластическая модель. Оптимальные значения предела текучести.

Таблица 2

Численные и экспериментально [8] максимальные смещения поверхности льда. Уругопластическая модель

Скорость, м/с	Экспериментальные смещения, мм	Расчетные смещения, мм	Отличия, число раз
0.484	0.430	0.403	1.065
0.594	0.507	0.490	1.034
0.831	0.708	0.68	1.036
0.990	0.932	0.790	1.178
1.400	1.341	0.1304	1.027
1.870	2.054	1.952	1.052
2.230	2.230	2.295	0.971

диаграммы для которых представлены на Рис. 7. Информация о величинах осадки представлена в Таблице 2. Эти данные отражают гораздо более близкое совпадение с результатами лабораторных экспериментов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был численно исследован процесс динамического деформирования ледяной пластины при ударе стальным шаром. Две механические модели были использованы для описания реологии льда: изотропная линейно упругая и уругопластическая модели. Сравнение глубины проникновения шара с результатами лабораторных экспериментов было проведено.

Выявлено, что использование упругой модели приводит к значительному занижению максимальной глубины проникновения ударника. Таким образом, использование данной модели для решения практических задач невозможно.

Использование упругопластической модели с фиксированным значением предела текучести для всех скоростей удара не позволяет воспроизвести все кривые нагружения. Использование предела текучести в качестве дополнительного свободного параметра модели позволяет значительно улучшить результат. Возможным объяснением данного эффекта является различие в механизмах неупругого поведения (плавление, микрорастрескивание и пр.) для различных энергий удара. Изучение данного факта должно являться продолжением настоящего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schwarz J, Weeks W. Engineering properties of sea ice. *Journal of Glaciology*, 1977, 19(81):99-531.
2. Combescure A, Chuzel-Marmot Y, Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(20):2779-2790.
3. Petrovic J. Review mechanical properties of ice and snow. *Journal of materials science*, 2003, 38:1-6.
4. Wenyuan M, Yingkui G. Experimental study on mechanical properties of ice. *Proc. AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications*, Atlantis Press, 2015, pp. 192-196.
5. Pernas-Sanchez J, Pedroche D, Varas D, Lopez-Puente J, Zaera R. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(14):1919-1927.
6. Zhang Y, Wang Q, Oterkus S, Oterkus E, Li J, Han D. Numerical investigation of ice plate fractures upon rigid ball impact. *Ocean Engineering*, 2023, 287:115824.
7. Ince S, Kumar A, Paik J. A new constitutive equation on ice materials. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(5):610-623.
8. Елифанов В.П. Особенности контактного разрушения льда. *Лёд и снег*, 2020, 60(2):274-284.

Халид Валид

аспирант

Московский физико-технический институт
9, Институтский пер., Долгопрудный 141700,
Московская обл., Россия

E-mail: khalid@phystech.edu

Голубев Василий Иванович

д.ф.-м.н.

Московский физико-технический институт
9, Институтский пер., Долгопрудный 141700,
Московская обл., Россия

E-mail: golubev.vi@mipt.ru

Гусева Евгения Кирилловна

аспирант

Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского РАН

101/1, пр-т Вернадского, Москва 119526, Россия

E-mail: guseva.ek@phystech.edu

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.297

Радиопокрытие прибрежной морской зоны с применением беспроводного широкополосного оптического канала для организации интенсивного судоходства

Афонин И.Л., Головин В.В., Ткаченко М.О., Тыщук Ю.Н., Поляков А.Л., Слезкин Г.В.

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

Севастополь 299053, Российская Федерация

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru, vvgolovin@mail.sevsu.ru, motkachenko@mail.sevsu.ru, yntyshchuk@mail.sevsu.ru, alpolyakov@mail.sevsu.ru, gvslezkin@mail.sevsu.ru

Поступила 17.10.2023, рецензирована 24.10.2023, принята 31.10.2023, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН Е.С. Солдатовым.

Аннотация: В статье представлена модель беспроводного широкополосного оптического канала, предназначенного для связи между береговой подсистемой и воздушным ретранслятором, обеспечивающим покрытие прибрежной морской акватории для организации интенсивного судоходства, в том числе с применением безэкипажных судов. Показано, что прямая передача данных берег-судно с применением технологий Wi-Fi и 4G/LTE имеет ряд недостатков для бухт со сложным береговым рельефом. Применение беспроводного оптического канала в формате "точка-точка" между береговой подсистемой и воздушным ретранслятором позволяет обеспечить качественное радиопокрытие морской поверхности и предоставлять информационно емкие каналы судовым системам. Представлены результаты моделирования беспроводного оптического канала, реализованного с применением технологии FSO (Free Space Optic). Для повышения эффективности использования спектра передаваемого потока данных и помехозащищенности беспроводного канала применены 16QAM и OFDM.

Ключевые слова: e-Навигация, беспроводная связь, оптическая связь, технология Free Space Optic

УДК 621.391.64

Для цитирования: Афонин И.Л., Головин В.В., Ткаченко М.О., Тыщук Ю.Н., Поляков А.Л., Слезкин Г.В. Радиопокрытие прибрежной морской зоны с применением беспроводного широкополосного оптического канала для организации интенсивного судоходства. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):297-306. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.297.

Radio coverage of coastal marine zone using wireless broadband optical channel to support intensive navigation

Igor L. Afonin, Vladislav V. Golovin, Mikhail O. Tkachenko, Yury N. Tyschuk, Alexander L. Polyakov, Gennady V. Slyozkin

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

Sevastopol 299053, Russian Federation

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru, vvgolovin@mail.sevsu.ru, motkachenko@mail.sevsu.ru, yntyshchuk@mail.sevsu.ru, alpolyakov@mail.sevsu.ru, gvslezkin@mail.sevsu.ru

Received October 17, 2023, peer-reviewed October 24, 2023, accepted October 31, 2023, published April 25, 2024

Abstract. The model of a wireless broadband optical channel designed for communication between the coastal subsystem and an air repeater that provides coverage of the coastal sea area for the organization of intensive navigation, including the use of unmanned vessels is presented. It is shown that direct coast-to-ship data transmission using Wi-Fi and 4G/LTE technologies has a number of disadvantages for bays with complex coastal terrain. The use of a wireless optical channel in the "point-to-point" format between the coastal subsystem and the air transmitter makes it possible to provide high-quality radio coverage of the sea surface and provide information-intensive channels to ship systems. The results of modeling the wireless optical channel implemented using FSO (Free Space Optic) technology are presented. To increase the efficiency of using the spectrum of the transmitted data stream and the protection ratio of the wireless channel, 16QAM and OFDM are used.

Keywords: e-Navigation, wireless communication, optical communication, Free Space Optic technology

UDC 621.391.64

For citation: Igor L. Afonin, Vladislav V. Golovin, Mikhail O. Tkachenko, Yury N. Tyschuk, Alexander L. Polyakov, Gennady V. Slyozkin. Radio coverage of the coastal marine zone with the use of a wireless broadband optical channel for the organization of intensive navigation. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):297-306e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.297.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (298)
2. АНАЛИЗ ЗОНЫ ПРЯМОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-СУДНО (299)
3. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-РЕТРАНСЛЯТОР (300)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (305)

ЛИТЕРАТУРА (305)

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из ключевых направлений развития транспортного судоходства рассматриваются информационные технологии в формах e-Навигации и безэкипажного судоходства, ставших ключевыми инициативами Международной морской организации (ИМО). Согласно принятому ИМО определению, e-Навигация – это гармонизированные сбор, интеграция, обмен, представление и анализ морской информации на борту судна и в береговых системах посредством электронных средств для совершенствования процесса перехода (судна) от причала до причала (в портах отхода и назначения) и соответствующих сервисов, обеспечивающих

безопасность мореплавания и защиту окружающей среды [1].

Можно выделить следующие технические блоки инфраструктуры e-Навигации [2]:

- технологии коммуникаций и обмена данными, среди которых можно выделить наземные (3G/4G, WiMax, AIS) и спутниковые (Iridium, VSAT);
- передача данных с борта судна на берег;
- передача с борта судна на берег и обратно информации о маршрутах следования судна;
- передача информации о навигационной обстановке со станции берегового слежения на борт судна;
- гидрографическая, гидрологическая и метеорологическая информация или передача с берега на борт судна;
- и др.

Также для организации широкополосного доступа радиосвязи при управлении движением судов перспективной является технология Wi-Fi [3]. В [4] дан анализ ее использования на частоте 2.4 ГГц с протоколом UDP для автономной узловой сети морской связи. В [5] предлагается в системе морской беспроводной

связи для мониторинга судов использовать технологию Wi-Fi дальнего действия.

В данной статье рассматривается вопрос организации эффективного покрытия для организации широкополосного радиодоступа в прибрежной зоне с высокой плотностью движения судов с применением систем Wi-Fi и 4G/LTE.

2. АНАЛИЗ ЗОНЫ ПРЯМОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-СУДНО

Проанализируем случай, когда требуется организовать широкополосный радиодоступ в пределах протяженной бухты с изломанным береговым рельефом.

При выборе физических параметров окружающей среды использовалась Рекомендация МСЭ-R P.527-4 «Электрические характеристики земной поверхности» [6]. Физические параметры окружающей среды учитывались для морской воды, почвы и возможных осадков (дождь, снег, туман и т.д.). В соответствии с Рекомендациями МСЭ-R P.527-4 [6], эффективные значения электрических характеристик почвы определяются типом почвы, её влажностью, температурой, общей геологической структурой и частотой падающего электромагнитного излучения. Учёт физических параметров морской воды и почвы в процессе расчёта сводится к определению их проводимости

и диэлектрической проницаемости, а также их зависимости от температуры. Параметры морской воды выбирались в соответствии с графиками, показанными на **Рис. 1** для температур $+20^{\circ}\text{C}$.

Учёт погодных условий проводился в соответствии с рекомендациями, данными в [6], согласно которых коэффициентов поглощения радиоволн в диапазоне 2.4-2.5 ГГц в дожде и тумане различной интенсивности не превышают 0.1 дБ/км, в кислороде и парах воды не превышают 0.05 дБ/км.

Для проведения моделирования рассматривалась показанная на **Рис. 2** Севастопольская бухта со сложным береговым рельефом, где указано место размещения береговой радиосистемы.

Исходные данные для моделирования:

- высота берега над уровнем моря: 33 м;
- диапазон частот: 2.4-2.45 ГГц;
- мощность передатчиков: 23 дБм;
- чувствительность приемников: -65 дБм;
- диаграммы направленности (ДН) антенн береговой и судовой радиосистем: круговая в Н-плоскости, поляризация линейная вертикальная;
- коэффициент усиления антенн: береговой радиосистемы 15 дБи, судовой радиосистемы 5 дБи.

На **Рис. 3** показаны результаты моделирования зоны покрытия Wi-Fi при возвышении береговой антенны на 1 м над подстилающей поверхностью и при возвышении судовой антенны на 2 м (**Рис. 3а**)

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

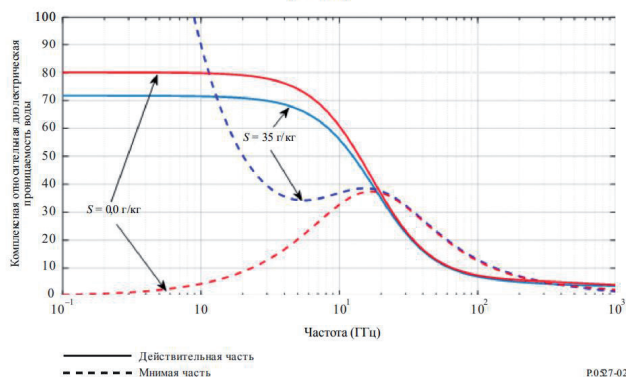


Рис. 1. Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты при температуре $T = +20^{\circ}\text{C}$.

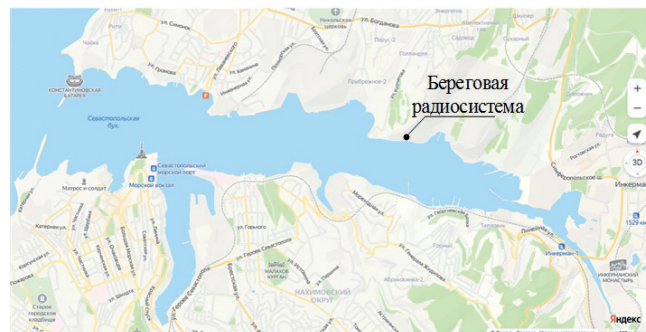
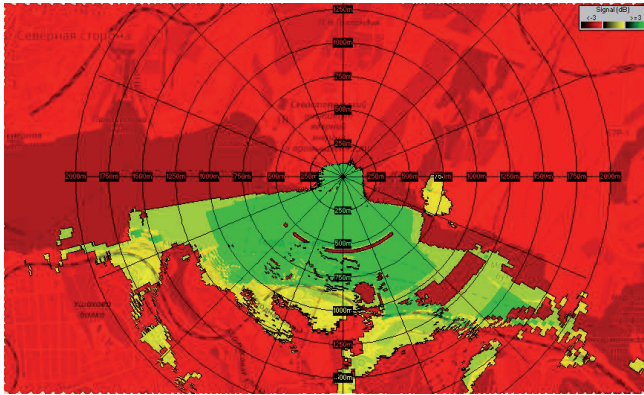
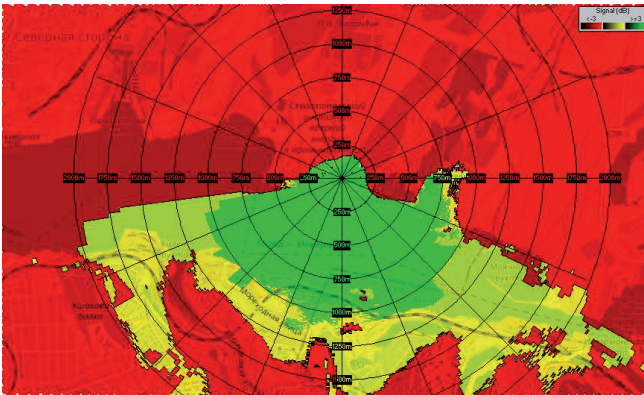


Рис. 2. Севастопольская бухта с указанием места размещения береговой радиосистемы.



а



б

Рис. 3. Результаты моделирования зоны покрытия Wi-Fi при возвышении судовой антенны на 2 м (а) и 10 м (б) над уровнем моря.

и 10 м (Рис. 3б) над уровнем моря. Зеленым цветом обозначена зона уверенного приема, желтым – неуверенного приема, красным – отсутствие радиосвязи.

В обоих рассмотренных случаях наблюдаются участки морской поверхности с нарушением радиосвязи. При этом увеличение высоты возвышения береговой антенны над подстилающей поверхностью приводит к увеличению количества и протяженности этих участков с подавлением радиосвязи.

Для сравнения также выполнено моделирование зоны покрытия при использовании для организации связи системы 4G/LTE со следующими характеристиками, отличающимися от предыдущего случая:

- диапазон частот: 1.92 – 2.17 ГГц, Band 1, используется в России;
- ширина радиоканала: 5 – 20 МГц.

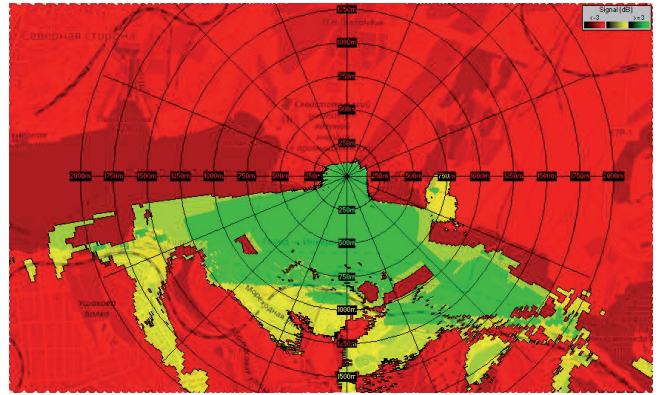


Рис. 4. Результаты моделирования зоны покрытия 4G/LTE при возвышении судовой антенны на 2 м.

На Рис. 4 показаны результаты моделирования зоны покрытия 4G/LTE при возвышении береговой антенны на 1 м над подстилающей поверхностью и при возвышении судовой антенны на 2 м.

3. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ЛИНИИ БЕРЕГ-РЕТРАНСЛЯТОР

Для радикального и высокоэффективного решения проблемы с замираниями на трассе при сохранении возможности предоставления информационно емких канал связи для большого количества подвижных морских объектом рассмотрен вариант применения базового ретранслятора, поднимаемого в воздух над морем с применением беспилотного летательного аппарата или дирижабля. При этом над морем может быть организована сеть ретрансляторов для решения различных телекоммуникационных задач. Наиболее емким каналом связи будет канал на линии базовый ретранслятор – берег. Повышение информационной емкости этого канал возможно за счет применения беспроводной оптической системы связи.

Наземные беспроводные оптические системы связи в режиме «точка-точка» (FSO, Free Space Optic) [7] работают на инфракрасных, ультрафиолетовых и ультрафиолетовых частотах оптического спектра. Системы FSO используют лазерную технологию для передачи сигнала. На Рис. 5 представлена предлагаемая к рассмотрению схема

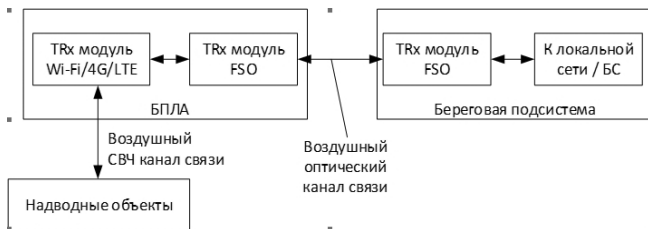


Рис. 5. Схема организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO на линии «Берег-БПЛА».

организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO на линии «Берег-БПЛА».

На Рис. 6 показана базовая структурная схема системы FSO. Благодаря оптическому формированию луча возможна связь на большие расстояния с использованием систем FSO. Первоначально исходная информация кодируется. Оптический источник, используемый в системах FSO, должен обеспечивать сравнительно высокую оптическую мощность в широком диапазоне рабочих температур. Важными характеристиками оптического передатчика в системах FSO являются размер, мощность и качество луча, которые определяют интенсивность лазера и минимальное расхождение, получаемое от системы [8]. Лицевая часть приемника содержит оптические фильтры с линзой для сбора и фокусировки принятого луча на фотодиоде. Затем выходной ток фотодиода преобразуется в напряжение. Фильтр нижних частот используется для ограничения уровней теплового и фоновых шумов. Наконец, демодулятор выполняет необходимый процесс демодуляции для получения исходных отправленных данных.

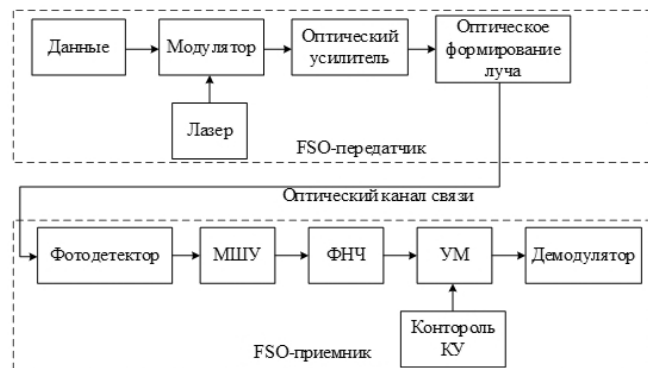


Рис. 6. Базовая структурная схема системы FSO.

Одним из главных ограничений применения беспроводного оптического канала связи в структуре высокоскоростных цифровых телекоммуникационных радиосистем является потенциально большое время простоя этих систем в неблагоприятную погоду, ограничивающую видимость. Вопросу сравнения атмосферного ослабления оптического сигнала с различной длиной волны посвящена работа [9] и др. Обширный поиск в литературе и некоторые расчеты полного рассеяния света на шаровых частицах показывают, что 1550 нм, 850 нм и 785 нм фактически одинаково ослабляются в тумане.

В [10] исследуется влияние канала связи на погонные ослабления оптического сигнала на различных оптических длинах волн. Для расчета погонного ослабления на трассе получено выражение

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}$$

где σ – коэффициент атмосферного ослабления (или рассеяния); V – видимость (в км); q – распределение рассеивающих частиц по размерам: $q = 1.6$ – для большой видимости ($V > 50$ км); $q = 1.3$ – для средней видимости ($6 > V > 50$ км); $q = 0.6V + 0.34$ – для видимости в дымке ($1 > V > 6$ км); $q = V - 0.5$ – для видимости в тумане ($0.5 > V > 1$ км); $q = 0$ – для видимости в тумане ($0.5 > V$ км).

В Таблице 1 представлены зависимости коэффициента атмосферного ослабления от дальности видимости и состояния атмосферы.

Таблица 1

Зависимости коэффициента атмосферного ослабления от дальности видимости и состояния атмосферы

Дальность видимости, км	σ , дБ/км при $\lambda = 785$ нм	σ , дБ/км при $\lambda = 785$ нм	Погода
0.05	340	340	Туман
0.2	85	85	
0.5	34	34	
1	14	10	Дымка
2	7	4	
4	3	2	
10	1	0.4	Ясная погода
23	0.5	0.2	

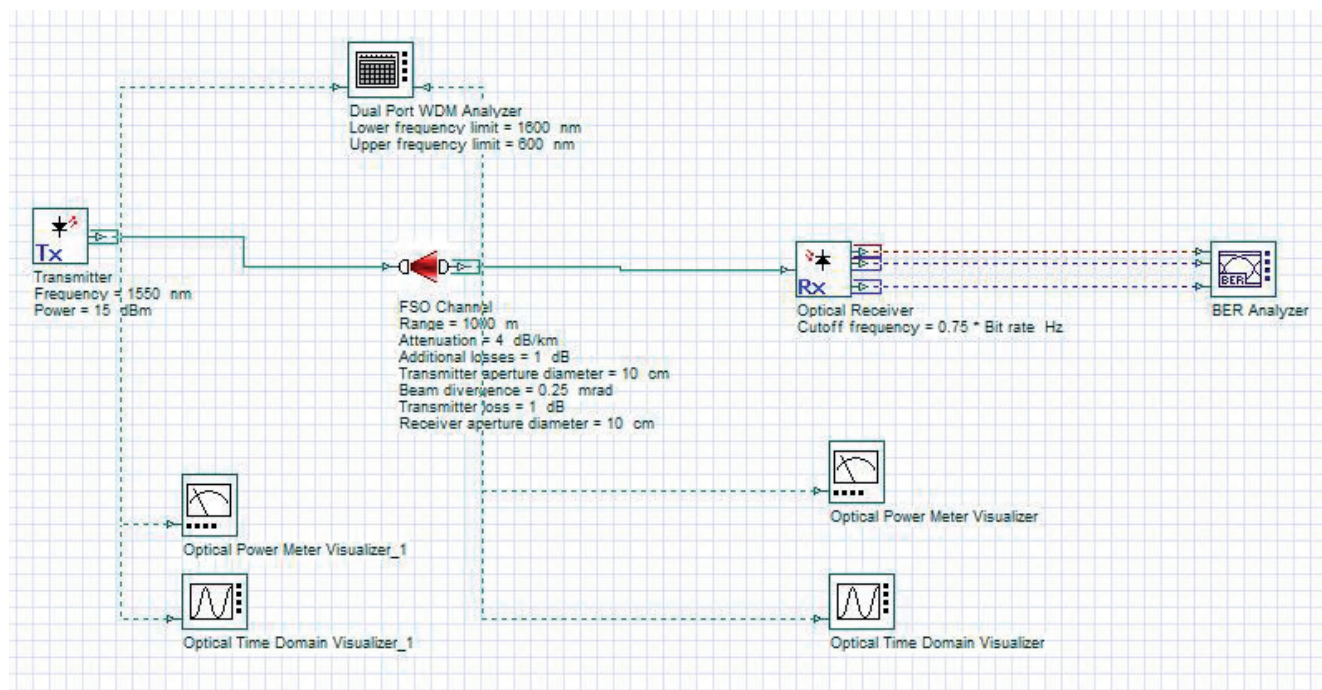


Рис. 7. Модель беспроводного канала FSO системы в САИР.

Модель упрощенного варианта организации беспроводного оптического канала связи FSO системы показана на Рис. 7, где оптическая несущая моделируется линейной цифровой последовательностью с NRZ-кодированием.

Анализ допустимой протяженности канала связи проводился при параметрах:

- длина волны оптического излучения 1550 нм;
- скорость передачи данных 1 – 10 Гбит/с;

$$- \sigma_1 = 4 \text{ дБ/км и } \sigma_2 = 85 \text{ дБ/км.}$$

Результаты анализа в виде глаз-диаграмм представлены на Рис. 8.

Для повышения помехозащищенности беспроводного оптического канала связи и энергетической эффективности использования полосы спектра сигнала рассмотрим применение QAM и OFDM.

Расчеты параметров OFDM-сигналов для различных телекоммуникационных систем (ТКС) представлены в Таблице 2.

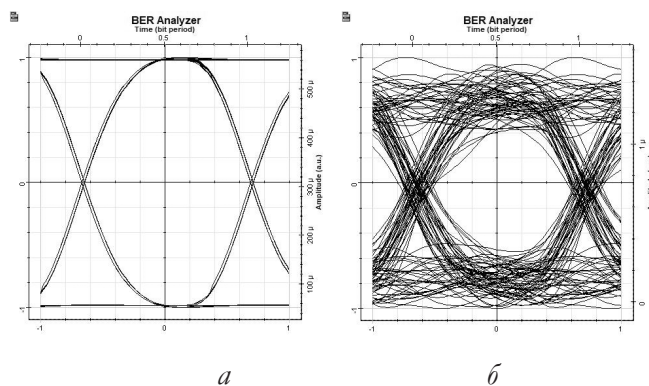


Рис. 8. Глаз-диаграммы для базовой модели FSO канала связи при длине волны 1550 нм, ослаблении в канале связи 85 дБ/км, скорости передачи данных 1 Гбит/с: дистанция 150 м, Q=614 (а); дистанция 420 м, Q=6 (б).

Таблица 2

Параметры OFDM-сигналов для различных телекоммуникационных систем

ТКС	Ширина канала, МГц	Размер FFT	$T_{sym}, \mu s$	$\Delta f_{car}, \text{кГц}$
LTE(4G)	20	1024, 2048	66.7	15
Wi-Fi 4	20, 40	64, 128	3.6 (с короткими интервалами) 4 (с длинными интервалами)	312.5
Wi-Fi 5	20, 40, 80, 160	64, 128, 256, 512	3.2	312.5
Wi-Fi 6	20, 40, 80, 160	64, 128, 256, 512, 1024, 2048	12.8	78.125

В методе OFDM используются различные методы модуляции, позволяющие в одном дискретном состоянии сигнала (символе) закодировать несколько информационных битов. Так, в стандарте IEEE 802.11a используются двоичная и квадратурная фазовые модуляции (BPSK и QPSK), в стандарте IEEE 802.11b – двоичная (BDPSK) и квадратурная (QDPSK) относительная фазовая модуляция.

Максимальный уровень модуляции:

- в стандарте IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) – 64-QAM;
- в стандарте IEEE 802.11ac Wave 2 (Wi-Fi 5) – 256-QAM;
- в стандарте IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) – 1024-QAM.

Второй вариант организации удаленного широкополосного канала связи с применением FSO представлен на Рис. 7. Здесь FSO обеспечивает высокоскоростную передачу цифрового потока данных с OFDM между береговой подсистемой и БПЛА, ретранслятор которого обеспечивает требуемую зону покрытия для совместной работы группы беспилотных надводных аппаратов.

Модель FSO системы с QAM и OFDM для цифрового исходного потока данных показана на Рис. 9.

Параметры модели FSO системы:

- скорость передачи данных: 10 Гбит/с;
- QAM-модуляция цифрового сигнала: 16QAM;
- помехозащищенное кодирование: код Грея;
- параметры OFDM:
 - количество поднесущих: 128;
 - количество точек префикса: 10;
 - номера информационных поднесущих: 25-104.
- пилотные сигналы на поднесущих с номерами: 25, 44, 64, 84, 104.

В модели на Рис. 9 применяется подсистема модели квадратурного электрооптического модулятора (Рис. 10), реализованного на основе двух электрооптических модуляторов Маха-Цандера.

В схеме на два канала подаются управляющие I-Q сигналы, на выходе одного из модуляторов оптический сигнал сдвинут по фазе на 90° .

Так как для построения FSO применяется когерентная оптическая схема канала связи,

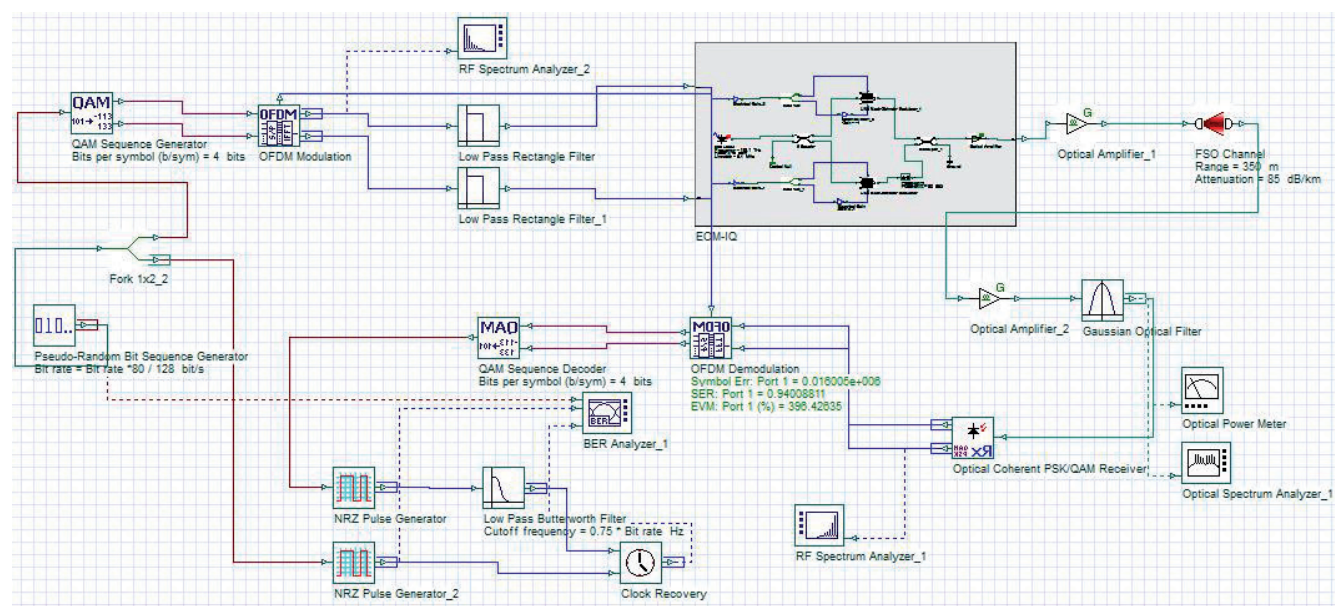


Рис. 9. Модель FSO системы с QAM и OFDM.

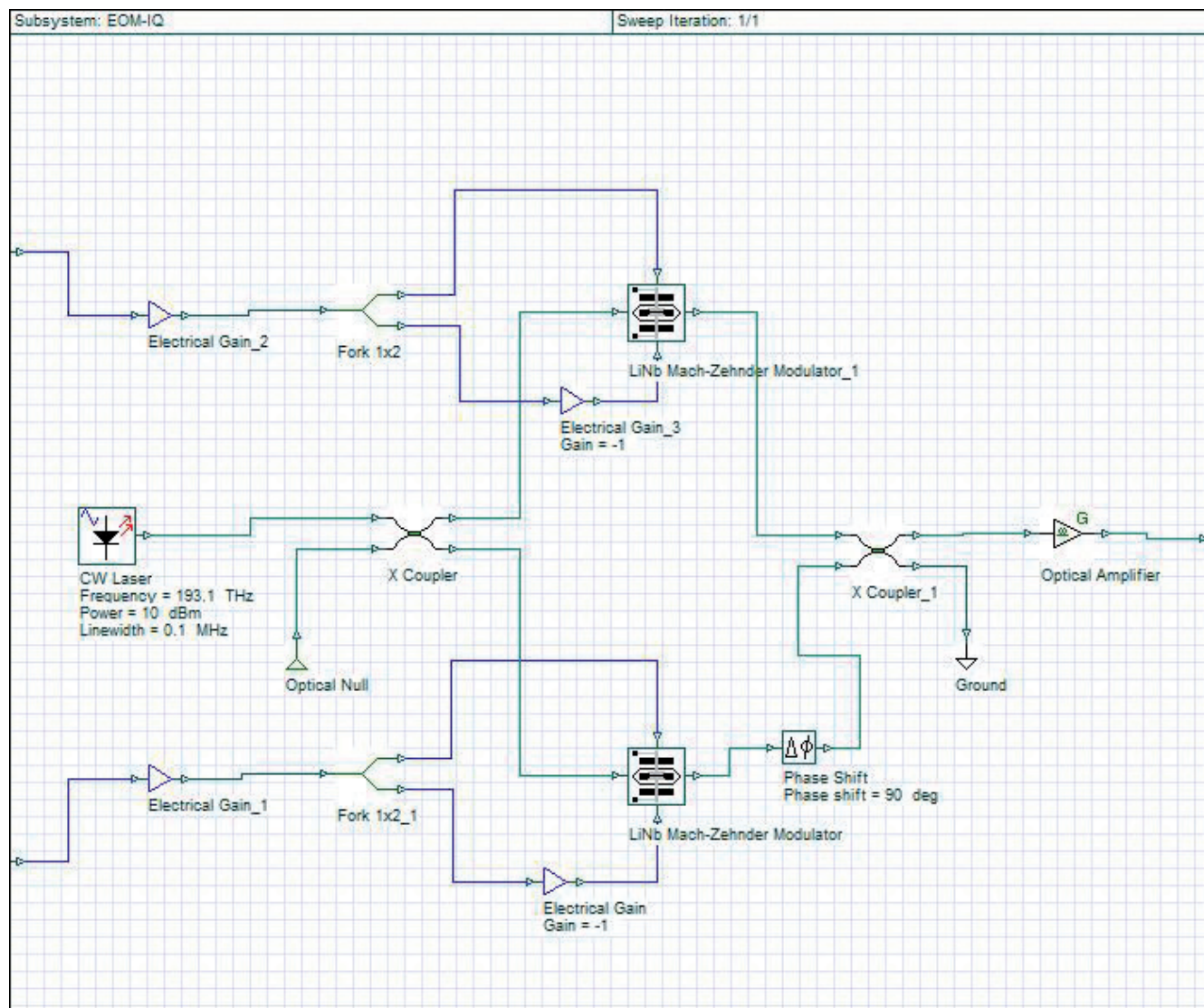


Рис. 10. Подсхема модели квадратурного электрооптического модулятора.

то в качестве приемника применяется когерентный оптический приемный модуль, на входе которого установлен полосно-пропускающий оптический фильтр с полосой пропускания 25 ГГц. На Рис. 11 показана глаз-диаграмма для случая оптического канала связи протяженностью 350 м при погонном поглощении в атмосфере 85 дБ/км.

Энергетические характеристика FSO системы корректируются двумя эрбиевыми волоконными усилителями (Optical Amplifier_1 и Optical Amplifier_2 – на Рис. 9), усиление которых может регулироваться для настройки значения бюджета оптического

тракта FSO системы на воздушной трассе требуемой протяженности.

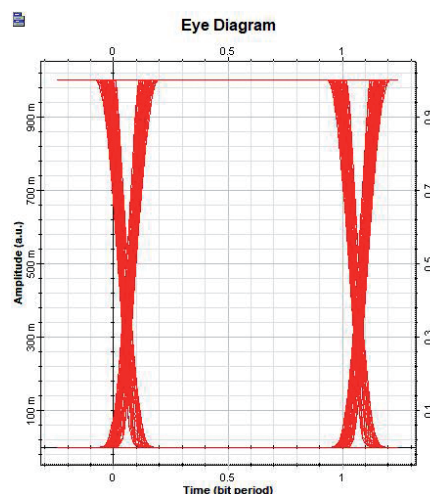


Рис. 11. Глаз-диаграммы, измеренная на приборе BER_Analyzer_1 (см. рис. 9).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что для организации судоходства в прибрежной зоне с применением передовых телекоммуникационных технологий перспективным является применение беспроводной оптической связи на линии берег – опорный ретранслятор. С берега на ретранслятор в боковой полосе оптической несущей передается цифровой поток данных с 16QAM и OFDM. На ретрансляторе осуществляется радиообмен с судами. Сам ретранслятор размещается на беспилотном летательном аппарате или на дирижабле.

Предложена организация оптического канала с применением технологии FSO, которая позволяет на протяженной трассе передавать данные с большой скоростью. При построении модели передающего тракта оптической системы применен подход, при котором оптическая несущая моделируется в квадратуре на двух электрооптических модуляторах, то есть беспроводная FSO-система является когерентной. В передающем блоке TRx модуля FSO-системы это освобождает от необходимости переноса промоделированного цифрового сигнала на радиочастотную поднесущую для модуляции интенсивности излучения лазера. При этом в приемном блоке TRx модуля FSO-системы не требуется применять синхронный СВЧ детектор.

Такое применение оптической связи позволяет повысить емкость радиоканалов, предоставляемых судам, существенно повысить электромагнитную совместимость различных радиосистем, создает защищенный канал связи. Показано, что при неблагоприятных погодных условиях на воздушной трассе берег-опорный ретранслятор протяженностью более 300 м можно передавать данные со скоростью не менее 10 Гбит/с, что позволит организовать сеть воздушных ретрансляторов для решения перспективных задач e-Навигации, для организации работы морского Интернета вещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. E-NAVIGATION STRATEGY IMPLEMENTATION PLAN – UPDATE 1 (MSC.1/Circ.1595) [Online] Available: <https://iho.int/uploads/default/m/s/msc-circ1595-e-navigation-strategy-implementation-plan-update-1-secretariat.pdf>, access data 12.10.2023.
2. Пинский АС. E-Навигация и безэкипажное судоходство. *Транспорт Российской Федерации*, 2016, 4(65):50-54.
3. Скварник ИС, Совкова ОИ, Стаценко ЛГ, Турмов ПП. Технологии беспроводного широкополосного доступа: оценка возможности применения для управления движением судов. *Вестник инженерной школы ДВФУ*, 2019, 4(41):113-124.
4. Ali H-F, Kexiong Z, Yaling Y, Majid M. A Self-Sustaining Maritime Mesh Network. *Proc. of United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, 2019: 1-2. DOI: 10.23919/USNC-URSI-NRSM.2019.8713132.
5. Zainuddin Z, Wardi, Nantan Y. Applying Maritime Wireless Communication to Support Vessel Monitoring. *Proc. of 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2017: 158-161. DOI: 10.1109/ICITACEE.2017.8257695.
6. Рекомендация МСЭ-R P.527-4. Электрические характеристики земной поверхности. Международный союз электросвязи. [Online] Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-4-201706-S!!PDF-R.pdf, access data 12.10.2023.
7. Uysal M, Nouri H. Optical wireless communications – an emerging technology. *Proc. of 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2014:7. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876267.
8. Khalighi M, Uysal M. Ali Survey on free space optical communication: a communication theory perspective. *IEEE Communication*

- Surveys & Tutorials*, 2014, 4(16):2231-2258.
DOI: 10.1109/COMST.2014.2329501.
9. Szajowski PF, Nykolak G, Auburn JJ, Presby HM, Tourgee GE, Korevaar E, Schuster J, Kim II. 2.4 km free-space optical communication 1550 nm transmission link operating at 2.5 Gb/s – experimental results. *Proc. of SPIE Conf. Optical Wireless Communications*, 1999:29-40. DOI: 10.1117/12.338979.
10. Kim II, McArthur B, Korevaar EJ. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Proc. of SPIE Conf. Optical Wireless Communications*, 2001:26-37. DOI: 10.1117/12.417512.

Афонин Игорь Леонидович

д.т.н., профессор

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: ilafonin@mail.sevsu.ru

Головин Владислав Викторович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: vvgolovin@mail.sevsu.ru

Ткаченко Михаил Олегович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: motkachenko@mail.sevsu.ru

Тыщук Юрий Николаевич

доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: yntyshchuk@mail.sevsu.ru

Поляков Александр Леонидович

к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: alpolyakov@mail.sevsu.ru

Слезкин Геннадий Витальевич

ассистент

Севастопольский государственный университет

Севастополь 299053, Россия

E-mail: gvslezkin@mail.sevsu.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.307

Критерии совмещения изображений в двухкамерной системе технического зрения

Диязитдинова А.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, <https://www.psuti.ru/>
Самара 443010, Российская Федерация

E-mail: a.diyazitdinova@psuti.ru

Поступила 06.11.2023, рецензирована 13.11.2023, принята 20.11.2023, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Совмещение изображений является важной задачей в системах технического зрения. Двухкамерные системы проводят съемку одной и той же сцены, поэтому изображения содержат один и тот же сигнал. Эта особенность определяет возможные критерии для совмещения изображений. В работе исследуются три критерия совмещения изображений: критерий, основанный на коэффициенте корреляции; критерий, основанный на количестве совпавших точек контурных линий; критерий, основанный на количестве совпавших особых точек. Для исследования была разработана методика для проведения численного моделирования. Результаты моделирования показали, что наиболее помехоустойчивым является критерий на основе коэффициента корреляции, но он требует наибольшего времени обработки. Критерий, основанный на совпадении точек контурных линий, является наименее помехоустойчивым. Критерий на основе совпадения особых точек менее помехоустойчивый, чем критерий по коэффициенту корреляции, но он требует наименьшего времени обработки.

Ключевые слова: критерий, совмещение, двухкамерная система, техническое зрение, время обработки, помехоустойчивость, численное моделирование

УДК 681.518

Для цитирования: Диязитдинова А.А. Критерии совмещения изображений в двухкамерной системе технического зрения. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):307-314. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.307.

Criteria for image superposition in a two-camera technical vision system

Alfiya A. Diyazitdinova

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, <https://www.psuti.ru/>
Samara 443010, Russian Federation

E-mail: a.diyazitdinova@psuti.ru

Received November 06, 2023, peer-reviewed November 13, 2023, accepted November 20, 2023, published April 25, 2024

Abstract: The image superposition is the important task in machine vision system. The scene which is shot by two-camera system is the same for each camera. So the images of each camera contain the same signal. This feature defines the possible criteria for image superposition. The research tests three criteria of superposition. These are criteria by correlation coefficient, the amount of the match contour points and the amount of match feature points. The numerical simulation was developed for this research. The results of simulation identified that the correlation coefficient criteria is the most noise resistance, but it demand the greatest processing time. The amount of match contour points criteria is the least noise resistance. The amount of match feature point's criteria is better, than correlation coefficient criteria by noise resistance, and processing time is the least.

Keywords: criteria, superposition, two-camera system, machine vision, processing time, noise resistance, numerical simulation

UDC 681.518

For citation: Alfiya A. Diyazitdinova. Criteria for image superposition in a two-camera technical vision system. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(2):307-314e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.307.

Содержание

1. Введение (308)
 2. Обзор релевантных работ (308)
 3. Методика совмещения (309)
 4. Критерии совмещения (310)
 5. Методика проведения численного моделирования (311)
 6. Выводы (312)
 7. Заключение (313)
- Литература (314)**

1. ВВЕДЕНИЕ

Обработка сигналов в двухкамерных системах технического зрения представляет собой актуальную тему исследования. Двухкамерные системы представляют собой важный частный случай многокамерных систем, на которых можно отрабатывать различные алгоритмы обработки изображений с целью дальнейшего обобщения на случай n -камерной системы. Наиболее известными примерами прикладного применения подобных систем являются:

1. Повышение качества изображения. Съемка одной сцены с помощью камер с разными фокусными расстояниями позволяет формировать качественное изображение в большом диапазоне расстояний. Подобная система имеет гораздо меньшие габариты, чем система с механическим измерением фокусного расстояния объектива ("оптический зум"). А в сравнении с системой, использующей методы сверхразрешения на основе интерполяции ("цифровой зум") [1], такая система характеризуется более высоким качеством изображения.

2. Восстановление трехмерной формы объекта по двумерным проекциям (изображениям): реконструкция зданий, определение положения контактных проводов на трамвайном и железнодорожном транспорте, восстановление позы человека [2], трехмерная реконструкция местности с помощью беспилотных летательных аппаратов [3,4].

3. Построение панорамных сцен для получения расширенного поля зрения по сравнению с полем зрения отдельных камер [5,6].

Решение этих задач связано с совмещением изображений. Так как съемка двумя камерами проводится синхронно, то изображения в пересекающемся фрагменте содержат одинаковый двумерный сигнал (примечание: это предположение верно в том случае, если сцена является "условно плоской" и съемка под разными ракурсами эквивалентна проективной трансформации изображений).

Эта особенность определяет следующие критерии совмещения:

- по максимуму коэффициента корреляции (примечание: аналогичный критерий минимума евклидова расстояния требует предварительной нормировки для подавления аддитивной и мультипликативной составляющих [7];
- по максимуму совпадающих контурных точек [8,9];
- по максимуму совпадающих особых точек [10,11].

В зависимости от критерия алгоритм совмещения будет обладать определенной помехозащищенностью и временем обработки.

Необходимо отметить, что требования к алгоритмам совмещения очень высокие и для работы в системах технического зрения предполагают обработки в режиме реального времени.

Однако это требование может быть выполнено, если, во-первых, выбранный критерий обеспечивает соответствующее быстродействие, а во-вторых, отношение мощности сигнала к мощности помех выше некоторого порога, определяющего потенциальную помехозащищенность критерия. В противном случае решение задачи с требуемым временем обработки, но для сильно зашумленных изображений, не может быть получено.

Исходя из этих предпосылок, для задачи совмещения актуальными вопросами являются:

- формирование рекомендаций по выбору критерия в зависимости от отношения сигнал/шум,
- прогнозирование времени обработки в зависимости от критерия.

Исследованию этих вопросов посвящена данная статья.

2. ОБЗОР РЕЛЕВАНТНЫХ РАБОТ

Так как в системах технического зрения основным требованием является ограниченное время обработки изображений, то исследователи искали различные способы для сокращения количества проверяемых гипотез, а также учитывали статистические и геометрические особенности изображений, которые позволяли перейти от переборных к аналитическим подходам.

В работе [12,13] предложено использовать сжатие изображений на основе «пирамидного представления», чтобы в несколько раз повысить рабочий диапазон аналитического метода оценки смещений на основе оптического потока.

Однако этот способ используется для совмещения последовательности изображений при слежении за движущимся объектом и практически не используется при совмещении изображений, существенно отличающихся масштабом.

В работе [9,14] исследователями предложена идея использовать проверку гипотез на основе сопоставления особых точек контура, а в качестве метрики – количество совпавших точек контура. Однако количество гипотез даже на ограниченном количестве точек было очень велико, и разработанные алгоритмы были направлены на решение задачи в режиме "пост обработки". Однако описанная идея может быть модернизирована, чтобы существенно снизить время обработки: формировать гипотезы не простым перебором, а направленным. Например, с помощью предварительно рассчитанных дескрипторов.

По такому принципу работают алгоритмы [15,16,17], которые позволяют выявить однозначные пары особых точек. Недостаток этого подхода заключается в том, что существует достаточно высокая вероятность неверного сопоставления особых точек. По исследованию самих исследователей эта вероятность в среднем не менее 0.05.

Для решения этой проблемы широкое применение получил метод RANSAC (random sample consensus) [17,18,19], который ориентирован на формирование ограниченного числа гипотез, который позволяет многократно уменьшить вероятность неверного сопоставления.

Среди способов, снижающих вероятность неверного сопоставления особых точек, достаточно часто используется прием предварительной отбраковки фрагментов, если они являются неинформативными. Как правило, неинформативными являются фрагменты, у которых все элементы (пиксели) принадлежат очень узкому диапазону яркости. Похожим примером "неинформативности" является дисперсия фрагмента ниже некоторого порога [20].

Еще одним способом [21], который позволяет существенно повысить скорость обработки, является совмещение с помощью проекций (суммы яркости вдоль строк/столбцов). Однако значительная производительность этого способа достигается только при обработке достаточно крупных изображений.

Несмотря на то, что существует достаточно много работ, направленных на решение задачи повышения скорости обработки при совмещении изображений, в них не проводится сравнительного анализа помехоустойчивости и скорости обработки, которые зависят от выбранного критерия, а основной упор в работах делается на изложение разработанных алгоритмов, методик и методов, позволяющих решить прикладную задачу.

Для систематизации этой области исследования была разработана соответствующая методика, целью которой является установление взаимосвязи между помехоустойчивостью, временем обработки и критерием совмещения.

3. МЕТОДИКА СОВМЕЩЕНИЯ

Для совмещения изображений была разработана методика [22], на основе сопоставления особых точек изображения. В отличие от известного алгоритма SIFT (scale-invariant feature transform) дескриптор точки получается в результате логарифмически-полярного преобразования окрестности особой точки.

Как было сказано выше, рассматривается случай совмещения изображений, которые связаны проективной моделью преобразования.

Проективная трансформация описывается как:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + 1}, \\ y' &= \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + 1}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $h_{11}, h_{12}, \dots, h_{32}$ – это параметры проективного преобразования.

Так как проективная модель описывается восемью параметрами, то для оценки параметров совмещения необходимо иметь не менее четырех точек (две координаты для каждой точки), чтобы сформировать систему из восьми линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1x'_1 & -y_1y'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1y'_1 & -y_1x'_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2x'_2 & -y_2y'_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2y'_2 & -y_2x'_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3x'_3 & -y_3y'_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -x_3y'_3 & -y_3x'_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4x'_4 & -y_4y'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -x_4y'_4 & -y_4x'_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \\ x'_4 \\ y'_4 \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Для уменьшения вероятности неверного сопоставления дополнительно были введены геометрические ограничения, которые

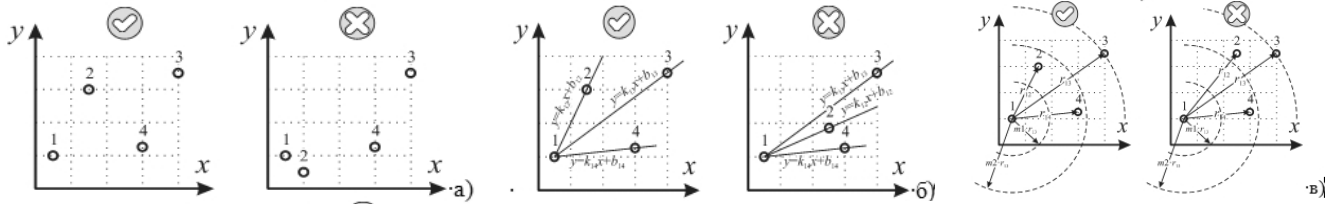


Рис. 1. Геометрические ограничения: ограничение на взаимное расположение точек (а), ограничение по углу наклона (б), ограничение по расстоянию (в)

учитывают взаимное расположение особых точек на изображениях.

Эти ограничения были сформулированы в соответствии с предположением, что если четыре точки на первом изображении образуют выпуклый четырёхугольник, то эти же четыре точки на втором (совмещаемом) изображении также будут образовывать выпуклый четырёхугольник.

На Рис. 1 показаны геометрические ограничения.

Физический смысл геометрических ограничений заключается в следующем:

1. Ограничение на взаимное расположение точек означает, что точка "1" должна иметь минимальное значение координат по обеим осям, а точка "3" – максимальное.

2. Ограничение по углу наклона означает, что прямая линия, проходящая через точки "1" и "3", должна располагаться между прямыми линиями, проходящая через точки "1" и "2", "1" и "4".

3. Ограничение по расстоянию означает, что расстояние между точками "1" и "3" (r_{13}) должно быть больше, чем "1" и "2" (r_{12}), "1" и "4" (r_{14}), а также расстояния r_{12} и r_{14} должны принадлежать интервалу $[m_1 \cdot r_{13}, m_2 \cdot r_{13}]$, где m_1, m_2 – множители ($m_1 = 0.4; m_2 = 0.6$).

Также для уменьшения времени обработки была использована концепция “уникальных” особых точек, как в SIFT: если на изображении существует два похожих фрагмента в окрестности найденных особых точек, то такие особые точки удаляются из анализа. Это гарантирует формирование только одной пары точек, которую можно сопоставить между изображениями. Если бы возможных пар было больше, то это приводило бы к значительному увеличению количества гипотез.

Для борьбы с неправильными сопоставлениями пар точек, которые неизбежно возникают при обработке изображений, использовался метод RANSAC. Согласно RANSAC проверяется только ограниченное количество гипотез. В работе использовалось 100 гипотез для проверки.

4. КРИТЕРИИ СОВМЕЩЕНИЯ

Выбор гипотезы в качестве решения определяется критерием.

В работе исследовалось три критерия:

1. Максимум коэффициента корреляции:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} (R(\theta)), \tag{3}$$

где θ – это гипотеза, представляющая собой совокупность параметров преобразования для совмещения изображений; для проективного совмещения: $\theta = \{h_{11}, h_{12}, \dots, h_{32}\}$; $R(\theta)$ – коэффициент корреляции, соответствующий гипотезе θ ; $\hat{\theta}$ – оценка параметров совмещения.

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\left(\sum_{i=1}^N F(x_i, y_i) \cdot G^*(x_i, y_i) \right) / N - \left(\left(\sum_{i=1}^N F(x_i, y_i) \right) / N \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N G^*(x_i, y_i) \right) / N}{\left[\left(\sum_{i=1}^N F^2(x_i, y_i) \right) / N - \left(\left(\sum_{i=1}^N F(x_i, y_i) \right) / N \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^N G^{*2}(x_i, y_i) \right) / N - \left(\left(\sum_{i=1}^N G^*(x_i, y_i) \right) / N \right)^2 \right]^{1/2}}$$

где $F(x_i, y_i)$ – первое изображение; $G^*(x_i, y_i)$ – второе изображение после преобразования в соответствии с гипотезой θ ; (x_i, y_i) – координаты пикселей; N – количество пикселей.

2. Максимум совпавших контурных точек:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} (S(\theta)), \tag{5}$$

где $S(\theta)$ – количество совпавших контурных точек, соответствующее гипотезе θ .

Совпадение контурных точек не может быть вычислено аналитически, как в случае с коэффициентом корреляции. Совпадение точек определяется в результате обработки. Для каждой точки контура № 1 рассчитывается расстояние до всех точек контура № 2, и определяется "ближайшая". Если расстояние между "ближайшими" точками меньше некоторого порога, то точки можно считать совпавшими.

Однако расчет расстояний между всеми точками является слишком затратным в вычислительном плане операций. По этой причине после преобразования контура № 2 в соответствии с гипотезой θ положение всех точек округляется до целых чисел, после чего достаточно проверить окрестность точки контура № 1 (Рис. 2), чтобы установить факт

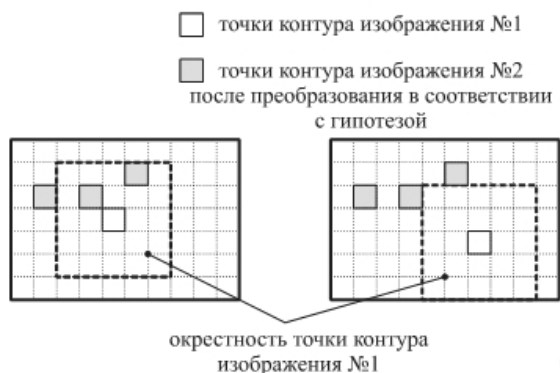


Рис. 2. Принцип совпадение контурных точек на изображениях: совпадают (слева) и не совпадают (справа).

совпадения контурных точек. Размер окрестности определяется порогом.

На Рис. 2 показано два возможных варианта. На изображении слева в окрестности точки контура № 1 находятся две точки контура № 2, что означает, что хотя бы одна из них будет являться совпадением, а на изображении справа в окрестности нет ни одной точки, то есть совпадение отсутствует.

3. Максимум совпавших особых точек:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} (B(\theta)), \tag{6}$$

где $B(\theta)$ – количество совпавших особых точек, соответствующее гипотезе θ .

Количество совпавших особых точек определяется аналогичным образом, как и в случае с контурными точками.

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования были выбраны по 100 изображений трех различных видов:

- здания домов, характеризующихся наличием периодически повторяющихся текстурных фрагментов (например, изображениями окон);
- поверхность земли, снятая с борта беспилотного летательного аппарата и в результате дистанционного зондирования, характеризующаяся наличием участков с однородной яркостью (примечание:

с точки зрения обработки такие участки характеризуются "пониженной информативностью");

- сцены природы (горы, озера, холмы и т.д.), характеризующиеся отсутствием периодически повторяющихся текстурных фрагментов.

На Рис. 3 приведен пример изображения [23] со сценой природы и результат совмещения.

Для определения погрешности совмещения к изображениям добавляется шум с заданной дисперсией в соответствии с выбранным значением отношения сигнал/шум, после чего запускалась процедура совмещения.

Дисперсия шума D_n рассчитывалась следующим образом:

$$D_n = \frac{D_s}{h^2}, \tag{7}$$

где D_s – дисперсия, вычисленная по яркости пикселей изображения; h^2 – отношение сигнал/шум.

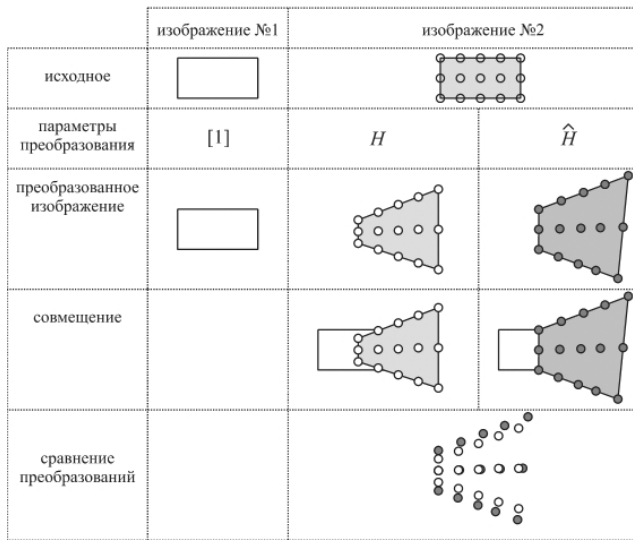
Результаты эксперимента с одинаковой мощностью шума усреднялись. В результате были построены графики зависимости погрешности от отношения сигнал/шум и в зависимости от критерия.

Сравнение различных критериев проводилось путем сравнения с эталонным совмещением (примечание: эталонное совмещение определялось при отсутствии шума). Для этого была разработана методика оценки погрешности. Принцип сравнения различных совмещений показан на Рис. 4. На исходное изображение накладывалась "сетка". При совмещении изображений положение точек сетки меняется в соответствии с параметрами совмещения. Чем меньше положение точек сетки, полученной при работе алгоритма, будет отличаться от положения точек эталонной сетки, тем меньше будет погрешность. Количественной мерой является значение среднеквадратичной величины:

$$SKV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}, \tag{8}$$



Рис. 3. Пример обрабатываемых изображений и совмещение



[1] - отсутствие преобразования
 H - эталонное преобразование
 \hat{H} - преобразование, оцененное в результате алгоритма
 ○ - точка сетки для эталонного совмещения
 ● - точка сетки для совмещения, полученного при работе алгоритма

Рис. 4. Вычисление погрешности совмещения.

где (x_i, y_i) – координаты сетки для эталонного совмещения; (\hat{x}_i, \hat{y}_i) – координаты сетки для совмещения, полученной при работе алгоритма; N – количество точек в сетке.

Результаты численного моделирования для трех изображений (по одному из каждого вида) показаны на Рис. 5.

Примечание: \overline{SKV} – значение среднеквадратичной величины, усредненной для экспериментов с одинаковой мощностью шума.

В Таблице 1 показано относительное время обработки для рассмотренных критериев.

В эксперименте участвовали изображения с различным разрешением и различным «перекрытием», что существенно влияет на время обработки даже при использовании одного критерия. Поэтому в таблице указаны измерения в относительных единицах, где значение "1" соответствует наименьшему времени обработки.

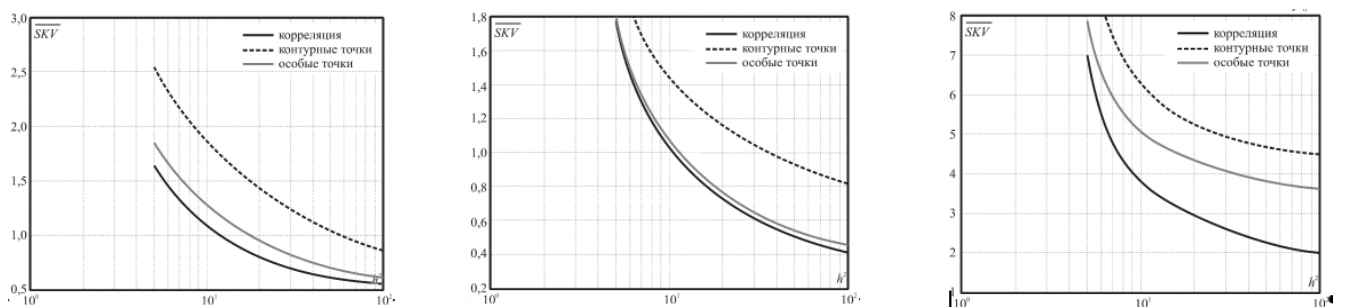


Рис. 5. Зависимость погрешности от отношения/сигнал шум для изображений: здания домов (а), поверхность земли (б), сцена природы (в)

Таблица 1

Относительное время обработки			
Критерий	Максимум коэффициента корреляции	Максимум совпавших контурных точек	Максимум совпавших особых точек
Относительное время обработки	500...2000	20...800	1

6. ВЫВОДЫ

Исходя полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

1. Критерий максимума коэффициента корреляции обладает наибольшей помехоустойчивостью, а критерий максимума совпавших контурных точек обладает наименьшей помехоустойчивостью.

2. Критерий максимума совпавших особых точек характеризуется минимальным временем обработки, а критерий максимума коэффициента корреляции – наибольшим временем.

3. Сравнение критериев по погрешностям выявило только качественные различия между критериями совмещения, но при этом четких количественных значений выявить не удалось в результате простого сравнения полученных графиков. Однако более детальный анализ совмещаемых изображений выявил следующие закономерности:

– на критерий максимума коэффициента корреляции наибольшее “негативное” влияние оказывают фрагменты с низкой информативностью – однородные по яркости фрагменты; такие фрагменты можно совмещать самым различным образом и при этом вклад в коэффициент корреляции будет существенным независимо от параметров совмещения; другими словами, два однородных фрагмента можно совмещать самыми различными способами и в каждом случае они будут похожи;

– на критерий максимума совпавших контурных точек отрицательно влияет значительное

количество распознанных контурных точек; в отличие от критерия максимума коэффициента корреляции, в котором каждый пиксель изображения несет информацию о яркости, и по совокупности нескольких пикселей можно судить о «совпадении» фрагментов, в критерии максимума совпавших контурных точек – чем больше контурных точек, тем выше вероятность случайного совпадения точек контуров совмещаемых изображений.

4. При использовании критерия совпавших контурных точек целесообразным является выявление информативных контуров, чтобы обеспечивать качественное совмещение изображений; однако вопрос о том, как определять информативность контура является открытым. Например, в работе [9] для совмещения изображений поверхности земли был разработан метод, позволяющий предварительно выявлять контуры, принадлежащие одному и тому же объекту, вместо использования "стандартных" алгоритмов [24].

Другим примером использования "информативных" контуров являются работы по совмещению медицинских изображений (изображений УЗИ, МРТ и т.д.) [14], где на изображении, фактически, имеется только один контур, ограничивающий человеческий орган.

5. Наиболее перспективным, как с точки зрения помехоустойчивости (на Рис. 5а и Рис. 5б графики погрешности для критерия корреляции и особых точек располагаются близко друг к другу), так и с точки зрения времени обработки, является критерий максимума совпавших особых точек. Особые точки не располагаются на однородных по яркости фрагментах, и количество особых точек можно автоматически регулировать с помощью порога, чтобы уменьшить вероятность случайного совпадения точек, как в случае с контурами.

6. Представленная методика расчета погрешности совмещения является универсальной, что позволяет проводить сравнение не только различных критериев, но и различных алгоритмов совмещения, так как проводится сравнение не самих изображений (общего фрагмента), а искажений, к которым приводят параметры совмещения.

7. Представленная методика позволяет оценивать границы по значению отношения сигнал/шум при заданной "допустимой"

погрешности совмещения для различных критериев совмещения.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был рассмотрен вопрос выбора критерия для совмещения изображений с точки зрения двух требований обработки, которые по своей сути противопоставлены друг другу. С одной стороны требование минимизации времени обработки, означает применение простейших, с вычислительной точки зрения, критериев, а с другой стороны, требование высокой помехоустойчивости означает непосредственное сравнение изображений, что определяет проведение наибольшего количества вычислений.

Основным результатом исследования является то, что первоначальное предположение, что критерий максимума коэффициента корреляции является наиболее предпочтительным для совмещения с точки зрения помехоустойчивости, правомерным только для некоторых видов изображений. Критерий максимума совпавших особых точек обеспечивает в ряде случаев практически ту же помехоустойчивость. При этом данный критерий обеспечивает минимальное время обработки, что в большинстве случаев является главным требованием при обработке в системах технического зрения.

Вторым немаловажным результатом исследования является то, что для построения алгоритмов совмещения необходимо ориентироваться на информативные признаки изображений: слишком много контурных точек или учет однородных по яркости фрагментов изображений может существенно влиять на результат совмещения.

Разработанная методика оценки погрешности совмещения изображений может быть использована в качестве инструмента объективной оценки, так как параметры совмещения определяют погрешность прямым, а не косвенным образом.

Полученные результаты будут использованы для проведения дальнейших исследований, направленных на разработку методов синтеза алгоритмов совмещения, а также формирования рекомендаций для выбора критерия зависимости от статистических характеристик обрабатываемых изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокошкин АВ, Коротков ВА, Новичихин ЕП. Сравнение методов интерполяции при достижении сверхразрешения изображений на основе анализа нескольких кадров. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(1):85-91.
2. Морозов АА, Супикова ОС, Хохлова МН, Минько К, Петрова НГ. Разработка средств агентного логического программирования для многоканального интеллектуального видеонаблюдения. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2018, 10(1):101-116.
3. Алаторцев ДВ, Хамухин АВ. Анализ эффективных методов оценки дальности и алгоритмов обработки видеoinформации на БПЛА. *Известия Тульского гос. университета*, 2020, 12:255-261.
4. Колесников АА. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования. *Вестник Сибирского гос. университета геосистем и технологий*, 2022, 27(3):74-94.
5. Сшивание панорамных изображений с помощью OpenCV: <https://machinelearningmastery.ru/image-panorama-stitching-with-opencv-2402bde6b46c/> (дата обращения 01.11.2023).
6. Сшивание изображений: <https://russianblogs.com/article/39531123633/> (дата обращения 01.11.2023).
7. Lucas BD, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, 1981, pp.121-130.
8. Парингер РА, Донон Я, Куприянов АВ. Модификация метода сопоставления размытых изображений. *Компьютерная оптика*, 2020, 44(3):441-445.
9. Ефимов АИ, Новиков АИ. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений. *Компьютерная оптика*, 2016, 40(2):258-265.
10. Диязитдинова АА. Проективное совмещение телевизионных сигналов методом RANSAC для промышленных систем технического зрения. *Инфокоммуникационные технологии*, 2020, 18(4):443-449.
11. Бондаренко ВА, Каплинский ГЭ, Павлова ВА, Тушиков ВА. Метод поиска и сопоставления ключевых особенностей изображений для распознавания образов и сопровождения объектов. *Известия ЮФУ*, 2019, 1(203):281-293.
12. Bouquet J-Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm: <https://web.stanford.edu/class/cs231m/references/pyr-lucas-kanade-feature-tracker-bouquet.pdf> (дата обращения 28.10.2023).
13. Смирнов СА, Бабаян ПВ, Ершов МД, Муравьев ВС. Разработка и оптимизация алгоритма слежения за транспортным средством на основе пирамидального метода Лукаса-Канаде. *Вестник кибернетики*, 2020, 2(38):58-67.
14. Сунгатулина ДИ, Крылов АС, Фёдоров ДН. Быстрые алгоритмы совмещения гистологических изображений. *Научная визуализация*, 2014, 6(4):61-71.
15. Rajalakshmi C, Alex MG, Balasubramanian R. Copy move forgery detection using key point localized super pixel based on texture features. *Computer Optics*, 2019, 43(2):270-276.
16. Константинов ИС, Гайворонский ВА. Разработка и исследование структурной модели построения объемного панорамного изображения. *Экономика. Информатика*, 2023, 50(1):133-143.
17. Чеховский ДВ, Цудиков МБ. Особенности поиска признаков изображений для получения панорамы из серии кадров. *Известия Тульского гос. ун-та*, 2019, 3:30-34.
18. Синецын АВ. Обзор методов создания панорамного изображения для системы технического зрения. *Столыпинский вестник*, 2023, 2:947-956.
19. Чеканов МО, Шипитько ОС, Ершов ЕИ. Одноточечный RANSAC для оценки величины осевого вращения объекта по томографическим проекциям. *Сенсорные системы*, 2020, 34(1):72-86.
20. Гошин ЕВ, Котов АП, Фурсов ВА. Двухэтапное формирование пространственного преобразования для совмещения изображений. *Компьютерная оптика*, 2014, 38(4):886-891.
21. Крашенинников ВР, Кадеев АД. Алгоритм оценивания сдвига и поворота изображений на основе метода неподвижной точки. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013, 15(4):931-935.
22. Diyazitdinova A. Homography superposition of multidimensional television signals in improving quality images issue for multicamera video surveillance system. *Proc. of SPIE 12295: 19th International Scientific and Technical Conference "Optical Technologies for Communications"*, pp.122950P. Samara, PSUTI, 2021; doi: 10.1117/12.2630869.
23. RANSAC Algorithm: <https://stackoverflow.com/questions/4655334/ransac-algorithm?noredirect=1> (дата обращения 01.11.2023).
24. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679-698.

Диязитдинова Альфия Асхатовна

старший преподаватель

Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики

23, ул. А. Толстого, Самара 443010, Россия

E-mail: a.diyazitdinova@psuti.ru.

Сдано в набор 24.04.2024. Подписано в печать 26.04.2024. Формат 60×88/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ.л. 15,6. Тираж 100 экз. Зак. 531-21.

Компьютерный набор, верстка, графика, фотоработы – Редакция журнала РЭНСИТ.