



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ,  
НАНОФИЗИКИ И  
ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

# РЭНСИТ:

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА.  
НАНОСИСТЕМЫ.  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ.**

**2024, том 16, № 3**

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

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

Солдатов Е.С., д.ф.-м.н., МГУ

Фетисов Ю.К., д.ф.-м.н., МИРЭА

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

Верона Э., DrSci, Италия

Кавазое Е., DrSci, Япония

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

ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУРАХ  
БИПОЛЯРНЫХ И ГЕТЕРОБИПОЛЯРНЫХ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ  
С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДОРОЖЕК МЕТАЛЛИЗАЦИИ  
Сергеев В.А., Ходаков А.М., Фролов И.В., Казанков А.А. .... 317

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ  
ВОЛН ЛЭМБА В ДАТЧИКАХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ БАЗОВЫХ  
ВКУСОВ

Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Тельминов О.А., Шамин Е.С. ... 325  
АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКИ И КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК  
ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛОВ С  
ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ  
Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Рехаб Х.К.Х.А.А., Диноченко К.В.,  
Крюков Я.В., Калашникова Н.Г. .... 331

### РАДИОЛОКАЦИЯ

НЕЛИНЕЙНАЯ РАДИОФИЗИКА МЕЖЗВЕЗДНЫХ  
ПЕРЕЛЕТОВ: РАЗГОН МАКРООБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Дмитриев А.С. .... 341

### ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

НОВАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

Мышинский Г.В., Вишневецкий Р., Старостин В.И. .... 353

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ВОЗБУЖДЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПЛАЗМОННЫХ МОД В  
ГРАФЕНОВОМ КВАДРАТНОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Полищук О.В., Фатеев Д.В., Попов В.В. .... 367

### ФРАКТАЛЫ В ФИЗИКЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЯ  
ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН ОТ ПЛОСКИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ФРАКТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА  
ПРОРЕЖИВАНИЯ

Арзамасцева Г. В., Евтихов М. Г., Ансовский Ф. В. .... 373

### МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО  
ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ  
ТКАНИ

Кравчук Д.А., Чернов Н.Н., Переселков С.А., Михралиева А.И. .... 381

### НАНОСИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ СЛОЕВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag<sub>2</sub>S  
Мазинев А.С., Тютюнник А.С., Гурченко В.С. .... 387

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

РАЗРЕШЕНИЕ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ  
СЛУЧАЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Кузькин В.М., Переселков С.А., Грачев В.И., Рыбьянец П.В., Ткаченко С.А. .. 395

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ GLX  
ПРИЛОЖЕНИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ API EGL

Татарчук И.А., Мамросенко К.А., Гиацингов А.М. .... 407

ДИНАМИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА LTE И NR  
ДЛЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G

Шарма Нидхи, Ахлат Приянка, Аггарвал Раджеш К. .... 419

## CONTENTS

### RADIOELECTRONICS

CURRENT DISTRIBUTION IN COMB STRUCTURES OF BIPOLAR AND HETEROBIPOLAR MICROWAVE TRANSISTORS TAKING INTO ACCOUNT THE RESISTANCE OF METALLIZATION TRACKS

Viacheslav A. Sergeev, Alexander M. Khodakov, Ilya V. Frolov, Alexander A. Kazankov ..... 317

ACOUSTIC RESPONSES OF LAMB WAVES OBTAINING AND PROCESSING IN SENSORS OF BASIC TASTES AQUEOUS SOLUTIONS  
Nikita A. Ageikin, Vladimir I. Anisimkin, Nataliya V. Voronova, Oleg A. Telminov, Evgeniy S. Shamin ..... 325

ALGORITHM FOR JOINT ESTIMATION AND COMPENSATION OF SIGNALS TIME AND FREQUENCY SYNCHRONIZATION ERRORS WITH ESTIMATION ACCURACY CONTROL

Semen M. Mukhamadiev, Eugeny V. Rogozhnikov, Hashem Khaled Hashem Abdelkader Aly Rehab, Kirill V. Dinoshenko, Yakov V. Kryukov, Natalya G. Kalashnikova .. 331

### RADIOLOCATION

NONLINEAR RADIOPHYSICS OF INTERSTELLAR FLIGHTS: MACROOBJECTS ACCELERATION USING ELECTROMAGNETIC RADIATION

Alexander S. Dmitriev ..... 341

### CONDENSED MATTER NUCLEAR SCIENCE

NEW MODEL OF THE UNIVERSE EVOLUTION

Gennady V. Myshinsky, Roland Wiśniewski, Victor I. Starostin ..... 353

### CONDENSED MATTER PHYSICS

TERAHERTZ PLASMON MODES EXCITATION IN A GRAPHENE SQUARE MICROCAVITY

Olga V. Polischuk, Denis V. Fateev, Viacheslav V. Popov ..... 367

### FRACTALS IN PHYSICS

DIFFRACTION PATTERNS MULTIPLICATION FROM FLAT GEOMETRIC FRACTAL OBJECTS USING THE THINNING METHOD  
Galina V. Arzamastseva, Mikhail G. Evtikhov, Fedor V. Lisovsky ..... 373

### MEDICAL PHYSICS

TRANSVERSE WAVES ACOUSTIC FIELD EXPERIMENTAL STUDIES IN A BIOLOGICAL TISSUE MODEL

Denis A. Kravchuk., Nikolay N. Chernov, Sergey A. Pereselkov, Amaliya I. Mihralieva ..... 381

### NANOSYSTEMS

ELECTROPHYSICAL AND TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF  $Ag_2S$  QUANTUM DOTS THIN LAYERS

Alim S. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko. .... 387

### INFORMATION TECHNOLOGIES

NOISE SIGNALS RESOLUTION IN THE RANDOM INHOMOGENEITIES PRESENCE OF OCEANIC ENVIRONMENT

Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko. .... 395

GRAPHICAL GLX-APPLICATIONS FUNCTIONING ENSURING ON INDUSTRIAL EQUIPMENT USING THE EGL API

Ivan A. Tatarchuk, Kirill A. Mamrosenko, Alexander M. Giatsintov ..... 407

DYNAMIC SPECTRUM SHARING: A QUICK FIX TO 5G

DEPLOYMENT  
Nidhi Sharma, Priyanka Ahlawat, Rajesh K. Aggarwal ..... 419



RUSSIAN ACADEMY  
OF NATURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF  
RADIOELECTRONICS,  
NANOPHYSICS AND  
INFORMATION TECHNOLOGIES  
PROBLEM

# RENSIT:

RADIOELECTRONICS.  
NANOSYSTEMS.  
INFORMATION  
TECHNOLOGIES.

2024, Vol. 16, no. 3

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.2024.16.317

## Токораспределение в гребенчатых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов с учетом сопротивления дорожек металлизации

<sup>1</sup>Сергеев В.А., <sup>1</sup>Ходаков А.М., <sup>1</sup>Фролов И.В., <sup>1,2</sup>Казанков А.А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>  
Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [ln23al@yandex.ru](mailto:ln23al@yandex.ru), [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru), [kazankov1992@gmail.com](mailto:kazankov1992@gmail.com)

Поступила 05.05.2024, рецензирована 07.05.2024, принята 10.05.2024

**Аннотация:** Представлен краткий анализ причин неоднородного и неустойчивого распределения тока между элементарными транзисторами в гребенчатых структурах (ГС) биполярных (БТ) и гетеробиполярных (ГБТ) СВЧ транзисторов. Получено выражение для тока, втекающего в элементарный транзистор ГС, с учетом сопротивления эмиттерной дорожки металлизации. Приведена оценка влияния технологического разброса сопротивлений эмиттерных дорожек металлизации на неравномерность распределения полного тока транзистора между элементарными транзисторами. Показано, что сопротивление эмиттерных дорожек металлизации играет стабилизирующую роль и приводит к повышению тепловой устойчивости токораспределения в ГС, при этом наименее устойчивым к тепловому пробую будет элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим тепловым сопротивлением. Предложены рекомендации по выравниванию и повышению устойчивости токораспределения в ГС БТ и ГБТ.

**Ключевые слова:** биполярный и гетеробиполярный СВЧ транзистор, гребенчатая структура, сопротивление дорожек металлизации, неоднородность распределения тока, тепловая неустойчивость токораспределения

УДК 621.382.029

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

**Для цитирования:** Сергеев В.А., Ходаков А.М., Фролов И.В., Казанков А.А. Токораспределение в гребенчатых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов с учетом сопротивления дорожек металлизации. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):317-324. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.317.

## Current distribution in comb structures of bipolar and heterobipolar microwave transistors taking into account the metallization tracks resistance

Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov

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

Ulyanovsk 432071, Russian Federation

*E-mail: sva@ulstu.ru, ln23al@yandex.ru, ilya-frolov88@mail.ru*

**Alexander A. Kazankov**

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

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

*E-mail: kazankov1992@gmail.com*

*Received May 05, 2024, peer-reviewed May 07, 2024, accepted May 10, 2024*

**Abstract:** A brief analysis of the causes of inhomogeneous and unstable current distribution between elementary transistors in comb structures (CS) of bipolar (BT) and heterobipolar (HBT) microwave transistors is presented. An expression for the current flowing into a CS elementary transistor, taking into account the emitter track metallization resistance, is derived. An estimation of the influence of technological variation of emitter metallization track resistances on the non-uniformity of the transistor total current distribution between elementary transistors is given. It is shown that resistance of emitter tracks of metallization plays a stabilizing role and leads to increase of thermal stability of current distribution in CS, thus the least stable to thermal breakdown will be elementary transistor of CS with the least resistance of emitter track and the greatest thermal resistance. Recommendations on equalization and increase of stability of current distribution in CS of BT and HBT are offered.

**Keywords:** bipolar and heterobipolar microwave transistors, comb structure, metallization track resistance, current distribution inhomogeneity, current distribution thermal instability

**UDC 621.382.029**

*Acknowledgements:* The work was carried out within the framework of the state assignment Kotelnikov IRE RAS.

*For citation:* Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov, Alexander A. Kazankov. Current distribution in comb structures of bipolar and heterobipolar microwave transistors taking into account the metallization tracks resistance. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):317-324e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.317.

## СОДЕРЖАНИЕ

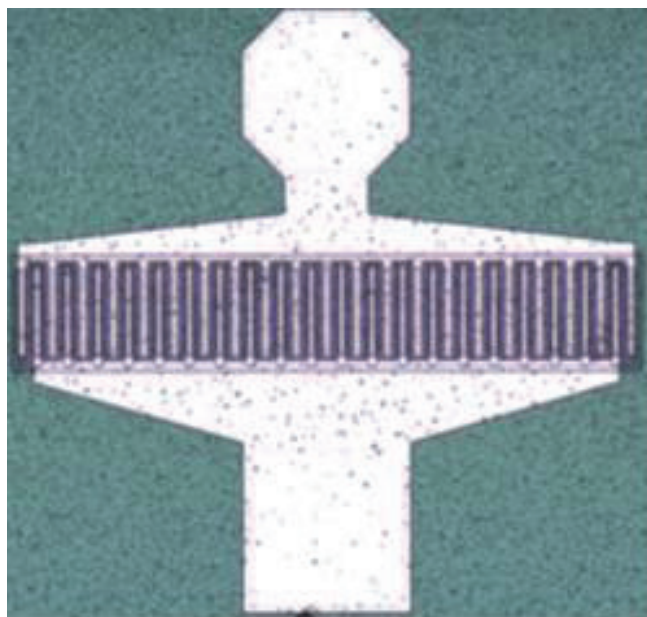
1. ВВЕДЕНИЕ (318)
  2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ (320)
  3. ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ (322)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (323)
- ЛИТЕРАТУРА (323)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной аппаратуре радиосвязи и телекоммуникаций наряду с МДП и НЕМТ СВЧ транзисторами широко применяются мощные биполярные (БТ) и гетеробиполярные (ГБТ) СВЧ транзисторы [1-3], которые обеспечивают высокую выходную мощность на СВЧ при большой

плотности тока и высоком напряжении. При этом значительные усилия исследователей направлены на повышение надежности этого класса приборов, поскольку для БТ и ГБТ характерно наличие сильной положительной тепловой обратной связи (ПТОС), приводящей к неоднородному и неустойчивому распределению плотности тока, локальным перегревам и термомеханическим напряжениям в приборных структурах [4-6], и, как следствие, к ускорению механизмов деградации и отказам приборов.

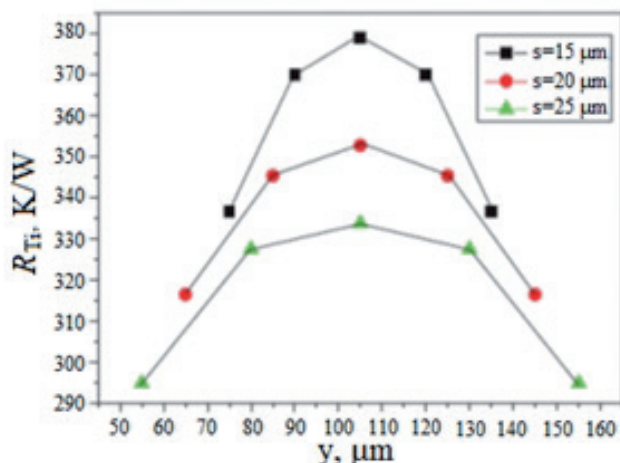
Наиболее распространенной геометрией структур современных мощных БТ и ГБТ является полосковая или гребенчатая геометрия с параллельным расположением



**Рис. 1.** Гребенчатая структура ГБТ с 20 элементарными транзисторами [5].

элементарных транзисторов (ячеек) (см. **Рис. 1** [5]). При большой площади эмиттера или при наличии большого числа отдельных эмиттеров (элементарных транзисторов) в одном кристалле практически невозможно обеспечить однородность (идентичность) их электрических характеристик. Распределение плотности тока в транзисторной структуре даже в изотермическом приближении будет неоднородным (неравномерным), например, из-за неравномерного распределения легирующих примесей по площади кристалла; при этом ПТОС увеличивает эту неоднородность.

Даже в идеальном случае однородного изотермического распределения полного тока эмиттера между элементарными транзисторами, распределение температуры по площади кристалла существенно неоднородно в результате действия краевых эффектов. Это, в свою очередь, приведет к перераспределению тока в результате саморазогрева гребенчатой структуры (ГС) в активном режиме работы транзистора. Так в работе [4] на примере SiGe ГБТ с пятью эмиттерными дорожками размером  $60 \times 3 \mu\text{m}$  на кристалле размером  $210 \times 153 \mu\text{m}$  и толщиной  $100 \mu\text{m}$  методами компьютерного моделирования и экспериментально показано,



**Рис. 2.** Тепловое сопротивление элементарных транзисторов в ГС ГБТ с пятью дорожками при различном расстоянии  $s$  между ними [4].

что тепловое сопротивление  $R_T$  центрального элементарного транзистора на 12-15% больше теплового сопротивления краевых элементарных транзисторов, при этом тепловые сопротивления всех элементарных транзисторов увеличиваются при уменьшении расстояния между дорожками (**Рис. 2**). Аналогичные результаты были получены нами ранее для ГС БТ [6]. В результате действия ПТОС через центральные дорожки ГБТ будут протекать токи большей плотности, что приводит к увеличению выделения тепла, что в конечном итоге может привести к тепловому пробоему или деградации прибора, что особенно сильно проявляется при высоких уровнях инжекции [7].

Чтобы снизить неравномерное распределение температуры и решить эти проблемы, используют различные варианты проектирования геометрии ГС, включая изменение длины дорожек [8] и изменение геометрии и расстояния между эмиттерами ГБТ [9,10], что позволяет уменьшить разницу температур вдоль направления ширины эмиттера.

Токораспределение и теплоэлектрические процессы в ГС БТ и ГБТ в известных работах рассматриваются без учета падения напряжения на дорожках металлизации, которое приводит к существенно неоднородному распределению плотности эмиттерного тока вдоль

эмиттерных дорожек [11-13]. Как показывает анализ отказавших в результате теплового пробоя мощных БТ с ГС, проплавление базы практически всегда наблюдается под началом эмиттерной дорожки, полное сопротивление которой меньше сопротивлений других дорожек. Для объяснения этого явления в данной статье рассмотрено токораспределение и его устойчивость в ГС БТ и ГБТ с учетом влияния сопротивления эмиттерных дорожек металлизации.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ

В работах [11-13] рассмотрено распределение плотности эмиттерного тока под эмиттерной дорожкой в ГС БТ и ГБТ СВЧ транзисторов (Рис. 3) в различных режимах работы транзисторов. В данной статье мы ограничимся одномерным приближением распределения плотности эмиттерного тока  $J_{em}(x)$  под дорожкой вдоль оси  $x$  (Рис. 3б) при относительно небольших эмиттерных токах  $I_{em}$ , при которых падением напряжения на сопротивлении  $r_n$  пассивных областей ГС можно пренебречь.

В работе [11] для ГС с длиной дорожек, не превышающих толщину кристалла, в изотермическом приближении, то есть в предположении, что температура эмиттерного

перехода  $T_n$  не сильно меняется вдоль эмиттерных дорожек металлизации:  $T_n(x) \approx \text{const}$ , получено общее выражение для плотности эмиттерного тока  $J_{em}(x)$  под дорожкой с учетом влияния сопротивлений как эмиттерной так и базовой дорожек металлизации:

$$J_{em}(x) = \frac{2\varphi_T}{[R_{BM}(1-\alpha) + R_{EM}]S_{EM}} \times \times B_1^2 \cos^{-2}[B_1(B_2 - \bar{x})], \quad (1)$$

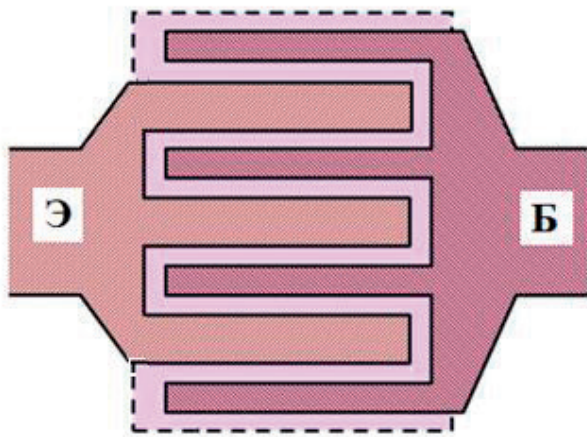
где  $\bar{x} = x/L_{EM}$ ,  $L_{EM}$  – длина эмиттерной дорожки металлизации,  $\alpha$  – коэффициент передачи тока в схеме с общей базой, а постоянные интегрирования  $B_1$  и  $B_2$  находятся из решения системы уравнений, полученных из граничных условий:

$$B_1 \operatorname{tg} B_1 B_2 = \frac{R_{EM} I_{em}}{2\varphi_T}, \quad (2a)$$

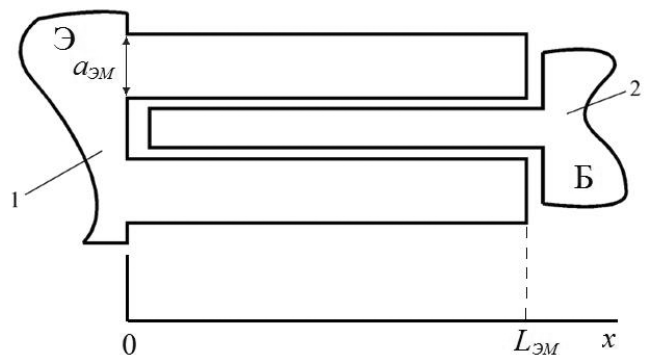
$$B_1 \operatorname{tg}[B_1(1 - B_2)] = \frac{R_{BM}(1 - \alpha) I_{em}}{2\varphi_T}, \quad (2b)$$

а  $R_{EM}$  и  $R_{BM}$  – полные сопротивления дорожек металлизации,  $\varphi_T = kT_n/e$  – тепловой потенциал,  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – элементарный заряд.

В активном режиме работы транзистора при  $\alpha \approx 1$  влиянием сопротивления базовой металлизации можно пренебречь и при условии  $R_{EM} I_{em} \ll 2\varphi_T$ , ограничиваясь



а



б

Рис. 3. Геометрия (а) и элемент (б) гребенчатой структуры БТ и ГБТ: 1 - эмиттерная металлизация; 2 - базовая металлизация.

линейным членом в разложении  $\operatorname{tg}\beta$  по степеням  $\beta$ , из решения (2) нетрудно получить

$$B_1^2 \approx \frac{R_{EM} I_{em}}{2\varphi_T}, \quad B_2 = 1. \quad (3)$$

Подставляя полученные выражения для  $B_1$  и  $B_2$  в (1) для плотности эмиттерного тока у основания дорожки, получим:

$$J_{em}(0) = \frac{I_{em}}{S_{em}} \cos^{-2} B_1. \quad (4)$$

Ограничиваясь двумя членами в разложении  $\cos B_1$  по степеням  $B_1$ , из (4) можно получить приближенное выражение для полного тока, втекающего в  $i$ -ю дорожку (элементарный транзистор) ГС, в виде:

$$I_{emi} \approx I_{em0} \left( 1 - \frac{R_{EMi} I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right), \quad (5)$$

где  $I_{em0} = S_{cm} J_{cm}(0)$ ,  $S_{cm} = L_{EM} a_{EM}$  – площадь эмиттерной дорожки,  $a_{EM}$  – ширина эмиттерной дорожки,  $J_{cm}(0)$  – плотность эмиттерного тока у основания дорожек, одинаковая для всех элементарных транзисторов,  $\varphi_{Ti} = kT_{ni}/e$ ,  $T_{ni}$  – температура эмиттерного перехода  $i$ -го элементарного транзистора.

Для полного эмиттерного тока, втекающего в ГС, содержащую  $N$  элементарных транзисторов, можно записать следующее приближенное выражение:

$$\begin{aligned} I_{em\Sigma} &= \sum_{i=1}^N I_{emi} \approx \sum_{i=1}^N I_{em0} \left( 1 - \frac{R_{EMi} I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right) \approx \\ &\approx N I_{em0} \left( 1 - \frac{\bar{R}_{EM} I_{em0}}{2\varphi_T} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

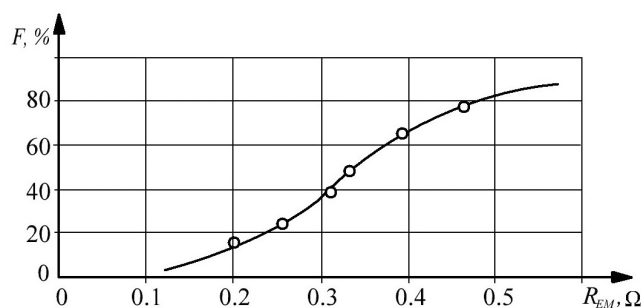
где  $\bar{R}_{EM}$  – среднее значение сопротивления эмиттерных дорожек в ГС,  $\varphi_T = k\bar{T}_n/e$ ,  $\bar{T}_n$  – средняя температура эмиттерного перехода транзистора.

Согласно модели Эберса-Молла плотность эмиттерного тока у основания дорожек определяется напряжением на эмиттерном переходе:

$$\begin{aligned} J_{em}(0) &= \\ &= J_{em0} T^3 \exp \left\{ \frac{-E_g + e(U_{EB} - r_n S_{em} J_{em}(0))}{kT_n} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $J_{em0}$  – слабо зависящий от температуры параметр,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника, и дополнительное падение напряжения на сопротивлении эмиттерных дорожек металлизации приводит к увеличению падения напряжения на эмиттерном переходе для поддержания заданного значения полного тока  $\Delta U_{EB} \approx \bar{R}_{EM} I_{em\Sigma} / N$ .

Более важным следствием (5) является неравномерное распределение токов элементарных транзисторов, обусловленное технологическим разбросом сопротивлений дорожек эмиттерной металлизации. Экспериментально неравномерность распределения токов в ГС можно наблюдать и оценить по интенсивности рекомбинационного излучения [14], либо по измерению падения напряжения на дорожках. На **Рис. 4** показано распределение эмиттерных дорожек металлизации по величине сопротивления  $R_{EM}$ , измеренного зондовым методом на 10 структурах транзисторов КТ803А измерительным мостом Е12-2 с погрешностью не хуже 20%. Это распределение близко к нормальному со средним значением  $0.32\Omega$  (расчетное значение  $R_{EM} = 0.16 \pm 0.04 \Omega$ ) и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{\bar{R}_{EM}} \approx 0.14\Omega$ . Причиной такого разброса является, вероятно, неоднородность толщины слоев металлизации и ее структурные несовершенства. Неравномерное распределение тока между элементарными транзисторами с различными сопротивлениями эмиттерных дорожек подтверждается



**Рис. 4.** Распределение эмиттерных дорожек транзисторов КТ803А по величине сопротивления.

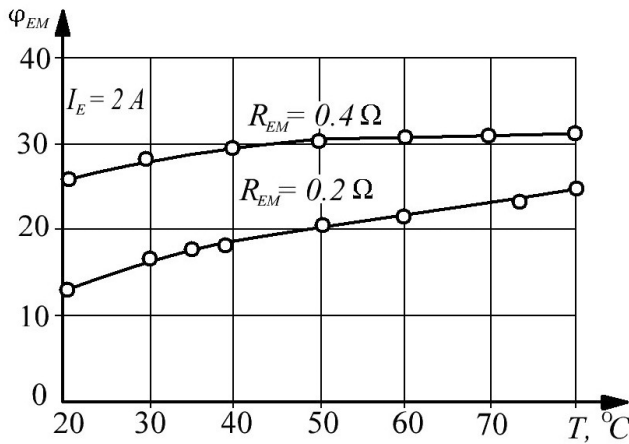


Рис. 5. Зависимость падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации транзистора КТ803А от температуры.

измерением потенциала  $\varphi_{EM}(L_{EM})$  на концах различных дорожек (Рис 5).

С увеличением температуры распределение тока между дорожками становится более равномерным, о чем свидетельствует возрастание потенциалов  $\varphi_{EM}(L_{EM})$  и уменьшение разности потенциалов между концами дорожек. Аналогичный характер распределений дорожек по величине сопротивления наблюдался и у транзисторов других типов.

### 3. ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЕ

Рассмотрим условие тепловой неустойчивости в отдельном элементарном транзисторе ГС БТ или ГБТ с учетом влияния сопротивления эмиттерной металлизации. Мощность, выделяющаяся в элементарном транзисторе, будет приводить к повышению температуры эмиттерного перехода, что в свою очередь в результате действия ПТОС приведет к увеличению тока. Согласно одномерной модели [15] поперечная тепловая неустойчивость токораспределения и образование шнура тока в БТ и ГБТ наступает тогда, когда случайное приращение (флуктуация) тока приводит к такому приращению температуры, которое в результате действия ПТОС вызывает еще большее приращение тока, и условие неустойчивости записывается в виде:

$$\xi_{Ti} I_{emi} U_{CV} R_{Ti} \geq 1, \quad (8)$$

где  $\xi_{Ti} = \frac{1}{I_{emi}} \frac{\partial I_{emi}}{\partial T_{ni}}$  — относительный температурный коэффициент эмиттерного тока  $i$ -го элементарного транзистора,  $U_{CV}$  — коллекторное напряжение, одинаковое для всех элементарных транзисторов.

Дифференцирование (5) с учетом (7) дает следующее выражение для  $\xi_{Ti}$ :

$$\xi_{Ti} = \frac{3kT_{ni} + E_g - eU_{EB}}{T_{ni}(kT_{ni} + eI_{emi}r_n)} \left( 1 - \frac{eR_{EMi}I_{em0}}{kT_{ni}} \right) + \frac{eR_{EMi}I_{em0}}{2kT_{ni}^2}. \quad (9)$$

Простые оценки показывают, что вторым слагаемым в правой части (9) можно пренебречь. Анализ условия (8) после подстановки выражений (5) и (9) показывает, что сопротивление эмиттерной металлизации в общем случае играет стабилизирующую роль. При заданном полном эмиттерном токе транзистора зависимость коллекторного напряжения  $U_{CV}$ , при котором будет наступать неустойчивость тока в  $i$ -ом элементарном транзисторе, от сопротивления эмиттерной дорожки будет иметь вид

$$U_{CVi} \sim \left[ \left( 1 - \frac{R_{EMi}I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right) \left( 1 - \frac{R_{EMi}I_{em0}}{\varphi_{Ti}} \right) R_{Ti} \right]^{-1} \approx \left( 1 - \frac{3R_{EMi}I_{em0}}{2\varphi_{Ti}} \right)^{-1} R_{Ti}^{-1}. \quad (10)$$

Технологический разброс сопротивлений эмиттерной дорожки приводит к тому, что при одинаковых тепловых сопротивлениях элементарных транзисторов в ГС менее устойчивым будет элементарный транзистор с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки. Как показано выше, тепловые сопротивления элементарных транзисторов на краях и в центре реальных ГС заметно различаются, и при одинаковых сопротивлениях эмиттерных дорожек менее устойчивым будет центральный элементарный транзистор с наибольшим тепловым сопротивлением.

В общем случае элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим



тепловым сопротивлением будет иметь наибольшую плотность тока и температуру, и, как следствие, будет менее устойчивым к тепловому пробую. Для выравнивания токораспределения и повышения тепловой устойчивости элементарных транзисторов ГС необходимо обеспечить постоянство выражения в правой части (10); для этого можно рекомендовать формировать сопротивления эмиттерных дорожек с учетом расчетных значений тепловых сопротивлений элементарных транзисторов, что технологически можно реализовать путем изменения толщины дорожек или подбора удельного сопротивления материала металлизации.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный анализ показывает, что сопротивление эмиттерных дорожек металлизации в ГС БТ и ГБТ и приводит к неравномерному распределению тока между элементарными транзисторами в активном режиме работы транзисторов.

В результате ПТОС токораспределение в ГС БТ и ГБТ при определенных значениях эмиттерного тока и коллекторного напряжения может потерять устойчивость. При этом сопротивление эмиттерной металлизации в общем случае играет стабилизирующую роль. В общем случае элементарный транзистор ГС с наименьшим сопротивлением эмиттерной дорожки и наибольшим тепловым сопротивлением будет иметь наибольшую плотность эмиттерного тока и температуру, и как следствие будет менее устойчивым к тепловому пробую. Для выравнивания распределения тока тепловой устойчивости элементарных транзисторов в ГС БТ и ГБТ сопротивление дорожек металлизации формировать с учетом расчетных значений тепловых сопротивлений элементарных транзисторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jianjun G. *Heterojunction Bipolar Transistors for Circuit Design: Microwave Modeling and Parameter Extraction*. United States, John Wiley & Sons Inc, 2015.
2. Xin W, Akshay A, Wei Q et al. Performance Prediction of InP/GaAsSb Double Heterojunction Bipolar Transistors for THz applications. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130:034502.
3. Козловский ЭЮ, Захаров СИ, Семенова ЛМ, Тейдер АА. Разработка технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs. *Труды 31-ой Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*, 3:27-29, 2021.
4. C Liang. Thermal effect characterization of multiple finger power HBT: Thermal resistance matrix. *IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, Chongqing, China, 2016, pp. 182-185, doi: 10.1109/ITNEC.2016.7560345.
5. Chen L, Zhang WR, Jin DY, Shen P, Xie HY, Ding CB, Xiao Y, Sun BT, Wang RQ. Thermal stability improvement of a multiple finger power SiGe heterojunction bipolar transistor under different power dissipations using non-uniform finger spacing. *Chinese Physics B*, 2011, 20:018501.
6. Сергеев ВА, Ходаков АМ. *Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов*. Ульяновск, УЛГТУ, 2012, 159 с.
7. Lu Z, Zhou L, Hu X. Electro-Thermal analysis of SiGe HBT under HPM Injection. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/NEMO49486.2020.9343573.
8. Dongyue Jin et al. Thermal stability of the power SiGe HBT with non-uniform finger length. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2008, pp. 166-169, doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540331.
9. Rui Chen, Dong-Yue Jin, Wan-Rong Zhang, Li-Fan Wang, Bin Guo, Hu Chen, Ling-Han

- Yin, Xiao-Xue Jia. Thermal resistance matrix representation of thermal effects and thermal design in microwave power HBTs with two-dimensional array layout. *Chinese Physics B*, 2019, 28(9); doi: 10.1088/1674-1056/ab3436.
10. Dongyue J, Wanrong Z, Hongyun X, Liang C, Pei S, Ning H. Structure optimization of multi-finger power SiGe HBTs for thermal stability improvement. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(4):382-386; doi: 10.1016/j.microrel.2009.01.008.
11. Сергеев В.А. Изотермическое токораспределение в гребенчатых структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2005, 2:344-351.
12. Sergeev VA, Khodakov AM. Two-Section Model of the Current Distribution in Strip Layouts of Bipolar and Hetero-Bipolar Microwave Transistors. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, 67(11):1400-1405.
13. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the current-carrying metallization. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(2):103-110. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.103.
14. Sergeev VA, Frolov IV, Kazankov AA. Estimation of the Inhomogeneity of the Current Density and Temperature Distribution in the Structures of Bipolar and Heterobipolar High-Frequency and Ultrahigh-Frequency Transistors by Recombination Emission. *Optics and Spectroscopy*, 2023, 131(11):1387-1389. DOI: 10.61011/OS.2023.11.57001.5050-23.
15. Федотов ЯА (ред.). *Кремниевые планарные транзисторы*. М., "Сов. радио", 1973, 336 с.
- Сергеев Вячеслав Андреевич**  
д.т.н., профессор, член-корр. РАЕН  
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия  
E-mail: sva@ulstu.ru
- 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
- Фролов Илья Владимирович**  
к.т.н., доцент  
УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия  
E-mail: ilya-frolov88@mail.ru
- Казанков Александр Александрович**  
аспирант  
Ульяновский гос. техн. университет  
32, ул. Северный венец, Ульяновск 432027, Россия  
E-mail: kazankov1992@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.325

## Получение и обработка акустических откликов волн Лэмба в датчиках водных растворов базовых вкусов

<sup>1</sup>Агейкин Н.А., <sup>1</sup>Анисимкин В.И., <sup>2</sup>Воронова Н.В., <sup>2</sup>Тельминов О.А., <sup>2</sup>Шамин Е.С.

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

Москва 125009, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, <https://www.niime.ru/>

Москва 124460, Зеленоград, Российская Федерация

E-mail: [ageykin\\_niki@mail.ru](mailto:ageykin_niki@mail.ru), [anis@cplire.ru](mailto:anis@cplire.ru), [voronova@niime.ru](mailto:voronova@niime.ru), [otelminov@niime.ru](mailto:otelminov@niime.ru), [eshamin@niime.ru](mailto:eshamin@niime.ru)

Поступила 11.04.2024, рецензирована 18.04.2024, принята 22.04.2024

**Аннотация:** В работе измерены суммарные потери акустических волн в пластинах  $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$  при нанесении жидкости, обусловленные радиационным излучением волн в жидкую среду, а также ее вязкостью, электропроводностью, плотностью и диэлектрической проницаемостью жидкостного анализатора. В качестве тестируемых выбраны растворы с 5-ю базовыми вкусами, широко применяемые для калибровки и создания эталонов при тестировании жидких сред. Измерения проведены в диапазоне 30...60 МГц. Экспериментальные данные были представлены в виде полярных гистограмм, из сравнения площадей и формы которых определялся вкус того или иного раствора. К тем же экспериментальным результатам был применен метод анализа большого массива данных (РСА) для описания линейных процессов деформации упругих волн на основе экспериментальных данных, содержащих известные значения измерений физических показателей волны для различных типов жидкостных сред, который ранее использовался для идентификации газов и предсказания свойств различных веществ по линейному отклику нормальной акустоэлектронной волны. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью полярных гистограмм и стандартного метода классификации РСА. Продемонстрированы преимущества последнего. Результаты данного исследования полезны как при разработке акустических датчиков без сенсорных слоев, так и для применения методов машинного обучения к данным в других типах датчиков.

**Ключевые слова:** волны Лэмба, датчики водных растворов, анализ большого массива данных, базовые вкусы

УДК 53.087

**Благодарности:** Работа выполнена при финансировании Российского научного фонда (проект № 20-19-00708П).

**Для цитирования:** Агейкин Н.А., Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Тельминов О.А., Шамин Е.С. Получение и обработка акустических откликов волн Лэмба в датчиках водных растворов базовых вкусов. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):325-330. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.325.

## Acoustic responses of Lamb waves obtaining and processing in sensors of basic tastes aqueous solutions

Nikita A. Ageykin, Vladimir I. Anisimkin

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

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [ageykin\\_niki@mail.ru](mailto:ageykin_niki@mail.ru), [anis@cplire.ru](mailto:anis@cplire.ru)

Nataliya V. Voronova, Oleg A. Telminov, Evgeniy S. Shamin

Molecular Electronics Research Institute, <https://www.niime.ru/>

Moscow 124460, Zelenograd, Russian Federation

E-mail: [voronova@niime.ru](mailto:voronova@niime.ru), [otelminov@niime.ru](mailto:otelminov@niime.ru), [eshamin@niime.ru](mailto:eshamin@niime.ru)

Received April 11, 2024, peer-reviewed April 18, 2024, accepted April 22, 2024

**Abstract:** In this work, the total acoustic wave losses in  $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$  wafers during liquid application due to radiation emission of waves into the liquid medium, as well as its viscosity, conductivity, density and dielectric constant of the liquid analyte are measured. Solutions with 5 basic flavors, widely used for calibration and reference creation in liquid media testing, were selected as test liquids. The measurements were performed in the range of 30...60 MHz. After the measurements, the experimental data were presented in the form of polar histograms, from the comparison of areas and shapes of which the flavor of a particular liquid was determined. Then, a principal component analysis (PCA) method was applied to the same experimental results to describe linear elastic wave deformation processes based on experimental data containing known values of physical wave measurements for different types of liquid media, which was previously used to identify gases and predict the properties of various substances from the linear response of a normal acoustic-electronic wave. In this paper, a comparative analysis of the results obtained using polar histograms and the standard PCA classification method is performed. The advantages of the latter are demonstrated. The results of this study are useful both for the development of acoustic sensors without sensor layers and for the application of machine learning methods to data in other types of sensors.

**Keywords:** Lamb waves, aqueous solution sensors, principal component analysis, basic flavors

**UDC 53.087**

**Acknowledgments:** The work was financed by the Russian Science Foundation (project no. 20-19-00708II).

**For citation:** Nikita A. Ageikin, Vladimir I. Anisimkin, Nataliya V. Voronova, Oleg A. Telminov, Evgeniy S. Shamin. Acoustic responses of Lamb waves obtaining and processing in sensors of basic tastes aqueous solutions. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):325-330e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.325.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (326)
2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ (327)
3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ (329)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (330)

## ЛИТЕРАТУРА (330)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы растет потребность в миниатюрных высокочувствительных датчиках жидкостей и газов, что стимулирует их разработку с применением различных физических принципов. Одним из таких принципов, является акустоэлектронный подход. В датчиках акустоэлектронного типа измерение каждого параметра тестируемой среды производится при помощи специально подобранной акустической волны. Этим требованиям в полной мере отвечают акустические волны Лэмба различных порядков  $n$ , распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах толщиной  $h$  порядка длины волны [1,2].

Основной задачей сенсора является идентификация, классификация и каталогизация образца жидкости. Задачи классификации и каталогизации сходные, однако, классификация предполагает своим условием наличие критериев, а

каталогизация предполагает своей целью полноту описания [3].

Микроволновые датчики на основе акустических пластинчатых мод привлекательны по ряду причин. Они пригодны для детектирования газов и жидкостей, способны измерять физические свойства проб малого объема ( $\sim 100$  мкл), имеют небольшие размеры ( $\sim 100$  мм<sup>3</sup>) и обладают двумя независимыми откликами (амплитудным и фазовым). Отсутствие чувствительных покрытий повышает повторяемость и долговременную стабильность измерений, при этом форма и точный объем пробы не влияют на результаты измерений.

До настоящего момента результаты измерений представлялись в виде полярных гистограмм [4], а их сравнение производилось визуальными методами, что не является оптимальным способом идентификации, классификации и каталогизации различных образцов жидкости и газов. Известен ряд работ, в которых схожие задачи решаются с помощью использования стандартных методов классификации.

Так в работе [5] представлен двумерный и трехмерный анализ главных компонент (principal component analysis, PCA) набора параметров затухания и фазы для различных растворов вкусовых

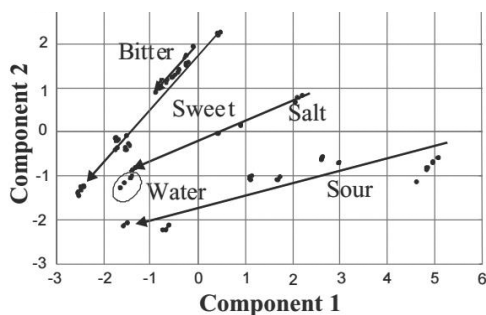


Рис. 1. Двумерный график PCA для водных растворов четырех вкусов различной концентрации и деионизированной дистиллированной воды [5].

образцов. В качестве четырех параметров для PCA использовались отношение амплитуд и разность фаз на каждой из линий задержки (электрически замкнутой и свободной). Было показано, что достигнуто 100% линейное разделение основных вкусов, при этом контрольное вещество – деионизированная дистиллированная вода – четко выделяется (Рис. 1).

Далее при различной концентрации тестируемых жидкостей, также достигалось 100% различие. Рис. 1 показывает, как различные тестовые вещества сходятся к области деионизированной воды при уменьшении их концентрации в водном растворе.

В работе [6] выделение признаков выполняется с помощью линейных преобразований, таких как классический анализ главных компонент (PCA) и линейный дискриминантный анализ (LDA). PCA позволяет найти проекции с максимальной дисперсией и является наиболее распространенным методом линейного извлечения признаков. Однако он не является оптимальным для классификации, поскольку не учитывает идентичность (метку класса) запаховых примеров в базе данных. LDA, напротив, учитывает классовую метку каждого примера. Его цель – найти проекции, которые максимизируют расстояние между примерами с разными вкусами и при этом минимизируют расстояние между примерами с одним и тем же вкусом. Например, PCA может лучше работать с проекцией, содержащей высоковариационный случайный шум, в то время как LDA лучше справляется с проекцией, содержащей тонкую, но, возможно, важную дискриминационную информацию [7]. Поэтому LDA более подходит для целей классификации.

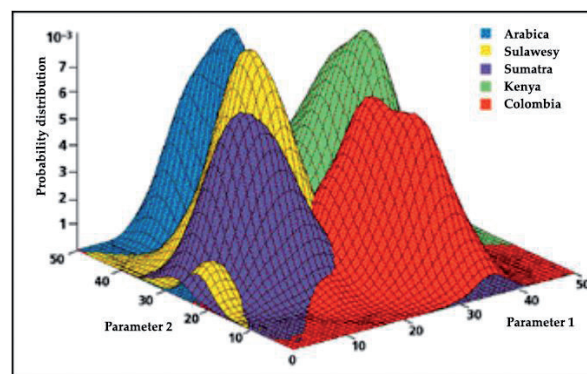


Рис. 2. Трехмерный график распределения 5 сортов кофе [6].

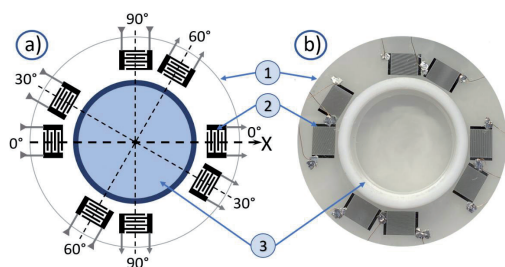
В последнее время несколько исследовательских групп используют некоторые нелинейные преобразования, такие как нелинейные карты Саммона и нелинейные карты Кохонена. Карты Саммона пытаются найти (обычно) двух- или трехмерное отображение, сохраняющее расстояние между парами примеров на исходном 32-мерном пространстве. Карты Кохонена проецируют 32-мерное пространство на (обычно) двумерную сетку элементов обработки, называемых нейронами.

Так исследователи из Государственного университета Северной Каролины смогли отличить один сорт кофе от другого в ходе применения методов дискриминации для обработки данных с использованием сенсоров на основе оксида металла (Рис. 2). Горизонтальные оси представляют собой первую и вторую проекции линейного дискриминантного анализа – метода извлечения признаков. Вертикальная ось – функция распределения вероятностей для каждого кофе по двум дискриминантным параметрам (Рис. 2).

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы являлся выбор подходящего метода обработки выходных сигналов чувствительного элемента датчика жидкости и классификация сортов тестируемых образцов на основе измеренных физических параметров, а также их сопоставление с эталонными образцами.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Для исследований влияния жидкости на акустический отклик волн Лэмба использовалась многоканальная линия задержки, подобная описанной в работе [4]. Четыре пары входных и выходных встречно-плетерных преобразователей (ВПП) с периодом 200 мкм располагались по кругу на трехдюймовой



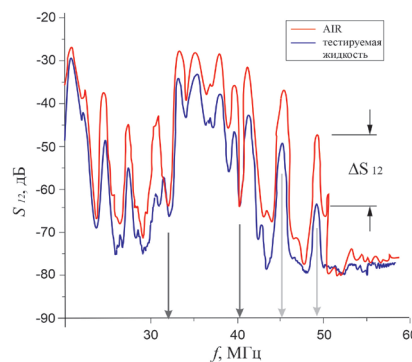
**Рис. 3.** Схематическое изображение (а) и фото (б) экспериментального образца с 4-мя акустическими каналами на одной пьезоэлектрической пластине [4]. 1 – пластина, 2 – встречно-иттербиевые преобразователи (ВИПП), 3 – жидкостная кювета. Акустические каналы образуют углы  $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$  с кристаллографической осью X. Диаметр кюветы 18 мм.

пластине  $\text{LiNbO}_3$  поворотного  $128^\circ\text{Y}$ -среза (углы Эйлера  $0^\circ, 37.86^\circ, \Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$ ), толщиной  $h = 500$  мкм. Одна поверхность пластин была шлифована (верхняя) и другая – полирована (нижняя). На верхней поверхности между ВИПП размещалась тefлоновая кювета для тестируемой жидкости. В каждом из 4-х каналов (направления распространения  $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  и  $90^\circ$  к оси X) возбуждалось по 7 волн разных порядков  $n$ . В результате общее число волн, зондирующих тестируемую жидкость, составляло 28. Экспериментальный образец представлен на **Рис. 3**.

На данный момент известно 5 базовых вкусов: соленый, сладкий, кислый, горький, умами [8]. В работе в качестве таковых использовались 5 видов 0.9% водных растворов: поваренной соли, которая соответствует соленому вкусу, сахара – сладкий вкус, лимонной кислоты – кислый, настойки полыни – горький и глутаминовой кислоты – умами.

Методика акустических измерений подробно описана в работе [4]. Каждая акустическая волна под действием жидкости испытывает суммарное поглощение (т.е. изменение амплитуды волны), которое обусловлено вязкоупругими потерями, акустоэлектронным взаимодействием и излучением (радиацией) волн в жидкости, которое возникает при высокой скорости распространения волны в пластине по сравнению со скоростью продольной объемной акустической волны в жидкости ( $V_n > V_{ж}$ ) (**Рис. 4**) [9-10].

В процессе эксперимента в кювету сначала наливался первый раствор, например, отвечающий за соленый вкус, и проводилось по 7 измерений в каждом из 4 каналов (всего 28). Далее жидкость извлекалась шприцом, емкость промывалась дистиллированной водой и высушивалась. После этого вводился следующий раствор для тестирования. Изменения амплитуд



**Рис. 4.** Типичный вид частотной зависимости вносимых потерь  $\Delta S_{12}$ , измеренных в одном из акустических каналов экспериментального образца (**Рис. 3**) на воздухе (красная линия) и с тестируемой жидкостью (тж) в кювете (синяя линия). Пластина:  $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ ,  $h = 500$  мкм,  $\lambda = 200$  мкм,  $h/\lambda = 2.5$ ,  $\Theta = 60^\circ$ . Тестируемая жидкость: водный раствор  $\text{NaCl}$  ( $\sigma = 6$  Сим/м, 200 мг). Диаметр кюветы  $L = 18$  мм. Светлыми стрелками указаны моды с большими суммарными потерями. Темными стрелками показаны моды с малыми суммарными потерями.

волн  $\Delta S_{12}$ , возникающие при введении каждого раствора (**Рис. 4**), служили акустическими откликами датчика, которые подвергались последующей обработке.

Вначале измеренные "отклики" представлялись в виде полярных гистограмм, по углу которых откладывался номер моды  $n$  или ее частота, а по радиусу – отличие  $\Delta S_{12}$  этого сигнала от сигнала той же моды для воздуха в дБ (**Рис. 4**). Идентификация веществ осуществляется путем сравнения формы, площади, максимумов и минимумов гистограмм, измеренных для тестируемой жидкости и для жидкости заранее заданного стандарта. [4] Площадь  $S$  гистограмм определяется простым суммированием составляющих ее треугольников, боковые стороны которых – отклики соседних мод  $\Delta S_{12}(n)$  и  $\Delta S_{12}(n+1)$ , а угол между ними –  $\beta = 360^\circ/n$ , где  $n$  – суммарное количество используемых мод во всех каналах (1).

$$S = 0.5 \sin \beta \sum \Delta S_{12}(n) \Delta S_{12}(n+1). \quad (1)$$

Затем, для идентификации жидких веществ по тем же откликам  $\Delta S_{12}$ , применялся метод главных компонент [12]. В методах анализа многомерных данных важное место занимает метод главных компонент, целью которого является снижение размерности многомерных данных, сохраняя максимально возможную информативность [11-12].

В конечном итоге анализ и классификация вкуса и запаха происходит по алгоритму, представленному на **Рис. 5**. Он включает в себя снятие сигнала с датчика, обработку измерений,

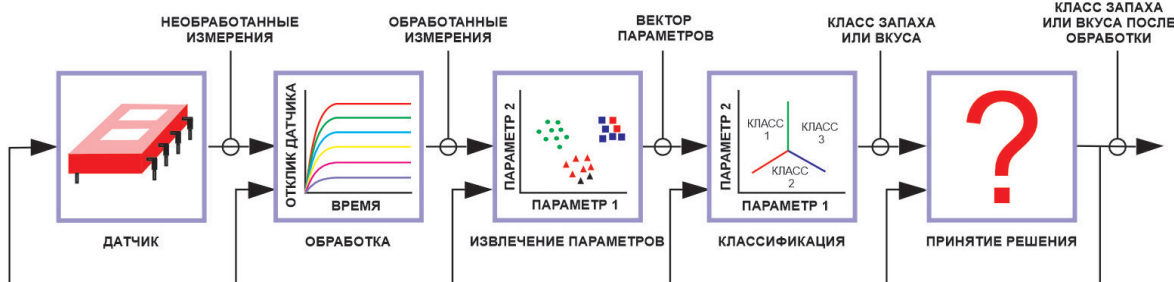


Рис. 5. Алгоритм определения класса запаха или вкуса с помощью нейросетевого анализа.

извлечение параметров, определение класса запаха или вкуса и окончательную классификацию тестируемого вещества.

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате эксперимента для каждой жидкости была получена совокупность 28 акустических откликов  $\Delta S_{12}$ , отвечающим разным волнам и разным каналам в пластинах ниобата лития. Ниже представлены полярные гистограммы 5-ти основных вкусов (соленого, сладкого, кислого, умами и горького), полученные с помощью этих акустических откликов.

Из представленных гистограмм видно, что для сильно отличающихся жидкостей-вкусов соответствующие гистограммы различаются по форме и площади. Также видно (Рис. 6, Таблица 1), что хотя максимальное отличие площадей достигает 2.8 раз, форма многих гистограмм подобна друг другу (Рис. 6), что затрудняет классификацию

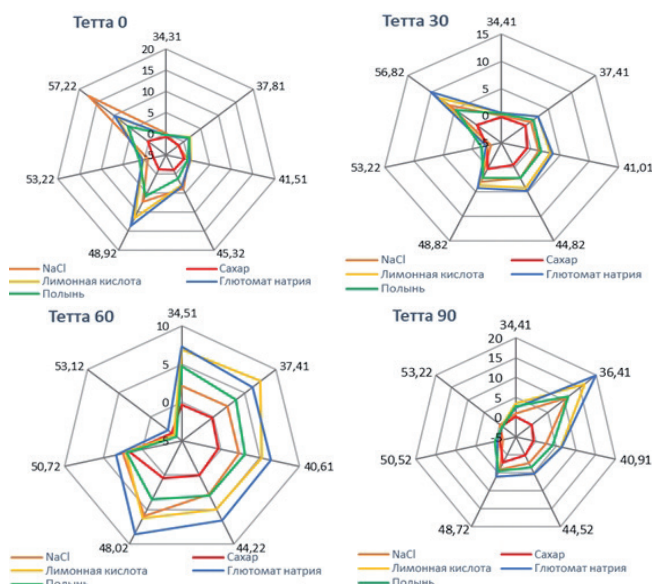


Рис. 6. Гистограммы акустических откликов  $\Delta S_{12}$  водных растворов 5-ти базовых жидкостей с концентрацией 0.9%, измеренные в 4 каналах пластины  $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$  с нормированной толщиной  $h/\lambda = 2.5$ .

Таблица 1

Площади гистограмм акустических откликов  $\Delta S_{12}$  водных растворов 5-ти базовых веществ с концентрацией 0.9%, рассчитанные по формуле (1).

$\Theta^\circ$	$S_1$ , дБ <sup>2</sup> солёный	$S_2$ , дБ <sup>2</sup> сладкий	$S_3$ , дБ <sup>2</sup> кислый	$S_4$ , дБ <sup>2</sup> умами	$S_5$ , дБ <sup>2</sup> горький
0	564.1(2.07)	273 (1)	573.3 (2.1)	597.7 (2.18)	474.6 (1.74)
30	416.9 (1.38)	303.7 (1)	511.1 (1.69)	544.4 (1.8)	430.5 (1.42)
60	465.5 (1.5)	310.4 (1)	632.9 (2.04)	708.2 (2.29)	477.4 (1.54)
90	512.6 (1.55)	332.3 (1)	727.6 (2.19)	756.9 (2.8)	591.62 (1.79)

даже сильно отличающихся жидкостей. Причем подобие формы гистограмм разных жидкостей будет, естественно, усиливаться при сближении физических свойств этих жидкостей.

Этот недостаток преодолевается с помощью метода главных компонент (РСА), примененный к той же совокупности акустических откликов  $\Delta S_{12}$  (Рис. 7). Данные состояли из пяти наборов измерений для каждой исследуемой жидкости. В каждый набор измерений вошли по 7 значений откликов с каждого из 4 каналов – всего 28 признаков для каждого образца. Для применения РСА каждый вектор признаков был смещён на среднее и нормирован на дисперсию. На Рис. 7

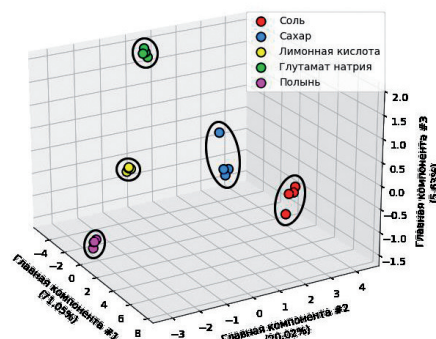


Рис. 7. Визуализация результатов применения метода главных компонент к суммарным потерям акустических волн  $\Delta S_{12}$  всех акустических каналов акустоэлектронного датчика, представленного на рис. 3. Точки разного цвета соответствуют жидкостям с разным вкусом. Каждый выделенный кластер точек отмечен темным эллипсом.

представлен итоговый результат применения метода главных компонент.

Из Рис. 7 видно, что три выбранных главных компоненты в общей сумме объясняют 96.7% дисперсии в данных. Так же видно, что точки в осях выбранных главных компонент, соответствующие одинаково маркированным исследуемым образцам сгруппировались в кластеры, отмеченные темными эллипсами, а расстояние между точками внутри кластеров каждой жидкости много меньше расстояния между кластерами разных жидкостей, что позволяет надежно отличить одну жидкость от другой. Немаловажно отметить, что в пространстве выбранных главных компонент все исследуемые типы жидкостей полностью разделены.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в данной работе, показали, что применительно к акустоэлектронным датчикам метод главных компонент дает более четкое разделение вкусов, чем полярные гистограммы. Такая задача является тривиальной и не требует дополнительного использования алгоритмов машинного обучения (или, в частности, нейросетевых алгоритмов).

В тоже время, для решения сходных задач, с более сложным массивом экспериментальных данных могут подойти такие алгоритмы как, например, нейросети на основе CNN (сверточная нейронная сеть) для классификации по частотной зависимости, классические методы машинного обучения, такие как метод опорных векторов, а также случайный лес и градиентный бустинг для работы с табличными данными.

Следующим этапом работ по оптимизации методики обработки откликов акустоэлектронных датчиков будет применение различных методов классификации для близких по вкусу жидкостей и сходных по запаху газов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фрайден Дж. *Мир электроники. Современные датчики. Справочник*. М., Техносфера, 2006.
2. Викторов ИА. *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике*. М., Наука, 1966.
3. Красников ГЯ, Горнев ЕС, Матюшкин ИВ. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания. *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*, М, Наука, 2017, с. 51.
4. Анисимкин ВИ, Воронова НВ. Интегральная решетка акустических датчиков для распознавания жидкостей микролитрового объема. *Известия РАН*.

*Сер. физ.*, 2017, 81(8):1010-1013. DOI: 10.7868/S0367676517080014.

5. Sehra G, Cole M, Gardner JW. Miniature taste sensing system based on dual SH-SAW sensor device: an electronic tongue. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 103(1-2):233-239; doi: 10.1016/j.snb.2004.04.055.
6. Troy Nagle H, Susan S. Schiffman and Ricardo Gutierrez-Osuna. The how and why of electronic noses. *IEEE Spectrum*, 1998, 35(9):22-34..
7. Terakawa Y, Kondoh J. Numerical and experimental study of acoustic wave propagation in glass plate/water/128YX-LiNbO<sub>3</sub> structure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, Vol. 59, SKKC08; doi: 10.35848/1347-4065/ab84ae.
8. Holmes B. *Flavor: the science of our most neglected sense*. London, WH Allen, 2017, 310 p.
9. Caliendo C. Longitudinal Modes along Thin Piezoelectric Waveguides for Liquid Sensing Applications *Sensors*, 2015, 15(6):12841; doi: 10.3390/s150612841.
10. White RM, Wicher PJ, Wenzel SW, Zellers ET. Plate-mode ultrasonic oscillator sensors. *IEEE Trans. on Ultras., Ferroel. and Freq. Contr.*, 1987, 34(2):162.
11. Ибятков РИ, Киселева НГ, Валиев АА. Сб. трудов. Секция 1. Акт. пробл. фунда. и прикл. математики II междунаучно-практич. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Набережные Челны, Изд. Набережнечел. гос. пед. ун-т, 2017, с. 21.
12. Кожевников ВС, Горнев ЕС, Мещанинов ФП, Жевненко ДА. Анализ методов математического моделирования мемристоров. *Межд. форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Межд. научн. конф. «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»*, 2019, с. 556.

**Агейкин Никита Алексеевич**

*м.и.с.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: ageykin\_niki@mail.ru

**Анисимкин Владимир Иванович**

*д.ф.-м.н.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: anis@cplire.ru

**Воронова Наталия Владимировна**

*к.ф.-м.н.*

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: nvoronova@niime.ru

**Тельминов Олег Александрович**

*к.т.н.*

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: otelminov@niime.ru

**Шамин Евгений Сергеевич**

*аспирант*

НИИ молекулярной электроники

Москва 124460, Зеленоград, Россия

E-mail: eshamin@niime.ru



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.331

## Алгоритм совместной оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации сигналов с возможностью регулирования точности оценки

Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Рехаб Х.К.Х.А.А., Диноченко К.В., Крюков Я.В., Калашникова Н.Г.

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

E-mail: [sema.fandmc3@mail.ru](mailto:sema.fandmc3@mail.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [hashemkhaled950@gmail.com](mailto:hashemkhaled950@gmail.com), [k.dinochenko@yandex.ru](mailto:k.dinochenko@yandex.ru), [iakov.v.kryukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kryukov@tusur.ru), [natalia.g.kalashnikova@tusur.ru](mailto:natalia.g.kalashnikova@tusur.ru)

Поступила 26.03.2024, рецензирована 02.04.2024, принята 07.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Представлен анализ влияния ошибок синхронизации на обработку сигнала, дан обзор существующих подходов оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации, предложен новый подход, позволяющий совместно оценить смещения по времени и частоте, обеспечить более точную оценку по сравнению с существующими аналогами и, более того, регулировать точность оценки дробной ошибки и временной, и частотной синхронизации.

**Ключевые слова:** линейно-частотная модуляция, Long Range, частотная синхронизация, временная синхронизация, Internet of Things

УДК 621.376

**Для цитирования:** Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Рехаб Х.К.Х.А.А., Диноченко К.В., Крюков Я.В., Калашникова Н.Г. Алгоритм совместной оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации сигналов с возможностью регулирования точности оценки. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(3):331-340. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.331.

## Algorithm for joint estimation and compensation of signals time and frequency synchronization errors with estimation accuracy control

Semen M. Mukhamadiev, Eugeny V. Rogozhnikov, Hashem Khaled Hashem Abdelkader Aly Rehab, Kirill V. Dinochenko, Yakov V. Kryukov, Natalya G. Kalashnikova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, <https://tusur.ru/>  
Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: [sema.fandmc3@mail.ru](mailto:sema.fandmc3@mail.ru), [evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru](mailto:evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru), [hashemkhaled950@gmail.com](mailto:hashemkhaled950@gmail.com), [k.dinochenko@yandex.ru](mailto:k.dinochenko@yandex.ru), [iakov.v.kryukov@tusur.ru](mailto:iakov.v.kryukov@tusur.ru), [natalia.g.kalashnikova@tusur.ru](mailto:natalia.g.kalashnikova@tusur.ru)

Received March 14, 2023, peer-reviewed March 20, 2023, accepted March 24, 2023

**Abstract:** An analysis of the influence of synchronization errors on signal processing is presented, a review of existing approaches for estimating and compensating for time and frequency synchronization errors is given, a new approach is proposed that allows joint evaluation of time and frequency offsets, providing a more accurate estimate compared to existing analogues and, moreover, regulating accuracy of fractional error estimation of both time and frequency synchronization.

**Keywords:** chirp spread spectrum, Long Range, frequency synchronization, time synchronization, Internet of Things

UDC 621.376

*For citation:* Semen M. Mukhamadiev, Eugeny V. Rogozhnikov, Hashem Khaled Hashem Abdelkader Aly Rehab, Kirill V. Dinoshenko, Yakov V. Kryukov, Natalya G. Kalashnikova. Algorithm for joint estimation and compensation of signals time and frequency synchronization errors with estimation accuracy control. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):331-340e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.331.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. **ВВЕДЕНИЕ (332)**
  2. **ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ (333)**
    - 2.1 **МОДУЛЯЦИЯ (333)**
    - 2.2 **ДЕМОДУЛЯЦИЯ (333)**
  3. **ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ДЕМОДУЛЯЦИЮ ЛЧМ СИГНАЛОВ (333)**
  4. **СУЩЕСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ В ОБЛАСТИ ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЛЧМ СИГНАЛОВ (335)**
  5. **ПРЕДЛОЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ (336)**
  6. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ (339)**
- ЛИТЕРАТУРА (340)**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В контексте развития Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в последние годы наблюдается активное развитие сетей большого радиуса действия с низким энергопотреблением [1,2]. Данное развитие обусловлено необходимостью обеспечения связи на значительных расстояниях с устройствами IoT, где также важно минимальное энергопотребление. Технология Low-power Wide-area Network (LoRaWAN) представляет собой одно из наиболее широко используемых и признанных решений в данной области [3,4]. Она включает в себя набор протоколов, в том числе физический уровень под названием Long Range (LoRa) и уровень MAC называемый LoRaWAN. Спецификация LoRa не доступна публично из-за того, что LoRa является запатентованным стандартом компании Semtech [5], а уровень MAC – открытым стандартом LoRa Alliance [6].

Хотя число исследований физического уровня технологии LoRa продолжает расти [7], ключевые аспекты этого уровня до сих пор не полностью исследованы. Однако механизмы модуляции и демодуляции широко изучены

[8-10]. Для передачи данных эта технология использует сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Модуляция таких сигналов происходит путем изменения частоты сигнала. Из-за особенностей сигналов ЛЧМ они могут быть получены и обработаны даже при низком отношении сигнал/шум (ОСШ) вплоть до вероятности ошибки в 1 бит на миллион переданных при ОСШ, равном минус 18 дБ.

Однако помехоустойчивость подобных систем может значительно снижаться, так как ошибки временной и частотной синхронизации оказывают негативное воздействие на результат демодуляции ЛЧМ сигналов [11-16]. Существует множество методов для оценки и коррекции таких типов ошибок [11-16]. Основной трудностью является то, что частотное и временное смещение трудно различить из-за схожести искажений, которые они вносят в ЛЧМ сигналы, что также является предметом научного исследования [11,12]. Создаются алгоритмы, которые позволяют оценить отдельно временное и частотное смещение. Несмотря на разнообразие алгоритмов для оценки подобных типов ошибок, некоторые из них характеризуются повышенной сложностью [13], а другие фокусируются только на одном типе ошибок – только на временном или только на частотном смещении [14,15].

В этой статье представлен трехэтапный метод оценки и компенсации ошибок временной и частотной синхронизации для ЛЧМ сигналов. В ходе исследования также демонстрируются особенности влияния ошибок синхронизации на процесс демодуляции сигналов ЛЧМ.

Работа содержит 4 раздела. В первом разделе описываются принципы формирования и обработки сигналов ЛЧМ. Второй раздел посвящен анализу влияния ошибок синхронизации на демодуляцию ЛЧМ сигналов. Третий раздел содержит

обзор существующих методов оценки и компенсации ошибок синхронизации. В четвертом разделе описан предложенный метод оценки и компенсации временной и частотной ошибки синхронизации, а также проведено моделирование.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Описание процессов модуляции и демодуляции ЛЧМ сигналов уже представлены в ряде научных работ [8-10]. Ниже будет дано краткое описание этапов модуляции и демодуляции таких сигналов. Основные параметры ЛЧМ сигналов, а также переменные, применяемые в работе, представлены в **Таблице 1**.

Заметим, что в рамках данного исследования при построении зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ будет применяться коэффициент расширения спектра, равный 6. Значения коэффициента расширения спектра меньше 6 не предусмотрены стандартом Semtech. Это значение соответствует режиму минимальной помехоустойчивости сигнала, что позволяет получить нижнюю границу производительности системы. Если требуется увеличить помехоустойчивость, это можно сделать путем увеличения значения SF.

### 2.1 Модуляция

В данной статье будут использоваться термины *upchirp* и *downchirp*, которые обозначают ЛЧМ сигналы с линейно возрастающей и убывающей частотами соответственно. В комплексной форме *upchirp* записывается как:

$$\mathbf{x}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot n^2}{N}\right), \quad (1)$$

где  $n = 0 \dots N-1$ .

Комплексно-сопряженная версия *upchirp* сигнала называется *downchirp*:

$$\bar{\mathbf{x}}[n] = \exp\left(\frac{-li \cdot \pi \cdot n^2}{N}\right). \quad (2)$$

Модуляция выполняется путем добавления смещения частоты к немодулированному *upchirp* (1) сигналу. Либо можно изначально сформировать сигнал со смещением частоты:

$$\mathbf{s}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot (n^2 + 2 \cdot k \cdot n)}{N}\right), \quad (3)$$

где  $\mathbf{s}[n]$  – модулированный *upchirp*;  $k$  – номера символа модуляции.

Исходя из представленных выше параметров, очевидно, что, если сигнал содержит  $N$  отсчетов, в нем можно сохранить до  $N$  различных символов информации. При коэффициенте расширения спектра, равном 6, каждый такой сигнал содержит 6 бит данных, и число возможных состояний для одного символа модуляции равно 64.

### 2.2 ДЕМОДУЛЯЦИЯ

При демодулировании необходимо модулированный сигнал перемножить с немодулированным сигналом *downchirp*, что дает в результате гармонический сигнал с некоторой частотой, который называется *dechirp* сигнал:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{s}[n] \bar{\mathbf{x}}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot 2 \cdot k \cdot n}{N}\right), \quad (4)$$

где  $\mathbf{y}[n]$  – *dechirp* сигнал.

Для определения переданного символа модуляции, обозначаемого  $k$ , необходимо определить частоту *dechirp* сигнала. Для этого необходимо вычислить модуль быстрого преобразования Фурье *dechirp* сигнала и найти позицию максимального аргумента в спектре:

$$\mathbf{Y}[n] = \text{FFT}(\mathbf{y}[n]), \quad (5)$$

$$\hat{k} = \arg \max(|\mathbf{Y}[n]|),$$

где  $\mathbf{Y}[n]$  – Фурье преобразование *dechirp* сигнала;  $\hat{k}$  – демодулированный символ.

## 3. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ДЕМОДУЛЯЦИЮ ЛЧМ СИГНАЛОВ

Ошибка частотной синхронизации может возникнуть из-за эффекта Доплера или

**Таблица 1**

Параметры ЛЧМ сигналов

Параметр	Обозначение	Значение
Тип сигнала	-	Комплексный
Полоса сигнала	BW	1 МГц
Коэффициент расширения спектра	SF	6
Количество отсчетов в сигнале	N	$2^{\text{SF}}$

нестабильности частоты кварцевых генераторов в принимающих или передающих устройствах. Эта проблема особенно критична в узкополосных сигналах или сигналах с большой базой. Причина ошибки временной синхронизации лежит в неправильно выполненной кадровой синхронизации. Обычно приходится иметь дело с обоими типами ошибок одновременно.

Согласно исследованиям, ошибки синхронизации можно разделить на два типа: целые и дробные [11-15]. Например, если период дискретизации сигнала равен  $t$ , а сам сигнал содержит  $N$  отсчетов, то временное смещение сигнала, кратное периоду дискретизации, представляет собой целую ошибку. Если же временное смещение меньше  $t$ , это классифицируется как дробная ошибка. Это же относится и к частотной области: целые ошибки – это ошибки, кратные частотному интервалу по величине; дробные ошибки – это ошибки, значение которых меньше частотного интервала. Если полоса сигнала равна  $BW$ , то частотный интервал будет равен  $BW/N$ . Согласно исследованиям [11-15], наиболее негативное влияние на процесс демодуляции оказывает дробная ошибка. Например, временное смещение равно половине периода дискретизации сигнала, а также частотное смещение равно половине частотного интервала.

Для понимания в качестве иллюстрации влияния дробной ошибки обоих типов синхронизации на амплитуду пика в спектре dechirp сигнала приведен Рис. 1. В продемонстрированном примере смещение в спектральной области соответствует половине частотного интервала, а смещение во временной области – половине периода дискретизации.

При временном и частотном смещении происходит распределение энергии на соседние пики с основного, приводя к снижению амплитуды каждого из пиков. При обоих типах ошибки энергия также разделяется между двумя пиками, но расстояние между ними возрастает. Следовательно, при наличии временного или частотного смещения вероятность успешной демодуляции при низком ОСШ существенно снижается [11-15].

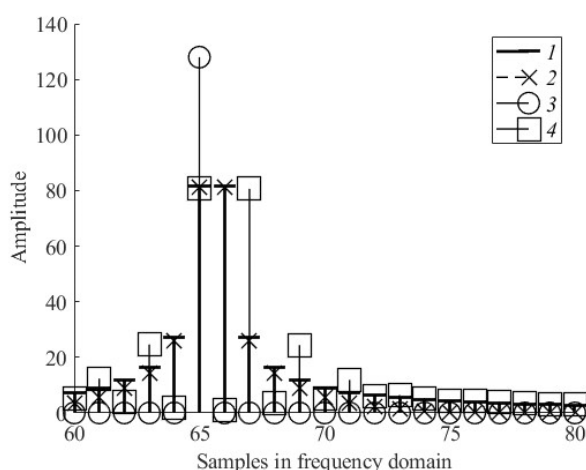


Рис. 1. Влияние дробной ошибки временной и частотной синхронизации на dechirp сигнал. 1 – частотное смещение, 2 – временное смещение, 3 – без смещения, 4 – частотное и временное смещение.

Происходит это по причинам как уменьшения амплитуды пика, так и возрастания вероятности выбора неверного пика.

На Рис. 2 показан эффект целочисленной ошибки частотной и временной синхронизации на Фурье пик после демодуляции. Временное смещение равно периоду дискретизации, частотное смещение равно частотному интервалу.

Временное и частотное смещение, согласно Рис. 1. и Рис. 2., оказывают схожее влияние на dechirp сигнал. Дробные ошибки являются наиболее негативными, так как помимо

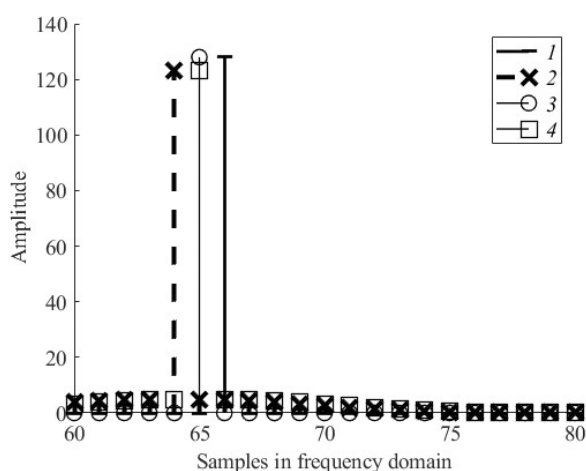


Рис. 2. Влияние целочисленной ошибки временной и частотной синхронизации на dechirp сигнал. 1 – частотное смещение, 2 – временное смещение, 3 – без смещения, 4 – частотное и временное смещение.

смещения пика, также снижают его амплитуду, что значительно затрудняет выполнение оценки в отличие от целых ошибок.

#### 4. СУЩЕСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ В ОБЛАСТИ ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЛЧМ СИГНАЛОВ

В работе [14] применяется двухэтапная оценка смещения частоты. Оценка выполняется на основании положения пика в частотной области немодулированных символов преамбулы и алгоритма Шмидла и Кокса [16]. Однако в работе не учитывается наличие временного смещения и рассматривается только частотная синхронизация, а также алгоритм Шмидла и Кокса не обеспечивает высокую точность оценки, так как точность алгоритма Шмидла и Кокса снижается при низком ОСШ. Подход, демонстрирующий более высокую точность оценки, был представлен в работе [15]. Авторы вычисляли корреляцию между принятыми символами преамбулами и опорными, в которые вводилось смещение частоты. Алгоритм также обладает низкой сложностью за счет применения алгоритма быстрого поиска подходящего опорного сигнала. Однако авторы также не рассматривали наличие ошибки временной синхронизации.

Первое описание алгоритма компенсации как временного, так и частотного смещения с низкой вычислительной сложностью представлено в работе [12], где также подчеркивается важность разделения ошибок синхронизации на дробные и целые. Авторы используют особенности влияния временного смещения на  $\text{downchirp}$  и  $\text{upchirp}$  сигналы, чтобы выполнить совместную оценку целого смещения времени и частоты. Далее происходит вычисление дробного смещения частоты, используя ранее полученные оценки, после чего вычисляется дробное временное смещение.

В работе [13] также предлагается алгоритм совместной оценки временного и частотного смещения, основанный на методе максимального правдоподобия. Однако алгоритм отличается высокой вычислительной сложностью, что затрудняет его применение для IoT систем.

Новый подход к оценке ошибки временной и частотной синхронизации продемонстрирован в работе [11]. Процесс оценки и компенсации разделен на три этапа. На первом этапе вычисляется дробное смещение частоты с применением предложенного авторами алгоритма и выполняется компенсация. На втором этапе выполняют предварительную оценку дробного временного смещения, также используя предлагаемый в их работе подход. На третьем этапе авторы применяют подход к совместной оценке целого смещения частоты и времени из работы [12], после чего выполняют уточняющую оценку дробного временного смещения. Стоит отметить, что авторы подчеркивают важность оценки и компенсации дробного смещения частоты перед выполнением оценки целого смещения, так как это значительно влияет на итоговый результат работы алгоритма. Однако предлагаемый алгоритм оценки дробной ошибки частотной синхронизации выполняется с помощью вычисления разности фаз основного пика в нескольких подряд идущих символах. Как уже было сказано в разделе 3, ошибка частотной и временной синхронизации производит практически идентичный эффект на спектр  $\text{dechirp}$  сигнала. Следовательно, алгоритм дробной оценки, в котором требуется сперва определить основной пик, может продемонстрировать ухудшение точности при одновременном наличии дробных ошибок временной и частотной синхронизации. Так как есть вероятность неверного определения основного пика. Дополнительно стоит учесть многолучевое распространение, которое приводит к появлению множества пиков вокруг основного [17]. Также отметим, что авторы не уточняют способ компенсации дробной ошибки временного смещения. Компенсация данного вида ошибок может быть выполнена несколькими различными способами, значительно различающимися с точки зрения вычислительной сложности. Например, согласно свойствам Фурье, устранение дробного смещения возможно осуществить путем умножения спектра сигнала на соответствующие множители, что является вычислительно затратной операцией. Менее затратным подходом является применение фильтра Фарроу [18].

В работе [19] авторы перед этапом вычисления Фурье преобразования интерполировали сигнал в 10 раз и по пику с максимальной амплитудой определяли уход частоты. Целью работы была не частотная синхронизация, а идентификация пользователей по индивидуальному уходу частоты, который для каждого пользователя был уникальным.

### 5. ПРЕДЛОЖЕННЫЙ АЛГОРИТМ СИНХРОНИЗАЦИИ

В разделе 2 было отмечено, что существует 4 вида возможных ошибок, которые рассматриваются в работах, посвященных синхронизации:

1. Дробная ошибка временной синхронизации.
2. Целая ошибка временной синхронизации.
3. Дробная ошибка частотной синхронизации.
4. Целая ошибка частотной синхронизации.

В данной работе предлагается трехэтапный алгоритм, позволяющий выполнить оценку всех вышеперечисленных видов ошибок, а также компенсацию. Оценка выполняется с применением символов преамбулы и точность оценки увеличивается с ростом числа символов преамбулы. В преамбуле содержится 8 сигналов, и расположены они в порядке, представленном на **Рис. 3**.

Первые два этапа оценки базируются на работах [12] и [19]. На третьем этапе вычисляется оценка смещения частоты согласно алгоритму Шмидла и Кокса.

На первом этапе принятый  $upchirp$  и  $downchirp$  перемножаются с опорными  $downchirp$  и  $upchirp$  соответственно, а также принятый  $upchirp$  перемножается с окном Тьюки (6). Далее к обоим сигналам добавляется определенное количество нулей, чтобы увеличить длительность сигнала в 8 раз, и для каждого сигнала вычисляется быстрое преобразование Фурье. Увеличение в



**Рис. 3.** Структура преамбулы, применяемая в предложенном алгоритме. На рисунке U обозначает  $upchirp$ , а D –  $downchirp$ .

8 раз необходимо, чтобы заполненный нулями сигнал имел количество отсчетов, кратное степени двойки. Это позволит применить быстрое преобразование Фурье. Согласно авторам [19], при 8-и кратном увеличении длительности сигнала таким образом можно выполнить оценку частоты с точностью до  $BW/(N \cdot 8)$ .

$$\mathbf{r}_{up}[n] = \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_1[n] \bar{\mathbf{x}}[n] \mathbf{T}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right)$$

$$\mathbf{r}_{down}[n] = \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_2[n] \mathbf{x}[n] \mathbf{T}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right)$$

$$k_{up} = \arg \max(|\mathbf{r}_{up}[n]|)$$

$$k_{down} = \arg \max(|\mathbf{r}_{down}[n]|)$$

$$\bar{k}_{up} = \begin{cases} \frac{k_{up} - N \cdot 8}{8}, & k_{up} > \frac{N \cdot 8}{2} \\ \frac{k_{up}}{8}, & k_{up} \leq \frac{N \cdot 8}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{k}_{down} = \begin{cases} \frac{k_{down} - N \cdot 8}{8}, & k_{down} > \frac{N \cdot 8}{2} \\ \frac{k_{down}}{8}, & k_{down} \leq \frac{N \cdot 8}{2} \end{cases}$$

где  $\mathbf{r}_{up}[n]$ ,  $\mathbf{r}_{down}[n]$  – демодулированные интерполированные  $upchirp$  и  $downchirp$  соответственно;  $\{\}$  – конкатенация двух векторов;  $\mathbf{T}[n]$  – окно Тьюки;  $\mathbf{0}_{N(8-1)}$  – вектор нулей;  $\bar{k}_{up}, \bar{k}_{down}$  – уточненные с помощью интерполяции положения пиков.

Но в дополнение к оценке частоты в данной работе предлагается применить способ совместной оценки из работы [12], что, в свою очередь, позволит выполнить оценку временного смещения с точностью до  $t/8$  (7).

$$STO = \frac{\bar{k}_{up} - \bar{k}_{down}}{2},$$

$$STO_{int} = \lfloor STO \rfloor,$$

$$STO_{frac} = STO - STO_{int}, \quad (7)$$

$$CFO_{int} = \frac{BW}{N} \cdot \frac{\bar{k}_{up} + \bar{k}_{down}}{2},$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – округление;  $STO_{int}$  – оценка целой ошибки временной синхронизации;  $STO_{frac}$  – оценка дробной ошибки временной

синхронизации;  $CFO_{int}$  – оценка целой ошибки частотной синхронизации.

Полученные оценки (7) подлежат устранению. Целое смещение частоты может быть устранено посредством частотной компенсации согласно свойствам преобразования Фурье. Целое временное смещение устраняется циклическим сдвигом сигнала. Компенсация дробного временного смещения выполняется с помощью фильтра Фарроу.

В разделе 2 и 3 было сказано, что при определенных значениях временного или частотного смещения оценка будет выполнена неверно. Например, при временном смещении, равном половине периода дискретизации, в спектре появится два пика, и неверная оценка приведет к тому, что вместо устранения ошибка будет увеличена. Однако в этом случае дробная оценка, равная половине периода дискретизации, станет целой ошибкой, равной периоду дискретизации. Устранить целую ошибку значительно проще. Это же касается и частотного смещения. Чтобы учесть этот сценарий, на втором этапе повторяются те же действия, что и на первом этапе, однако используется уже в два раза больше сигналов – два  $upchirp$  и два  $downchirp$ , но оконная функция Тьюки не используется (8).

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{up}[n] &= \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_3[n]\bar{\mathbf{x}}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right) + \\ &+ \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_4[n]\bar{\mathbf{x}}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right), \\ \mathbf{r}_{down}[n] &= \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_5[n]\mathbf{x}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right) + \\ &+ \text{FFT}\left(\left\{\mathbf{y}_6[n]\mathbf{x}[n], \mathbf{0}_{N(8-1)}\right\}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Компенсация выполняется также, как и на первом этапе. Таким образом, оценка на втором этапе позволит компенсировать возникшие на первом этапе ошибки. Но точность оценки все еще будет равна  $BW/(N*8)$  Гц для частотного смещения и  $t/8$  с для временного смещения.

На третьем этапе с помощью последних двух  $upchirp$  сигналов выполняется оценка частотного смещения по методу Шмидла и Кокса (9). Это позволит повысить точность уже

полученной ранее оценки. Дополнительная оценка временного смещения не выполняется, так как предполагается, что заданной точности достаточно для демодуляции с низкой вероятностью битовой ошибки.

$$\varphi = \arg\left(\sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{y}_7[n]\mathbf{y}_8^*[n]\right), \quad (9)$$

где  $\varphi$  – значение разности фаз между соседними символами.

Для определения качества работы алгоритма в работе будет вычислена среднеквадратичная ошибка (СКО) оценки частотного и временного смещения в зависимости от ОСШ. Сравним предложенный алгоритм с существующими алгоритмами Xhonneux [11] и Carolyn [12]. Данные алгоритмы были выбраны по причине того, что они обладают низкой вычислительной сложностью и предназначены для борьбы как с ошибкой частотной, так и с ошибкой временной синхронизации. Параметры моделирования представлены в **Таблице 2**.

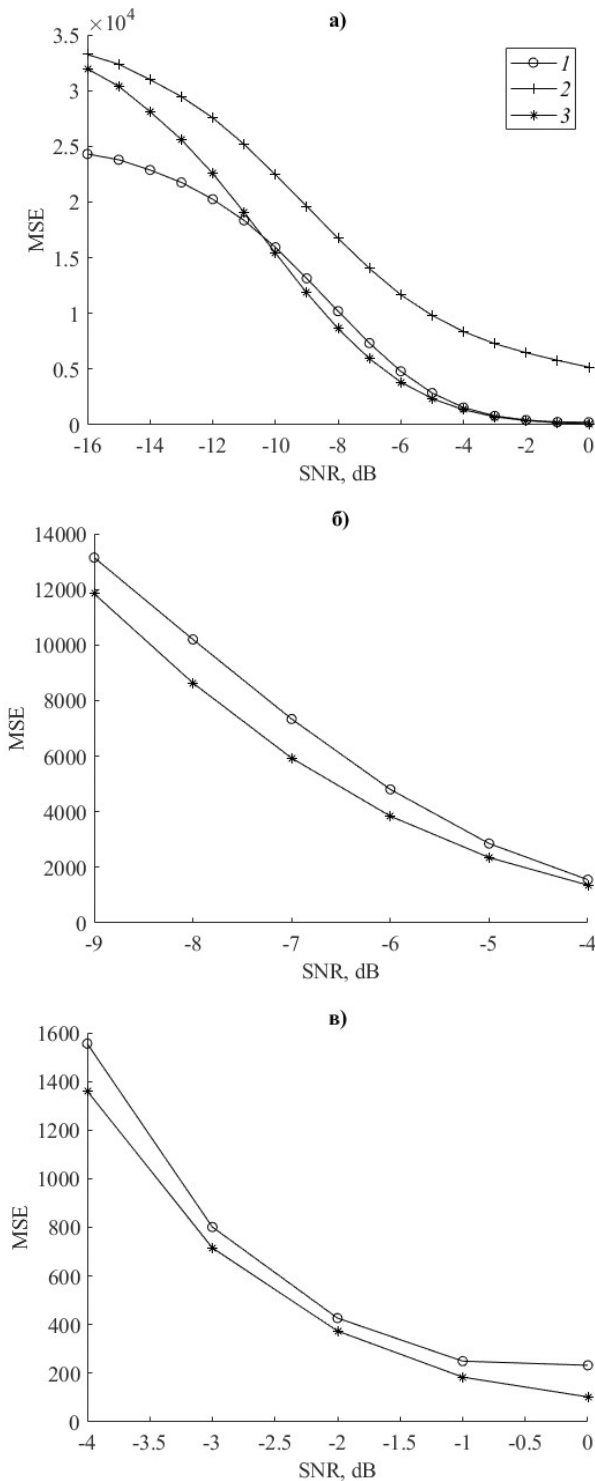
Таблица 2

Параметры моделирования

Параметр	Значение
Канал	Канал с аддитивным белым гауссовским шумом
Полоса сигнала	125 кГц
Ошибка временной синхронизации	От минус $3t$ до $3t$ , где $t$ – период дискретизации
Ошибка частотной стнхронизации	От минус $3f$ до $3f$ , где $f$ – размер частотного интервала, равный 1953 Гц
ОСШ	От минус 16 до 0 дБ

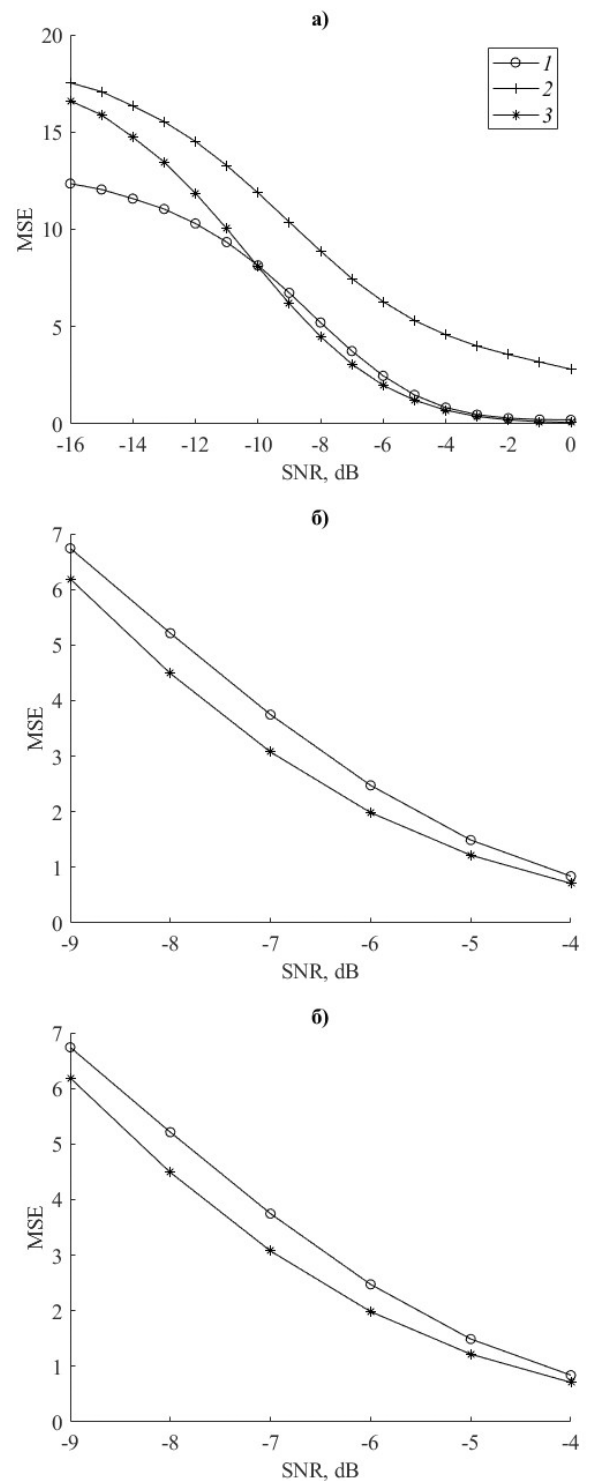
На **Рис. 4** приведены кривые зависимостей СКО от ОСШ для частотной ошибки, а на **Рис. 5** для временной ошибки. СКО ошибки временной синхронизации обозначено в периодах дискретизации. Так СКО, равное 1, соответствует временному смещению  $t$ , а СКО, равное 0.5, смещению  $0.5t$ .

На **Рис. 4** и **Рис. 5** на графиках под буквой а) размещена полная кривая, буквами б) и в) обозначены приближенные участки основной кривой. Исходя из **Рис. 4** и **Рис. 5**, алгоритм Carolyn демонстрирует наихудшие результаты, поэтому кривая для него приведена только на рисунках с буквой а). Алгоритм Xhonneux демонстрирует более низкую ошибку оценки в



**Рис. 4.** Зависимости СКО частотного смещения от ОСШ. Рисунок а) – зависимость СКО при ОСШ от минус 16 до 0 дБ, рисунок б) – зависимость СКО при ОСШ от минус 9 до минус 4 дБ, рисунок в) – зависимость СКО при ОСШ от минус 4 до 0 дБ. 1 – алгоритм Хюппеих, 2 – алгоритм Саголуп, 3 – предложенный подход.

пределах от минус 16 до минус 10 дБ ОСШ. Так при минус 16 дБ СКО ошибки оценки временного смещения для алгоритма



**Рис. 5.** Зависимости СКО временного смещения от ОСШ. Рисунок а) – зависимость СКО при ОСШ от минус 16 до 0 дБ, рисунок б) – зависимость СКО при ОСШ от минус 9 до минус 4 дБ, рисунок в) – зависимость СКО при ОСШ от минус 4 до 0 дБ. 1 – алгоритм Хюппеих, 2 – алгоритм Саголуп, 3 – предложенный подход.

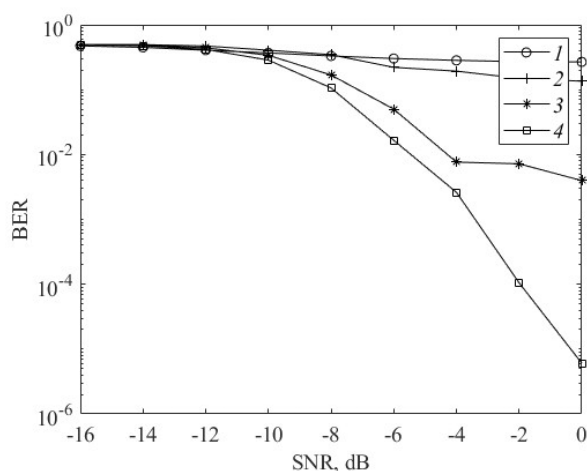
Хюппеих на 25% превосходит предложенный. СКО ошибки оценки временного смещения для алгоритма Хюппеих уже на 29%



превосходит предложенный. Однако в данном диапазоне ОСШ демодуляция сигнала с низкой вероятностью битовой ошибки при рассматриваемых параметрах сигнала не достигается, поэтому повышенная точность не является определяющим критерием и не окажет существенного влияния на вероятность битовой ошибки. Начиная с минус 9 дБ ОСШ, предложенный алгоритм демонстрирует сопоставимую или же меньшую ошибку оценки как временного, так и частотного смещения. В диапазоне от минус 9 до минус 4 дБ ОСШ предложенный метод демонстрирует превосходство в 14% для временной синхронизации и 20% для частотной. При ОСШ в пределах от минус 4 до 0 дБ точность предложенного алгоритма возрастает еще больше и превосходит аналог на 55% для ошибки частотной синхронизации и 63% для ошибки временной синхронизации. Таким образом, начиная с минус 9 дБ ОСШ, предложенный алгоритм показывает превосходящие аналог результаты.

Также проведем сравнение зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ. На **Рис. 6** приведены кривые зависимостей вероятности битовой ошибки от ОСШ для следующих сценариев:

1. Синхронизация отсутствует.
2. Предложенный алгоритм синхронизации.
3. Алгоритм Xhonneux [11].



**Рис. 6.** Сравнение предложенного алгоритма синхронизации с алгоритмами Xhonneux и Carolyn. 1 – без компенсации, 2 – алгоритм Carolyn, 3 – алгоритм Xhonneux, 4 – предложенный алгоритм.

Согласно Рис. 6, предложенный алгоритм позволяет достичь меньшей вероятности битовой ошибки, чем алгоритмы Xhonneux и Carolyn, начиная с минус 12 дБ ОСШ. Так при ОСШ, равном 0 дБ, использование предложенного алгоритма обеспечивает вероятность битовой ошибки на 3 порядка меньше, чем алгоритм Xhonneux. Также отметим, что с ростом ОСШ увеличивается и разрыв между предложенным алгоритмом и алгоритмом Xhonneux, что согласуется с результатами, представленными на Рис. 4 и Рис. 5.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен новый метод оценки ошибок временной и частотной синхронизации, а также их устранения в системах связи, использующих ЛЧМ модуляцию. Предложенный алгоритм позволяет совместно оценить ошибку временной и частотной синхронизации, а также обеспечивает более высокую точность оценки по сравнению с аналогом.

Преимуществом алгоритма помимо совместной оценки ошибки является возможность регулирования точности оценки дробной ошибки временной синхронизации. Точность частотной синхронизации не подлежит настройке, однако если высокая точность не требуется, то третий этап алгоритма может быть исключен. Чтобы избежать высокой вычислительной сложности, в работе предлагается использовать фильтр Фарроу для компенсации дробной ошибки временной синхронизации и циклический сдвиг для целой ошибки. В сравнении с существующим алгоритмом, где авторы также выполняет совместную оценку временного и частотного смещения, а также компенсацию, применение предложенного алгоритма способно уменьшить вероятность битовой ошибки более чем на 3 порядка при ОСШ, равном 0 дБ, по сравнению с аналогом. Отметим также, что точность оценки может быть увеличена при использовании большего числа символов преамбулы или же путем увеличения коэффициента расширения спектра.

Полученные результаты могут быть полезны разработчикам и исследователям помехоустойчивых или узкополосных систем связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Foubert B, Mitton N. Long-range wireless radio technologies: A survey. *Future internet*, 2020, 12(1):13.
2. Singh RK, Puluckul PP, Berkvens R, Weyn M. Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application. *Sensors*, 2020, 20(7):4794.
3. Tournier J, Lesueur F, Mouël FL, Guyon L, Ben-Hassine H. A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack. *Internet of Things*, 2020, 16(4):100264.
4. Buurman B, Kamruzzaman J, Karmakar GC. Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, 2020, 8:17179-17220.
5. Jouhari M, Saeed N, Alouini MS, Amhoud EM. A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, pp. 1841-1876.
6. TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification.
7. Haxhibeqiri J, Poorter ED, Moerman I, Hoesbeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors*, 2018, 18(11):3995.
8. Vangelista L. Frequency Shift Chirp Modulation: the LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(12):1818-1821.
9. Pasolini G. On the LoRa chirp spread spectrum modulation: Signal properties and their impact on transmitter and receiver architectures. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(1):357-369.
10. Milarokostas C, Tsolkas D, Passas N, Merakos L. A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 25(1):825-867.
11. Xhonneux M, Afisiadis O, Bol D, Louveaux J. A low-complexity LoRa synchronization algorithm robust to sampling time offsets. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(5):3756-3769.
12. Bernier C, Dehmas F, Deparis N. Low complexity LoRa frame synchronization for ultra-low power software-defined radios. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5):3140-3152.
13. Savaux V, Delacourt C, Savelli P. On time-frequency synchronization in LoRa system: From analysis to near-optimal algorithm. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(12):10200-10211.
14. Ghanaatian R, Afisiadis O, Cotting M, Burg A. LoRa Digital Receiver Analysis and Implementation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019.
15. Guan P, Yu H, Zhu H, Zhao Y. A novel residual carrier frequency offset estimation approach for LoRa systems. *Proc. 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 2020, pp. 830-834.
16. Schmidl TM, Cox DC. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE transactions on communications*, 1997, 45(12):1613-1621.
17. Demeslay C, Rostaing P, Gautier R. Theoretical performance of LoRa system in multipath and interference channels. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(9):6830-6843.
18. Farrow CW. A continuously variable digital delay element. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1988, pp. 2641-2645.
19. Eletreby R, Kumar S, Zhang D, Yağan O. Empowering low-power wide area networks in urban settings. *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, 2017, pp. 309-321.

**Мухамадиев Семен Минисович**

техник

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: sema.fandmc3@mail.ru

**Рогожников Евгений Васильевич**

кандидат технических наук, доцент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск, 634050, Россия

E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru

**Рехаб Хашем Кхалед Хашем Абделкадер Али**

инженер

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: hashemkhaled950@gmail.com

**Диноченко Кирилл Вадимович**

ассистент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: k.dinochenko@yandex.ru

**Крюков Яков Владимирович**

кандидат технических наук, доцент

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: iakov.v.kriukov@tusur.ru

**Калашникова Наталья Геннадьевна**

техник II категории

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Томск 634050, Россия

E-mail: natalia.g.kalashnikova@tusur.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.341

## Нелинейная радиофизика межзвездных перелетов: разгон макрообъектов с помощью электромагнитного излучения Дмитриев А.С.

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

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

Поступила 27.11.2023, рецензирована 04.12.2023, принята 24.04.2024

**Аннотация:** Обсуждается одна из реализаций разгона космических аппаратов на основе мощного искусственного излучения, способных за двадцать-тридцать лет (т.е. за время активной жизни одного поколения людей) достичь ближайших звезд в созвездии альфа-Центавра. Проект Breakthrough Starshot (BS, Прорыв: Звездный выстрел) предложен в 2016 году. Ключевыми новыми моментами проекта являются: 1) идея о межзвездных аппаратах сверхмалой размерности, что делает физические параметры проекта потенциально достижимыми в обозримое время; 2) модульное построение системы запуска и 3) распространение закона Мура на развитие космической техники. В качестве альтернативы схеме линейного типа «BS», ниже рассматривается закрытая кольцевая схема лазерного разгона макрообъектов. Показывается, что она перспективна для кардинального снижения пиковых требований к схеме запуска линейного типа.

**Ключевые слова:** межзвездные полеты, Альфа Центавра, нанокрафт, мощные лазеры, кольцевая схема разгона

УДК 535.8, 620.78

*Для цитирования:* Дмитриев А.С. Нелинейная радиофизика межзвездных перелетов: разгон макрообъектов с помощью электромагнитного излучения. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):341-352. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.341.

## Nonlinear radiophysics of interstellar flights: macro objects acceleration using electromagnetic radiation

Alexander S. Dmitriev

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

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

Received November 27, 2023, peer-reviewed December 04, 2023, accepted April 24, 2024

**Abstract:** We discuss one of the implementations of acceleration, based on powerful artificial radiation, of spacecraft capable of reaching the nearest stars in the constellation Alpha Centauri in twenty to thirty years (i.e., during the active life of one generation of people). The Breakthrough Starshot project (BS, Breakthrough: Starshot) was proposed in 2016. The key new aspects of the project are: 1) the idea of interstellar vehicles of ultra-small dimension, which makes the physical parameters of the project potentially achievable in the foreseeable future; 2) modular construction of the launch system and 3) extension of Moore's law to the development of space technology. As an alternative to the linear "BS" type scheme, a closed ring scheme for laser acceleration of macro-objects is considered below. It is shown to be promising for dramatically reducing the peak requirements for a linear-type micro spacecraft launch.

**Keywords:** interstellar flights, Alpha Centauri, nanocraft, power lasers, circular acceleration scheme

UDC 535.8, 620.78

For citation: Alexander S. Dmitriev. Nonlinear radiophysics of interstellar flights: macro objects acceleration using electromagnetic radiation. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):341-352e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.341.

## Посвящается 100-летию публикации статьи Фридриха Артуровича Цандера «Перелеты к другим планетам» [1]

### СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (342)
2. ПРОБЛЕМА МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ (343)
3. СИСТЕМЫ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ (343)
4. ЛАЗЕР, КАК ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ (344)
5. ПРОЕКТ «ЗВЕЗДНЫЙ ВЫСТРЕЛ» (345)
  - 5.1. КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММЫ (345)
  - 5.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ (346)
6. СХЕМА С КОЛЬЦЕВЫМ РАЗГОННЫМ БЛОКОМ (348)
  - 6.1. КОСМИЧЕСКАЯ ПРАЦА (348)
  - 6.2. КОЛЬЦЕВАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО РАЗГОНА (349)
7. ВЫВОДЫ ДЛЯ РОССИИ (350)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Тема данной статьи о звездных перелетах связана с именем Фридриха Артуровича Цандера. С одной стороны как с одним из родоначальников современной космонавтики, но с другой, почти на мистическом уровне, как автором идеи светового паруса для передвижения в космическом пространстве, идее, которая привела к наиболее реалистичной на сегодняшний день схеме реализации межзвездных перелетов. Скоро этой идее, кратко изложенной в статье «Перелеты к другим планетам» [1], исполняется сто лет.

Если сформулировать смысл настоящей статьи совсем коротко, то он звучит так. Межзвездная космонавтика в отличие от околоземной и межпланетной космонавтики технологически будет опираться не только на механику и термодинамику, но в определяющей степени на радиофизику (в основном нелинейную) в разных масштабах.

О роли визионеров в развитии науки, техники и общества: В.И. Ленин, Г. Уэллс, Ф.А. Цандер, И.А. Ефремов. Итак, все по порядку. Конец 1920 год. Только что закончилась Гражданская война. Положение в стране тяжелейшее. Еще не создан Советский Союз, но уже принят и начал выполняться план ГОЭЛРО. За этот план - социалист, великий фантаст и визионер (человек, обладающий даром предвидеть какие-то черты будущего) Герберт Уэллс уже назвал Владимира

Ильича Ленина, после личной встречи с ним и долгой беседы, кремлевским мечтателем.

В декабре В.И. Ленин присутствует на Конференции изобретателей в Москве, где Ф.А. Цандер выступил с докладом о своем проекте межпланетного корабля аэроплана. Вот что рассказал впоследствии сам Цандер об этой встрече своему соратнику Л. Корнееву [2]: «После доклада меня пригласили к В. И. Ленину. Я был очень смущен. Но Владимир Ильич с такой простотой и душевностью расспрашивал о моих работах и планах на будущее, что я даже несколько злоупотребил его временем и очень подробно рассказал о своих трудах и о своей мечте во что бы то ни стало построить ракетный межпланетный корабль.

Я с очень большим воодушевлением говорил Ленину, что работаю не только над конструкцией межпланетного корабля-самолета, но много думаю о том, как и в каких условиях будет летать человек на Марс; как ему выдержать ускорение, как одеваться во время полета, чем и как питаться и т. д. и т. п.

Затем Владимир Ильич спросил меня: «А вы первым полетите?»

Я ответил, что иначе и не мыслю, так как должен показать пример, а после меня смело полетят другие... »

В конце беседы Владимир Ильич пожал мне руку, пожелал успеха в работе и обещал поддержку.

Есть мнение, что это легенда. Но искреннюю заинтересованность руководителей молодого Советского государства, такой, казалось бы экзотике для того времени, как космические полеты, подтверждает тот факт, что когда в 1924 году группа энтузиастов Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского создала секцию реактивных двигателей, которая впоследствии превратилась в Общество изучения межпланетных сообщений, членом президиума общества стал Ф.А. Цандер, а почетными членами — Ф.Э. Дзержинский (бывший в это время Председателем Высшего совета народного

хозяйства СССР (ВСНХ) , К.Э. Циолковский и Я.И. Перельман.

В любом случае идея космических полетов попала в благоприятную почву и, несмотря на всю сложность и технической реализации, и общей обстановки через тридцать с небольшим лет в СССР был запущен Первый искусственный спутник Земли.

Отсюда можно сделать два вывода:

1. Во-первых, для того, чтобы что-то серьезное создать, нужно, как минимум, положить этому начало через фиксацию в сознании активной части общества самой идеи.
2. Во-вторых, важная роль прозорливости руководства молодой страны и его восприимчивость к новым идеям. Именно оно, а не маститый писатель фантаст Г Уэллс являлось в то время коллективным визионером в отношении будущего нашей страны, и фраза из стихотворения «В музее В.И. Ленина»: «... И Ленин видел далеко, на много лет вперед...» уже не кажется только фигурой речи.

А как же межзвездные перелеты?

## 2. ПРОБЛЕМА МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ

Отечественный читатель широко познакомился с идеей межзвездных полетов в январе 1957 года, когда журнал «Техника молодежи» начал публикацию романа И.А. Ефремова «Туманность Андромеды» (Рис. 1) [3]. До запуска первого искусственного спутника Земли оставалось еще полгода, но идея освоения космоса уже витала в воздухе. И разница между полетом в космос и



Рис. 1. Начало публикации романа И.А. Ефремова "Туманность Андромеды" в журнале "Техника молодежи", 1957 г..

полетом к звездам для большинства читателей не казалась столь масштабной, как это есть на самом деле: и то, и другое, было еще фантастикой. Но в своем романе визионер И. Ефремов уже заглянул на несколько веков вперед, представив человечеству грандиозную и развернутую перспективу его звездного будущего.

Прошло всего несколько лет, и задача полета к звездам стала широко обсуждаться в научно-технической литературе.

В качестве примеров приведем книги [4,5], посвященные рассмотрению принципов движения в космическом пространстве со скоростями, намного превышающими первую, вторую и третью космические скорости. Ведь для того, чтобы долететь до ближайших звезд нужны скорости сопоставимые со скоростью света, т.е. десятки тысяч километров в секунду и больше, что превосходит первые три космические скорости, по меньшей мере на три порядка. Анализ известных источников энергии и рабочих тел быстро показал, что все возможные источники знакомые человечеству на тот момент, и даже гипотетические схемы представляются, если и потенциально достижимыми, только в очень удаленной и туманной перспективе. Кроме того, не удалось выявить этапы, достижения которых существенно приближало бы хотя бы технологически к решению целевой задачи.

## 3. СИСТЕМЫ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В последние несколько десятилетий надежды по решению грандиозной задачи полета к звездам стали связывать с использованием для ускорения космических аппаратов внешних источников энергии, прежде всего формирующих направленное электромагнитное излучение диапазона видимых и более коротких длин волн. Эта идея возникла по историческим масштабам времени практически сразу после изобретения лазера [6]. Однако, было показано, что и она сталкивается в случае полета полномасштабных межзвездных кораблей (а это объекты массой, как минимум, сотни и тысячи тонн) с невообразимыми для современного состояния науки и техники масштабами требуемых энергетических затрат и заоблачного уровня технологий.

Постепенно пришло понимание, что задача межзвездных перелетов требует какого-то конструктивного переформулирования. И мысль человеческая постепенно стала сдвигаться в этом направлении.

Собственно, в качестве одной из первых, по использованию внешних источников энергии для разгона и управления космическими кораблями, справедливо рассматривать идею солнечного паруса, разработанную Ф.А. Цандером применительно к межпланетным перелетам [1,2].

Появление этой идеи связано с публикацией научно-фантастического романа, в котором давления солнечного излучения или (в современной терминологии) «солнечного паруса» использовалось для передвижения летательных аппаратов в атмосфере Земли.

Как пишет Г.М. Салахутдинов [7], Ф.А. Цандер узнал об этой идее из книги известного популяризатора идей космонавтики И.Я. Перельмана [8]. Проведя соответствующие расчеты, И.Я. Перельман отверг идею как нецелесообразную при существующем уровне техники. Однако Ф.А. Цандер, заинтересовавшись «солнечным парусом», переформулировал задачу о возможности использования давления светового излучения для передвижения в космосе. В своих работах он рассмотрел несколько конструкций «солнечного паруса», наиболее целесообразная из которых была подробно описана им в 1924 году в неопубликованном варианте статьи «Перелеты на другие планеты». В кратком виде идея использования «солнечных парусов» присутствует и в опубликованном варианте статьи [1].

«Солнечный парус» по замыслу Ф. Цандера должен был иметь площадь 1 квадратный километр при толщине экрана 0.01 миллиметра и массу – триста килограммов. «Парус» должен был иметь центральную ось и некоторый набор силовых элементов, поддерживающих его форму. Ф.А. Цандер отмечал, что толщина экрана может быть еще меньше, так как к этому времени Т. Эдисону удалось изготовить никелевые листы толщиной 0.001 миллиметра и размером 3200 квадратных метров.

Ф.А. Цандер считал также целесообразным направлять на «солнечный парус» космического

аппарата поток света, собранный вторым «парусом», расположенным на некоторой промежуточной межпланетной станции. Эта его идея переключается с современными предложениями об использовании для разгона космического аппарата искусственного лучистого (лазерного) «ветра», обеспечивающего существенно большее давление на поверхность, чем солнечные лучи. Исследователь попытался разработать и основы теории движения космических аппаратов «под солнечным парусом». В целом работы Ф.А. Цандера по использованию светового давления для передвижения в межпланетном пространстве носили пионерский характер.

#### 4. ЛАЗЕР, КАК ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Изобретение лазеров резко активизировало интерес к схемам запуска с внешними источниками энергии. Их можно условно поделить на два класса: с обычным рабочим телом и с использованием фотонного излучения в качестве рабочего тела. Среди многочисленных проектов движителей первого класса, безусловно есть немало очень интересных, но они лежат вне данного рассмотрения, поскольку даже потенциально не могут обеспечить разгон материальных объектов до скоростей, сопоставимых со скоростью света, и не являются претендентами на средства межзвездных перелетов. Лазерным движителям второго класса посвящены, например, работы Г. Маркса [5] и Р. Форварда [9], в которых было предложено использовать расположенный на Земле лазер для разгона ракеты до релятивистских скоростей. Статья Г. Маркса включает также релятивистский анализ движения паруса, т.е. плоского совершенного зеркала, ускоряемого радиационным давлением.

Однако, как уже отмечалось во введении, и такие системы для их применения для полетов полномасштабных межзвездных кораблей (а это объекты массой, как минимум, сотни и тысячи тонн) требуют невообразимых для современного состояния науки и техники масштабов энергетических затрат и заоблачного уровня технологий.

Появление внешних источников энергии в виде лазерных систем технически переводит проблему межзвездных полетов из сферы механики и термодинамики, в основном связанных с реактивным движением, в сферу радиофизики сверхбольших энергий.

## 5. ПРОЕКТ «ЗВЕЗДНЫЙ ВЫСТРЕЛ»

Breakthrough Starshot (Прорыв: Звездный выстрел) - исследовательская и инженерная программа стоимостью 100 миллионов долларов, целью которой является демонстрация концепции новой технологии, позволяющей осуществить полет сверхлегкого беспилотного космического аппарата со скоростью 20% от скорости света; и заложить основу для полета к Альфе Центавра в течение одного поколения. В рамках концепции «Прорывных инициатив» (Breakthrough Initiatives), Starshot был запущен Юрием Мильнером и Стивеном Хокингом в 2016 году и финансируется фондом, основанным Юрием и Джулией Мильнер [10,11].

Председателем Консультативного комитета проекта Starshot по предложению Мильнера стал профессор Леб, декан факультета астрономии Гарвардского университета. За некоторое время до формального старта программы, в середине 2015 года, молодые сотрудники Леба, начали сортировать варианты межзвездных перелетов на невозможное, невероятное и выполнимое. В декабре того же года они получили статью Филипа Любина, физика из Калифорнийского университета в Санта Барбара, названную «Дорожная карта к межзвездному полету» [12,13]. На основе своих предшествующих исследований по исследованию возможностей создания систем защиты Земли от метеоритной опасности в рамках проекта DE-STAR, профинансированного DARPA, Любин выбрал двигательную установку с лазерной фазированной антенной решеткой, то есть большим количеством маленьких лазеров, объединенных вместе так, чтобы их свет когерентно образовывал единый луч. Этот лазерный луч толкает, несущий парус, чип, который должен будет двигаться с хорошей долей световой скорости, чтобы достичь другой звезды за пару десятилетий. (Подобная идея была опубликована в 1976 году физиком и писателем-фантастом Робертом Форвардом; который назвал

эту схему Starwisp [9].) Хотя технология все еще была больше научной фантастикой, чем фактом, «я в основном передал Starshot дорожную карту», - рассказывал Любин, согласившийся присоединиться к проекту.

### 5.1. КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММЫ

Программа Breakthrough Starshot воплощает подход Кремниевой долины к космическим путешествиям, использующий экспоненциальный прогресс в ключевых областях технологий с начала 21 века.

Система доставки включает две составляющие: Нанокрафты и Систему Светового луча.

*Нанокрафт* это – роботизированный космический аппарат, состоящий из двух основных частей: StarChip (Звездный чип) и Lightsail (Световой парус).

*StarChip*. Закон Мура позволил резко уменьшить размер микроскопических компонентов. Это дает возможность создать пластину граммового масштаба, несущую камеры, фотонные двигатели, источник питания, навигационное и коммуникационное оборудование, и составить полностью функциональный космический зонд.

Ситуацию применимости закона Мура к эволюции космической техники можно проиллюстрировать сравнением характеристик Первого искусственного спутника Земли, запущенного СССР в октябре 1957 года и наноспутника разработанного в Корнельском университете в 2018 году. Оба объекта (Рис. 2) представляли собой автономные низкоорбитальные спутники способные передавать небольшие объемы информации на расстояние нескольких сотен километров.

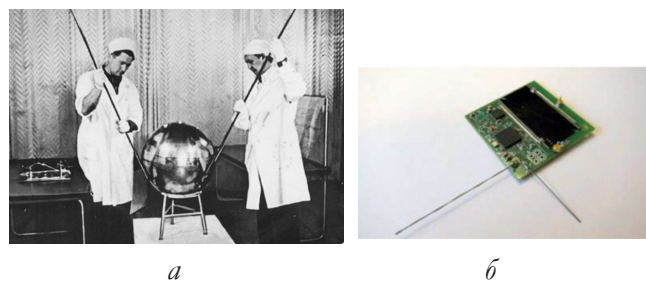


Рис. 2. Иллюстрация закона Мура для космической техники: (а) Первый спутник Земли с антеннами, разработанными в лаборатории МВ. Краушукина, ОКБ-1, 1957 год, масса 83 кг; (б) Наноспутник (нанокрафт), разработанный в Корнельском университете 2018 год, масса 5 г.

Т.е. функционально они похожи друг на друга. При этом масса Первого искусственного спутника Земли составляла 83 кг, а наноспутника Корнельского университета, появившегося на 60 лет позже – 5 г. Т.е. при прочих равных условиях, масса сопоставимых по возможностям спутников уменьшилась 16,6 тысяч раз. При продолжении тенденции спутники с подобными характеристиками уменьшатся к 2040 еще примерно в 25 раз и будут иметь массу 0.2 г.

*Lightsail.* Достижения в области нанотехнологий приводят к созданию все более тонких и легких метаматериалов, обещающих сделать возможным изготовление парусов метрового масштаба толщиной не более нескольких сотен атомов и массой в граммы. Действительно, в 1993 года феврале в России был проведен эксперимент «Знамя 2» [14]. 4 февраля 1993 года космический корабль «Прогресс М-15» отстыковался от орбитальной космической станции «Мир» и, отойдя на расстояние 160 метров, развернул солнечный парус. Парус представлял собой круг диаметром 20 метров, состоящий из отдельных секторов (Рис. 3). Он был выполнен из металлизированной полимерной пленки толщиной 5 мкм. Квадратный метр такой пленки имеет массу около 7 г.

В ходе программы «Знамя» были выполнены условия международного конкурса «Колумб 500», где победителем должен был стать тот, кто первым развернет в космосе солнечный парус. Однако, американская сторона – организатор конкурса, это достижение проигнорировала



Рис. 3. Космический аппарат "Прогресс М-15" с развернутым солнечным парусом, 1993 г.

*Световой луч.* Рост мощности и снижение стоимости лазеров в соответствии с законом Мура приведут к значительному прогрессу в технологии излучения света. А фазированные решетки лазеров (формирующие «световые лучи») потенциально могут увеличить уровень излучения до 100 гигавайт.

Аргументом в пользу реальности такого развития техники формирования и излучения сверхмощных лазерно-оптических систем могут служить результаты, достигнутые корпорацией IPG Photonics. Корпорация ведет свою историю с начала 1990 годов, когда коллектив сотрудников российской компании НТО «ИРЭ-Полус» разработал первые прототипы волоконных усилителей света с диодной накачкой, по мощности превышающие зарубежные аналоги. Позже основатель этой компании В.П. Гапонцев создал международную корпорацию IPG Photonics, которая в настоящее время контролирует значительную часть мирового рынка волоконных лазеров большой мощности. Эти лазеры можно рассматривать, в качестве достаточно продвинутых прототипов для лазерных излучателей массива лазерных излучателей системы разгона нанокraftов.

Подробно проблема создания фазированных решеток лазеров требуемых масштабов рассмотрена в [15].

Проект Breakthrough Starshot стремится довести эффект масштаба до астрономических размеров.

Корабли StarChip могут производиться серийно по цене iPhone и отправляться на миссии в большом количестве для обеспечения избыточности и покрытия.

Принципиальным отличием проекта Starshot от предшествующих идей, связанных с межзвездными полетами, заключается в кардинальном изменении масштабов межзвездных кораблей: от сотен тонн до единиц грамм, т.е. примерно на 10 порядков. Соответствующим образом меняются и требования к системе, как по размерам, так и по энергозатратам.

## 5.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Ключ к системе заключается в способности создать фотонный ускоритель. Для релятивистского полета ( $> 0.1 c$ ) также необходима разработка



зондов сверхмалой массы. Фотонный ускоритель представляет собой лазерную фазированную решетку, которая устраняет необходимость в разработке одного очень большого лазера и заменяет его большим количеством небольших (кВт класса) лазерных усилителей, которые по своей сути имеют фазовую синхронизацию, поскольку они питаются от обычного затравочного лазера. Этот подход также устраняет обычную оптику и заменяет ее фазированной решеткой из небольших оптических элементов, которые представляют собой тонкопленочные оптические элементы. Эта лазерная матрица была описана в статьях [11,12] и называется DE-STAR (Directed Energy System for Targeting of Asteroids and ExploRation – Система направленной энергии для наведения на астероиды и исследования). Рассматриваются системы DE-STAR квадратной формы и разных размеров DE-STAR – 1,2,3 и 4, со стороной квадрата, соответственно, 10, 100, 1000 и 10000 метров.

Полномасштабная DE-STAR 4 (50-70 ГВт) будет разгонять космический корабль массой несколько грамм с лазерным парусом масштаба 1 м примерно до 26% скорости света примерно за 10 минут, что позволит достичь Марса (1 а.е.) за 30 минут, пройти 1000 а.е. за 12 суток и достичь Альфы Центавра примерно за 20 лет. Тот же драйвер направленной энергии (DE-STAR 4) может также разогнать полезную нагрузку 100 кг до примерно 1% от скорости света и полезную нагрузку в 10 000 кг до скорости более 1000 км/с. Систему можно масштабировать до любого уровня мощности и размера массива, где требуется компромисс между желаемой массой и скоростью космического корабля.

Дорожная карта может начаться с НАМНОГО более скромных систем, включая наземные испытания, испытаний на спутниках масштаба CubeSat, возможно, испытаний на МКС и все более сложных системах. Полезное тестирование может начаться на уровне субкиловатт, поскольку система в основном «самоподобна», и все устройства являются масштабированными версиями других. Нет никакого внутреннего барьера для скорости, кроме скорости света, и, таким образом, в отличие от других технологий, здесь нет «тупика». Эта технология масштабируется в огромном

диапазоне масс. «Лазерный фотонный драйвер» может приводить в движение практически любую массовую систему с конечной скоростью, зависящей только от масштаба построенного драйвера. Поскольку система является модульной и масштабируемой, начальные затраты очень скромны, поскольку полезны даже небольшие системы.

Проект «Breakthrough StartShort» («BS», «Звездный выстрел») кардинально меняет подход к анализу возможностей межзвездных перелетов. Использование принципа внешней тяги и сверхмалых космических аппаратов делает вполне реальной перспективу полета к ближайшим звездам на историческом горизонте 20-30 лет.

Вместе с тем сами авторы отмечают, что рассматриваемое ими решение скорее гипотетическое и нуждается в серьезной разработке, в процессе которой первоначальная концепция может претерпеть радикальные изменения.

При этом вся система в целом выглядит как монстр, и по собственным размерам, и по расстояниям, на которых эта система должна действовать: размер разгонного участка 4.6 и 12.7 млн. км, для корабля массой 1 г и 10 г, соответственно. Кроме того, требуется гигантская мощность самого «светового луча» ~100 ГВт.

Последнее связано прежде всего с малым временем разгона (при гигантских ускорениях). Если бы время разгона было в тысячу раз больше, то требуемая мощности источников излучения снизилась бы на те же три порядка и составила 100 МВт, при времени разгона около 200 тыс. сек. для корабля массой 1 г (50 часов, двое суток), и 1 млн. сек. (250 часов, 10 суток) для корабля массой 10 г. Ускорения разгона при этом составят 24 g и 2.4 g, соответственно. А это с технической точки зрения куда более простые по достижимости цифры!

Это обстоятельство заставляет задуматься об альтернативном решении.

Альтернативное решение, может заключаться в использовании для разгона кораблей не прямолинейной, а кольцевой траектории диаметром  $D$ , на которой нано корабль ускоряется постоянно действующим лазерным излучением (при этом появляется возможность

«растянуть» во времени процесс разгона). Схема такой установки будет рассмотрена ниже.

## 6. СХЕМА С КОЛЬЦЕВЫМ РАЗГОННЫМ БЛОКОМ

Концепция схемы разгона аппарата, предлагаемая в проекте «Звездный выстрел», рассматривает ускорение нанокraftа в свободном космическом пространстве и ее можно условно отнести к «открытым» схемам. Другими вариантами ускорения объектов могут быть схемы с замкнутым пространством, в котором производится разгон аппаратов - «закрытые» схемы запуска.

Идея использования «закрытой» схемы запуска с использованием внешних источников энергии имеет очень длинную историю и буквально витает в воздухе с начала освоения космического пространства. Собственно говоря, за ее точку отсчета можно принять появление романа Жюль Верна «Из пушки на Луну» [16]. В данном случае в качестве источника внешней энергии использовался заряд пороха, в разгон происходил в «закрытом» пространстве ствола пушки. Разгон в закрытом пространстве имеет то преимущество, что практически вся энергия внешнего источника передается разгоняемому телу – отсутствуют потери, связанные с рассеиванием кинетической энергии взрыва в окружающее пространство. Идея использования «пушечного запуска» с применением взрывчатых веществ неоднократно рассматривалась и исследовалась, в том числе экспериментально, например в системе проекта HARP (High Altitude Research Project - Проект высотных исследований) [17], как альтернатива ракетным запускам. Обе схемы «пушечного запуска» и Жюль Верна и в система HARP осуществляют разгон объектов в «прямолинейных стволах».

Другим вариантом «закрытой» схемы запуска является ее реализация в качестве замкнутой в кольцо структуры. Такой вариант дает возможность существенно снизить требования к мощности источников энергии за счет использования относительно невысокого, но значительно более длительного по сравнению с временем «взрыва» в «прямолинейном стволе» ускорения. Ниже такой подход иллюстрируется на примере системы «космической пращи» с механическим разгоном [18].

Использование кольцевой схемы с нашей точки зрения заслуживает внимания и для запуска объектов с субсветовыми скоростями.

### 6.1. КОСМИЧЕСКАЯ ПРАЩА

Идея космической пращи реализуется компанией SpinLaunch, основанной в 2014 году Джонатаном Йени и вдохнувшей новую жизнь в давнюю идею использования гигантских механических пращей для запуска аппаратов на орбиту.

Космический предприниматель Йени, думая о том, как реализовать себя в космической отрасли, снова и снова возвращался к упомянутому выше проекту HARP, в котором США использовали гигантские пушки для того, чтобы выстреливать объекты в космос. В проекте HARP было доказано, что в космос можно выйти без ракеты, и Йени решил самостоятельно создать кинетическую систему запуска. Он собрал демонстрирующую работоспособность концепции установку, механическую пращу, способную разгонять объекты размером с пулю до сверхзвуковых скоростей.

Строительство первой серьезной центрифуги было закончено в 2016 году. Она имела диаметр 12 м, и была слишком мала для того, чтобы закинуть ракету в космос – но, по сути, её конструкция была такой же, как предполагает полномасштабная реализация. Длинный рычаг, или привязь, тянется от хорошо смазанного подшипника, который вращает мотор. Полезный груз крепится на конец привязи. Чтобы выдерживать чрезвычайные нагрузки, привязь должна быть сделана из чрезвычайно прочных материалов типа кевлара и углеволокна.

В проекте SpinLaunch ракета будет раскручена до пусковой скорости, а потом на долю секунды раскроется выходное отверстие, и ракета отправится в полёт. Согласно патенту [18], в этот же момент будет отцеплен противовес, вращавшийся напротив ракеты, чтобы центрифуга не разболталась и не сломалась. Ракета далее будет лететь порядка минуты, и на высоте около 61 км запустит двигатель. На такой высоте атмосфера уже практически не будет тормозить ракету. Поэтому для того, чтобы разогнать её до первой космической скорости в 28 476 км/ч, потребуется не больше минуты



**Рис. 4.** Кольцевая схема запуска Космическая Праща компании SpinLaunch, 2016 г.

работы двигателя. Ещё один 10-секундный запуск двигателя выведет ракету на орбиту вокруг Земли.

Диаметр следующего прототипа составляет 33 метра (**Рис. 4**), а окончательно планируется построить 100-метровую версию.

Компания SpinLaunch сообщила о результатах десятого успешного лётного испытания своей технологии без ракетного запуска космических аппаратов — системы Orbital Launch. 13 октября 2022 г.

В ходе испытания компания запустила полезную нагрузку NASA, после чего её удалось вернуть на Землю, чтобы проанализировать воздействие стрессовых нагрузок на компоненты. В ходе запуска груз поднялся на высоту в 9 км.

При запуске ускорение составило до 10 000 g, а сам «снаряд» разогнался до скорости в 8000 км/час. Как оказалось, элементы полезной нагрузки вполне могут пережить столь экстремальный запуск. Это потенциально позволяет запускать небольшие грузы на орбиту, причём намного дешевле, чем с помощью ракет.

Таким образом, закрытые кольцевые схемы рассматриваются, как реальный подход для эффективных схем запуска космических аппаратов. Но космическая «праща» оперирует пока со скоростями менее первой космической.

Ниже показывается, что идея кольцевой схемы разгона имеет право на существование и для разгона микро- и нано аппаратов до больших скоростей, включая субсветовые.

## 6.2. КОЛЬЦЕВАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО РАЗГОНА

В развитие проекта «Breakthrough StarShot» целесообразно рассматривать системы вывода, которые обладают достоинствами схемы «BS», но при этом более компактны и оперируют

меньшими значениями пиковой мощности, а именно:

- желательна радикально сократить пространственный масштаб зоны, в которой производится разгон аппарата;
- радикально уменьшить экстремальные требования к мощностным параметрам системы и концентрации мощности для разгона.

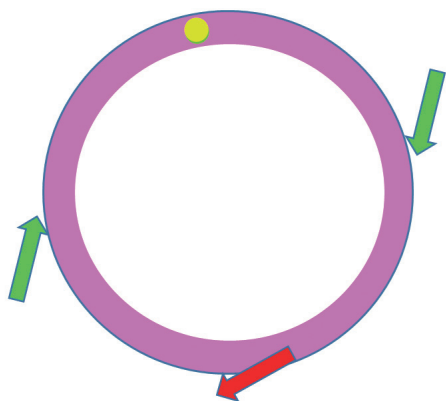
Для достижения этих целей предлагается заменить разгонную траекторию в виде линейного участка на разгонную траекторию в виде кольцевой структуры с канализацией лазерного излучения в специальном светонесущем «стволе» и многократным прохождением наноаппаратом разгонного кольца с ускорением в процессе разгона.

В такой схеме можно регулировать ускорение во время разгона, время разгона и уровень мощности излучения, которая используется для разгона. Оценки показывают, что мощность излучения может быть снижена более чем на три порядка по отношению к мощности в проекте Звездный выстрел (~100 ГВт) и составит ~ 100 МВт, при этом время разгона увеличивается на те же три порядка и будет доходить до ~ 1-10 суток. Но это все происходит на контролируемой площади в несколько квадратных километров.

Потребляемая в разгонной кольцевой структуре с мощностью излучения ~100 МВт потребует мощности источников питания в несколько сотен мегаватт. Такая мощность примерно соответствует мощности электросети города с населением 200-500 тыс. человек и не требует гигантской концентрации мощностей в одном месте.

При этом в кольцевой разгонной схеме отсутствуют или резко упрощаются проблемы проекта «Звездный выстрел», связанные с гигантскими ускорениями, чрезвычайно высокой плотностью лазерного излучения на поверхности паруса и другие.

В кольцевой (циклической) схеме, разгон производится в полой световедущем канале (на **Рис. 5** сиреневый цвет), замкнутом в кольцо с радиусом  $R$ . В поперечнике разгонный световедущий канал может, например, иметь форму круга диаметром  $d$ . Внутренние стенки световедущего канала выполняют две



**Рис. 5.** Кольцевая схема лазерного разгона макророботов: 1 – разгонное кольцо; 2 – разгоняемый объект; 3 – лазерное излучение; 4 – вывод объекта из разгонного кольца

функции: направляющую для микро (нано) аппарата и отражающую для лазерного излучения. Поперечный размер световедущего канала (который можно рассматривать как специфический полый световод) многократно превышает длину волны лазерного излучения.

Разгоняемый аппарат имеет размеры, позволяющие ему свободно перемещаться внутри разгонного объема. Поэтому его поперечный размер близок к  $d$ .

Аппарат может иметь разную геометрическую форму: шар, цилиндр, скошенный цилиндр и т.д.

Конкретная форма и размеры аппарата определяются условиями его разгона. То же самое относится и к его структуре. В простейших случаях это может быть шар или цилиндр из однородного вещества. И в том, и в другом случае предполагается, что падающее на аппарат излучение отражается, в основном, назад, передавая свой импульс аппарату.

Скошенные плоскости у третьего варианта формы аппарата обеспечивают отражение излучения под некоторым углом к направлению движения и, действующая на наноаппарат, сила частично направлена вдоль кольца, а частично в поперечном направлении, к его центру, что может быть использовано для частичной компенсации возникающей при круговом движении центробежной силы.

Стенки волновода, как и поверхность аппарата, обращенная к падающему излучению, имеют коэффициент отражения близкий к 1.

Рассматривается два варианта реализации системы разгона: а) без рекуперации и б) с рекуперацией (повторным использованием отраженного излучения).

Ввод излучения в кольцо может осуществляться в нескольких точках, в пределе даже непрерывно по всей длине кольца.

Пусть  $\lambda$  – коэффициент рекуперации, т.е. эффективное число раз, которое «срабатывает» падающее излучение. Формально, при использовании рекуперации с коэффициентом  $\lambda$ , энергетическая эффективность системы разгона возрастает в  $\lambda$ .

Процесс разгона осуществляется путем многократного прохождения наноаппаратом кольца под воздействием давления лазерного излучения. Процесс разгона заканчивается отключением источника излучения и последующим выводом аппарата из разгонного кольца.

При этом расположение кольца, расположение узла вывода аппарата из кольца и момент вывода, согласуются таким образом, чтобы направить аппарат в заранее определенном направлении.

## 7. ВЫВОДЫ ДЛЯ РОССИИ

При всем уважении к Илону Маску, его идея, связанная с колонизацией Марса, не греет мне душу. Она грандиозна, затратна и, наверное, может стать важной вехой при взаимодействии человечества с КОСМОСОМ. Однако идеологически эта идея недалеко ушла от классических воззрений на космические полеты внутри Солнечной системы, которым уже больше века. Она постоянно обсуждается в научной и популярной литературе и стала слишком обыденной, чтобы возбудить эмоции землян до уровня осознания некоторой миссии человечества. Кроме того, даже такие грандиозные и дорогие программы как Марсианский проект И. Маска, с научной точки зрения дадут только точечное представление о Солнечной системе в целом. А для ее тотального исследования требуются совсем другие методы.

Проекты типа «Starshot» с этой точки зрения выглядят как яркие вспышки надежды. Надежды, связанной с возможностью в обозримом будущем пролечь в межзвездное пространство, и

достичь ближайших звезд в итоге этого прорыва. Создать технологии и технические средства, позволяющие изучать солнечную систему на всю глубину и существенно менее затратно, чем с помощью средств классической космонавтики, к тому же с значительно большими скоростями исследования.

Чтобы активировать концентрацию усилий, связанных с проектом StarShot, Ю. Мильнер подготовил и опубликовал воззвание, которое назвал «Манифестом ЭВРИКА» [19].

В этом документе он заявляет, что наша цивилизация нуждается в миссии. Эта миссия, по его мнению, заключается в исследовании и познании нашей Вселенной. Миссия нужна чтобы обеспечить наше выживание, резко улучшить нашу жизнь и построить галактическую цивилизацию. Далее Мильнер отмечает важность и значение настоящего момента и значение направленности искусственного интеллекта для миссии. Основными способами продвижения миссии он считает ускорение Научной революции и зарождение Нового Просвещения. Для реализации этих планов с его точки зрения нужно:

- инвестировать ресурсы в фундаментальные науки и космонавтику;
- позволить искусственному интеллекту способствовать научному прогрессу;
- прославлять ученых как героев;
- ориентировать образование на всеобщую историю и использовать силу искусства, чтобы объяснить ее.

Важно отметить, что проекты рассматриваемого типа, находящиеся на начальном этапе, требуют не гигантских материальных и финансовых затрат, а серьезной концентрации интеллектуальных усилий научно-технического и философско-идеологического сообщества. Относительно невысокие требуемые на первых этапах объемы средств не дают существенного преимущества при реализации такого проекта сверхбогатым экономикам, что позволяет эффективно участвовать в их реализации даже небогатым странам. Значительно более важно для успешной реализации, по меньшей мере, на начальных стадиях является наличие элементов космизма в идеологии общества, наличие исторических успехов в деле

освоения космического пространства, желание и воля постичь КОСМОС. С этим у России все в порядке. В международном плане Проект может быть поддержан соответствующим соглашением между странами БРИКС.

Проблема межзвездных коммуникаций из сферы далеких от воплощения фантастических образов на наших глазах переходит в стадию конкретного комплексного научно-технического проекта и его реализации. Проект глобальный, обладает высоким эмоциональным зарядом и гигантским технологическим, а следовательно, и экономическим потенциалом.

Это шанс для России вырваться из аутсайдера в лидеры научно-технического прогресса.

Вопрос в том, как организовать такой проект. Наверное, форма организации должна принципиально отличаться от тех форм, которые использовались в СССР и РФ при реализации глобальных научно-технических программ, таких как атомный проект или начальная стадия освоения космоса. Скорее, как высокая концентрация усилий государства, так и просто выделение значительных денежных средств, в надежде, что рыночные механизмы сделают свое дело, не сулят успеха. Мало чем может помочь и американский опыт при постановке и реализации космических программ: у нас просто другая технико-экономическая среда, которая определяющим образом формирует путь развития того или иного технологического направления.

Конечно, поддержка и внимание государства нужны, частная инициатива тоже не помешает, но обязательно помноженные на массовость движения и подлинный энтузиазм общества. На старте проекта и его начальной стадии важно создать общественную площадку, на которой можно было бы организовать периодический обмен идеями и результатами в области межзвездных коммуникаций, как между индивидуальными лицами, так и между заинтересованными научно-техническими группами.

В истории нашей страны есть по меньшей мере два примера общественных объединений, которые при поддержке государства, сыграли выдающуюся роль в развитии и освоении

новейших для своего времени направлениях техники. Это Комитет содействия воздушному флоту России, на средства которого в 1909 году были заложены основы военно-воздушного флота, и Осоавиахим, заслуги которого в пропаганде, развитии и продвижении новейшей техники в Советском Союзе трудно переоценить. Их опыт, безусловно будет полезен и может быть использован при организации работ по Проекту.

Звезды зовут. Дорогу осилит идущий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цандер ФА. Перелеты на другие планеты. *Техника и жизнь*, 1924, (13):15-16.
2. Корнеев Л. Разведчик космических дорог. К 75-летию со дня рождения Ф.А. Цандера. *Авиация и космонавтика*, 1962, (8):26-31.
3. Ефремов ИА. *Туманность Андромеды*. М., Молодая гвардия, 1958, 368 с.
4. Бурдаков ВП., Данилов ЮИ. *Ракеты будущего*. М., Атомиздат, 1980, 155 с.
5. Дмитриев АС., Кошелев ВА. *Космические двигатели будущего*. М., Знание, Сер. «Космонавтика, Астрономия», 1982, 3, 64 с.
6. Marx G. Interstellar Vehicle Propelled by Terrestrial Laser Beam. *Nature*, 1966, 211:22-23.
7. Салахутдинов ГМ. *Фридрих Артурович Цандер*. М., Знание, Сер. «Космонавтика, астрономия», 1987, 3, 64 с.
8. Перельман ЯИ. *Занимательный космос. Межпланетные путешествия*. АСТ, 2008, 360 с.
9. Forward R. Roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails. *J. of Spacecraft and Rockets*, 1984, 21:187-195.
10. Breakthrough Initiatives, “Breakthrough Starshot,” 2020, <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>. Y. Milner. *Breakthrough Starshot*.
11. Finkbeiner A. Near-Light-Speed Mission to Alpha Centauri. A billionaire-funded plan aims to send a probe to another star. But can it be done? *Scientific American*, 2017, 316(3):30-37.
12. Lubin P. A Roadmap to Interstellar Flight. *JBIS*, 2016, 69:40-72.
13. Hughes G, Lubin P, Bible J, Bublitz J, Arriola J, Motta C, Suen J, Johansson I, Riley J, Sarvian N, Wu J, Milich A, Oleson M, Pryor M. DE-STAR: Phased-array laser technology for planetary defense and other scientific purposes. *SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie*.
14. Семенов ЮП., Бранец ВН, Григорьев ЮИ, Зеленщиков НИ, Кошелев ВА, Мельников ВМ, Платонов ВН, Севастьянов НН, Сыромятников ВС. Космический эксперимент по развёртыванию плёночного бескаркасного отражателя D = 20 м («Знамя-2»). *Космические исследования*, 1994, 32(4-5):186-193.
15. Bandutunga CP, Sibley PG, Ireland MJ, Ward RL. Photonic solution to phase sensing and control for light-based interstellar propulsion. *J. of the Optical Society of America B*, 2021, 38(5):1477-1486.
16. Верн Ж. *Из пушки на Луну. Вокруг луны*. Эксмо, 2014, 576 с.
17. Murphy CH, Bull GV. A Review of Project HARP. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Wiley Online Library, 1966, 337-357.
18. Yaney J. Circular mass accelerator. *Patent US 10,202,210B2*. Date of Patent: 12 Feb 2019.
19. Milner Yu. *EUREKA MANIFESTO. The Mission for Our Civilization*, 2021, 100 p.

**Дмитриев Александр Сергеевич**

д.ф.-м.н., проф.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: chaos@cplire.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.353

## Новая модель эволюции Вселенной

<sup>1</sup>Мышинский Г.В., <sup>2</sup>Вишневский Р., <sup>3</sup>Старостин В.И.<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, <http://www.jinr.ru/>

Дубна 141980, Московская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт сельскохозяйственной и пищевой биотехнологии, <https://www.ibprs.pl/>

36 Раковецка, Варшава 02-532, Польша

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, <http://geol.msu.ru/>

Москва 119234, Российская Федерация

E-mail: [mysb@jinr.ru](mailto:mysb@jinr.ru), [roland.wisniewski@gmail.com](mailto:roland.wisniewski@gmail.com), [vistar.geol@gmail.com](mailto:vistar.geol@gmail.com)

Поступила 08.05.2024, рецензирована 12.05.2024, принята 16.05.2024

**Аннотация:** Представлены эксперименты и свойства низкоэнергетических ядерных реакций. Показано существование новых основных состояний в атоме водорода, ионе гелия и других водородоподобных атомах, находящихся в сильном магнитном поле при появлении третьего пространственного осцилляционного квантового числа. На примере атома трансгелия рассмотрена возможность спаривания атомных электронов в ортобозон. Показана возможность генерации сильных и сверхсильных магнитных полей в космической абсолютной плазме в эпоху Фотонов, в которой электроны рекомбинируют с протонами и ядрами гелия с переходом в трансводородные и трансгелиевые атомы. Трансатомы, объединяясь в трансмолекулы, вступают в многоядерные, безызлучательные, низкоэнергетические реакции. Наступило время постоянного естественного нуклеосинтеза. Нуклеосинтез атомов углерода, азота и кислорода, когда они в подавляющем большинстве были окружены атомами водорода, привел после эпохи Рекомбинации к интенсивному органическому и биоорганическому синтезу, результатом которого стало возникновение жизни и заполнение ею всей Вселенной. Были продемонстрированы низкоэнергетические ядерные реакции, происходящие в звездах. Показана возможность естественного нуклеосинтеза, происходящего на Земле.

**Ключевые слова:** эволюция Вселенной, низкоэнергетические ядерные реакции, квантовая физика, трансатомы, реакции трансмутации, естественный нуклеосинтез, биоорганический синтез, возникновение жизни, нуклеосинтез в звездах, планетарный нуклеосинтез

PACS: 03.75.Mn; 03.75.Nt; 25.60.Pj; 26.00.00; 31.10.+z; 32.10.-f; 52.25.Xz; 91.35.Nm

Для цитирования: Мышинский Г.В., Вишневский Р., Старостин В.И. Новая модель эволюции Вселенной. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3)353-366.

DOI: 10.17725/rensit. 2024.16.353.

## New model of the universe evolution

**Gennady V. Mishinsky**Joint Institute for Nuclear Research, <http://www.jinr.ru/>

6, str. Joliot Curie, Dubna 141980, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: [mysb@jinr.ru](mailto:mysb@jinr.ru)**Roland Wiśniewski**Institute of Agricultural and Food Biotechnology, <https://www.ibprs.pl/>

36 Rakowiecka, 02-532 Warsaw, Poland

E-mail: [roland.wisniewski@gmail.com](mailto:roland.wisniewski@gmail.com)**Victor I. Starostin**Lomonosov Moscow State University, <http://geol.msu.ru/>

Moscow 119234, Russian Federation

E-mail: [vistar.geol@gmail.com](mailto:vistar.geol@gmail.com)

Received May 08, 2023, peer-reviewed May 12, 2023, accepted May 16, 2024

**Abstract.** Experiments and properties of low-energy nuclear reactions are presented. The existence of new ground states in the hydrogen atom, in the helium ion, and other hydrogen-like atoms located in a strong magnetic field at the appearance of third spatial oscillatory quantum number is shown. On the example of a transhelium atom, the possibility of pairing atomic electrons into an orthoboson is considered. The possibility of generating strong and ultra-strong magnetic fields in cosmic absolute plasma in the Photon era has been demonstrated, in which electrons recombine with protons and helium nuclei with the transition to transhydrogen and transhelium atoms. Transatoms combine into transmolecules and enter into multinuclear, radiation-free, low-energy reactions. The time of constant, natural nucleosynthesis has begun. The nucleosynthesis of carbon, nitrogen and oxygen atoms, when they were overwhelmingly surrounded by hydrogen atoms, led after the era of Recombination to intensive organic and bioorganic synthesis, which resulted in the origin of life and filling the entire Universe with that life. Low-energy nuclear reactions that occur in stars have been demonstrated. The possibility of natural nucleosynthesis occurring on Earth is shown.

**Keywords:** Universe evolution, low-energy nuclear reactions, quantum physics, transatoms, transmutation reactions, natural nucleosynthesis, bioorganic synthesis, the life origin, nucleosynthesis in stars, planetary nucleosynthesis

**PACS:** 03.75.Mn; 03.75.Nt; 25.60.Pj; 26.00.00; 31.10.+z; 32.10.-f; 52.25.Xz; 91.35.Nm

*For citation:* Gennady V. Mishinsky, Roland Wiśniewski, Victor I. Starostin. New model of the universe evolution. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3)353-366e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.353.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (354)
  2. ОТКРЫТИЕ ТРЕТЬЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО КВАНТОВОГО ЧИСЛА (356)
  3. ВОДОРОДОПОДОБНЫЕ АТОМЫ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ (357)
  4. СПАРИВАНИЕ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНСАТОМАХ (358)
  5. НУКЛЕОСИНТЕЗ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭПОХУ ФОТОНОВ (358)
  6. БИООРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ (361)
  7. НУКЛЕОСИНТЕЗ В ЗВЕЗДАХ (362)
  8. ПЛАНЕТАРНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ (363)
  9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (363)
- ЛИТЕРАТУРА (364)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1896 году А. Беккерель открыл естественную радиоактивность солей урана. Вскоре выяснилось, что одни химические элементы могут превращаться в другие химические элементы. Почти через столетие после открытия радиоактивности в 1989-1992 годах в ядерной физике произошли события, знаменующие неожиданным обнаружением

безрадиационных и низкоэнергетических ядерных реакций (НЭЯР, LENR – Low Energy Nuclear Reactions) [1-3]. В мировой научной литературе НЭЯР также называют: ядерными явлениями в конденсированных средах (CMNS – Condensed Matter Nuclear Science) или низкоэнергетическими реакциями трансмутации химических элементов (НЭТ или трансмутация). Оказалось, что ядерные реакции трансмутации с превращением одних стабильных химических элементов в другие стабильные химические элементы могут происходить в ионизированных слабо возбужденных конденсированных средах с низкой энергией возбуждения, всего  $\sim 1$  эВ/атом в области реакций. Реакции НЭТ включают как слияние, так и распад ядер. В обычных ядерных реакциях для сближения атомных ядер до расстояния действия ядерных сил необходимо преодолеть имеющийся между ними кулоновский барьер, который имеет значения от десятков кэВ до сотен МэВ.

При осуществлении низкоэнергетических ядерных реакций выделяется ядерная энергия, и синтезируются стабильные химические элементы во всем диапазоне атомных масс.



До последнего времени считалось, что планеты формируются из уже готовых химических элементов, получающихся в результате нуклеосинтеза в термоядерных реакциях внутри звезд и при взрывах нейтронных и сверхновых звезд. А главным механизмом, приводящим к получению химических элементов тяжелее железа, является *r*-процесс последовательного захвата ядрами нейтронов, значительные потоки которых как раз и образуются в результате этих взрывов, с дальнейшим бета-распадом полученных, радиоактивных ядер, т.е. превращением ядерных нейтронов в ядерные протоны. Открытие низкоэнергетических ядерных реакций и создание теории этих реакций позволили сделать предположения о более простом и естественном механизме нуклеосинтеза во Вселенной.

Реакции трансмутации были открыты в 1992 году А.Б. Карабутом, Я.Р. Кучеровым и И.Б. Савватимовой в экспериментах с тлеющим газовым разрядом в дейтерии с палладиевым катодом (Рис. 1) [4-6]. В дальнейшем, реакции трансмутации были обнаружены и многократно воспроизведены в других многочисленных и разнообразных экспериментах. Например, при промышленной электронной зонной плавке слитков циркония в вакуумной печи [7]; при взрывах металлических мишеней, облучаемых мощным импульсом электронов [8,9]; при взрывах в жидких диэлектрических средах металлических фольг, через которые пропусклся мощный импульс электрического тока [10,11]; при воздействии импульсным током на расплав свинца с медью [12]; при прохождении электрического тока в водно-минеральных средах [3]; при ультразвуковой обработке водных

солевых растворов (Рис. 1) [13]; при облучении тормозными гамма-квантами конденсированных газов (Рис. 1) [14-17]; в растущих биологических структурах [18-20] и во многих других [1-3]. Из приведенного перечня экспериментов по трансмутации видно, что их методики крайне разнообразны и в корне отличаются от методов ядерной физики. Результаты экспериментов по трансмутации, несмотря на их разнообразие, качественно похожи друг на друга. Реакции низкоэнергетической трансмутации осуществляются для всех химических элементов, начиная с водорода, и происходят, как правило, с участием одновременно большого количества атомных ядер, как во входном, так и в выходном каналах реакций, т.е. являются многоядерными. Как показывают эксперименты, в реакциях трансмутации могут быть синтезированы все химические элементы.

Перечислим основные свойства реакций трансмутации.

- Во всех экспериментах по трансмутации появляются новые химические элементы, отсутствующие в исходном материале до начала процессов НЭТ. Это свидетельствует о том, что атомные ядра одних химических элементов превращаются в атомные ядра других элементов.
- Как правило, в большинстве экспериментов продуктами реакций трансмутации являются стабильные изотопы элементов. В специальных экспериментах было осуществлено превращение радиоактивных нуклидов в стабильные изотопы.
- Реакции НЭТ не сопровождаются гамма и бета радиоактивными излучениями.

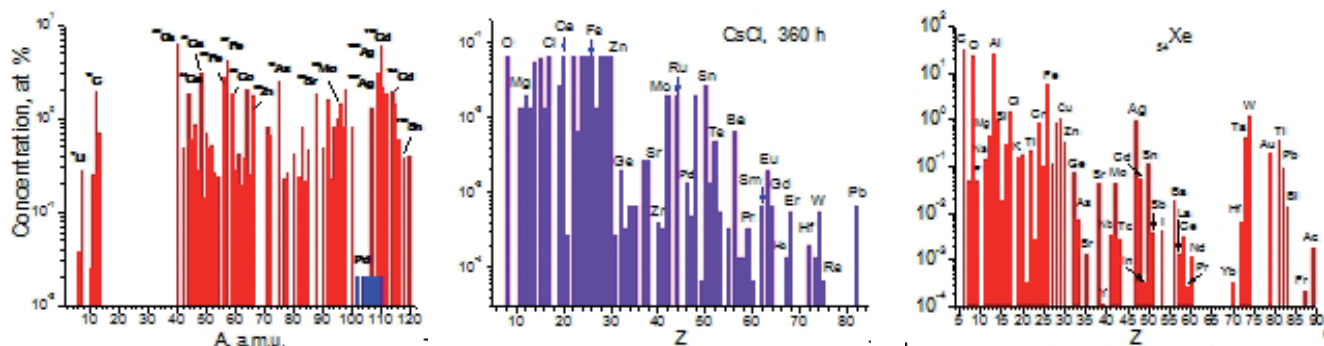


Рис. 1. Выход продуктов в реакциях трансмутации: в разряде дейтерия с Pd-катодом; при ультразвуковой обработке раствора CsCl и при облучении тормозными гамма квантами ксенона.

- Выход продуктов в реакциях трансмутации в некоторых экспериментах достигает десятков процентов (10-25%) от всей массы конденсированной среды. Это десятки-сотни грамм за все время протекания реакций, составляющего от десятков минут до нескольких часов. Такой выход несопоставим с выходом продуктов в обычных ядерных реакциях.
- В реакциях НЭТ выделяется внутриядерная энергия, которая преобразуется в тепловую, а в некоторых случаях, в электрическую энергию. Величину выделяющейся энергии невозможно объяснить химическими реакциями.
- Из многочисленных экспериментов следует, что в процессе трансмутации происходит синтез не только новых химических элементов, но и синтез посторонних твердотельных структур, содержащих эти новые элементы. Продукты реакций объединяются друг с другом и образуют твердотельные структуры размером от нескольких микрон до нескольких миллиметров.
- Отмечено, что в реакциях трансмутации, протекающих в относительно легкой по элементам среде, наряду с “посторонними” легкими элементами, получают тяжелые элементы, которые невозможно получить в парных ядерных реакциях. Это означает, что в реакциях трансмутации происходит взаимодействие одновременно многих атомов, и, соответственно, многих ядер.

Из перечисленных свойств следует, что для осуществления реакций трансмутации должны выполняться два основных требования: во-первых, атомы должны притягиваться друг к другу, и, во-вторых, притяжение атомов должно автоматически приводить к сближению их атомных ядер до расстояний действия ядерных сил, и, тем самым к запуску процессов ядерных преобразований. При выполнении этих требований, вероятность ядерных реакций, имеющих сечение  $\sim 10^{-24}$  см<sup>2</sup>, будет определяться атомными превращениями, происходящими с сечениями  $\sim 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

Таким образом, становится очевидным, что для реализации низкоэнергетических реакций трансмутации необходимо, чтобы структура

электронных оболочек атомов и структура атомных ядер кардинально изменились.

Наиболее простым и известным способом изменить структуру электронных оболочек в атоме является помещение последнего в магнитное поле.

## 2. ОТКРЫТИЕ ТРЕТЬЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО КВАНТОВОГО ЧИСЛА

Электроны, как и другие элементарных частицы: протоны, нейтроны и нейтрино, составляющие нашу видимую Вселенную, являются фермионами и обладают собственными механическими моментами импульсов, называемые спинами. Все спины у них равны одной второй постоянной Планка  $\mathbf{s} = \hbar/2$ . Электрон кроме спина  $\mathbf{s}_e$  обладает собственным спиновым магнитным моментом  $\mu_e$ , вектор которого направлен в сторону противоположную спину  $\mathbf{s}_e \downarrow \uparrow \mu_e$ . Магнитный момент есть у протона  $p$ , он направлен вдоль его спина  $\mathbf{s}_p \uparrow \uparrow \mu_p$ . Отрицательный магнитный момент нейтрона  $n$  направлен против спина  $\mathbf{s}_n \downarrow \uparrow \mu_n$ . Магнитные моменты этих частиц создают вокруг себя магнитные поля  $\mathbf{V}_{e,p,n}$  (Рис. 2а). Магнитные поля  $\mathbf{V}_{e,p,n,\ell}$  вычисляются с помощью формулы Ландау (1а) [21]:

$$\mathbf{V}_{e,p,n,\ell} = \mu_0 \frac{3\mathbf{n}(\mu_{e,p,n,\ell} \cdot \mathbf{n}) - \mu_{e,p,n,\ell}}{r^3}, \quad (1a)$$

$$\mathbf{V}_{S,\mu} = \mu_0 \sum_i \frac{3\mathbf{n}_i(\mu_{e,\ell} \cdot \mathbf{n}_i) - \mu_{e,\ell}}{r_i^3}, \quad (1b)$$

где  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м магнитная постоянная;  $r$  – расстояние от электрона до точки, в которой вычисляется поле  $\mathbf{V}_{e,p,n,\ell}$ ;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор в направлении  $r$ ;  $\ell$  – орбитальный момент электрона. Из формулы (1а) следует, что магнитный момент электрона  $\mu_e = 9.29 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл =  $5.79 \cdot 10^{-5}$  эВ/Тл создает магнитное поле  $V_e = 20$  Тл по оси своего

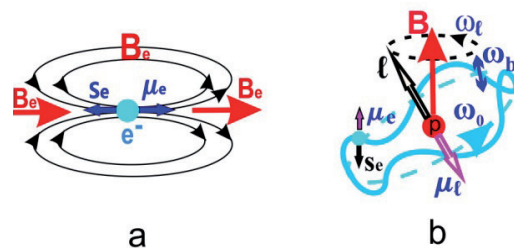


Рис. 2. а – магнитное поле  $V_e$ , создаваемое магнитным моментом электрона  $\mu_e$ , б – возникновение осцилляций электрона с частотой  $\omega_b$  около орбитали в сильном магнитном поле  $B$ .

направления на расстоянии равном диаметру атома водорода 0.106 нм.

Кроме спина, согласно обобщенному правилу квантования, частицы, связанные в те или иные системы, в нашем трехмерном пространстве могут иметь еще *три пространственных* квантовых числа. Однако, например, атомные электроны, вращающиеся по орбитам вокруг ядра, имеют только два пространственных квантовых числа: орбитальное  $\ell$  и магнитное  $m_\ell$ .

Неопределенность в значении третьего квантового числа позволяет электронам под действием электрических кулоновских сил между ними, и между электронами и положительно заряженным ядром произвольно вращаться вокруг ядра, но не в плоскостях, а подобно “нитям в клубке” [22]. То же самое происходит с протонами и нейтронами, произвольно движущимися на стационарных орбиталях в самосогласованном поле ядра.

Третье пространственное квантовое число  $n_b$  проявляется тогда, когда атом находится в сильном магнитном поле с вектором магнитной индукции  $\mathbf{B} > 30$  Тл [23]. В этом случае орбитальные моменты всех атомных электронов  $\mathbf{l}$  и их орбитальные магнитные моменты  $\boldsymbol{\mu}_\ell \approx -\mu_\ell \mathbf{l}/\hbar$  строго ориентируются относительно направления магнитного поля  $\mathbf{B}$  (“вмораживаются” в магнитное поле) и одновременно прецессируют вокруг него с одинаковой ларморовской частотой  $\omega_\ell = \mu_\ell B/\hbar$ . Поэтому, если представить, что электрон вращается вокруг ядра в плоскости по эллиптической орбитали, то в трехмерном пространстве движение электрона имеет еще одну степень свободы. Направление этого движения условно можно представить как движение перпендикулярное плоскости эллиптической орбитали (Рис. 2b). Электрон в этом случае осциллирует около орбитали и имеет еще одно *пространственное* квантовое число –  $n_b = 1, 2, 3, \dots$ . Это квантовое число  $n_b$  называется осцилляционным квантовым числом. Частота этих осцилляций  $\omega_b$  связана с частотой вращения электрона на орбитали  $\omega_0$  и частотой прецессии его орбитального момента  $\omega_\ell$  следующим соотношением  $\omega_b = n_b \sqrt{\omega_0^2 + \omega_\ell^2}$  [24,25]. В случае, когда  $\ell = 0$ , в том числе в основном

состоянии, при  $n_b = 1$  частота осцилляций  $\omega_b = \omega_0$ .

### 3. ВОДОРОДОПОДОБНЫЕ АТОМЫ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ниже представлены формулы, полученные Бором для водородоподобных атомов (один электрон на орбитали) с зарядом ядра равным  $Z$ , где  $r_Z$  – радиус орбитали электрона в зависимости от главного квантового числа –  $n$ ;  $E_n$  – энергия электрона, находящегося на  $n$ -й орбитали. Радиус атома водорода  $Z = 1$  при  $n = 1$  равен  $r_H = 0.053$  нм, а энергия связи электрона  $E_H = -13.6$  эВ

$$r_Z = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2 Z} n^2 = 0.053 \frac{n^2}{Z} (nm), \quad (2)$$

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{Z^2}{n^2} = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} (eV). \quad (3)$$

Если в атоме водорода в основном состоянии ( $n = 1$ ) учесть появление в сильном магнитном поле  $\mathbf{B}$  у электрона осцилляций с  $n_b = 1$ , то в этом случае энергия его осцилляций  $E_b = \hbar \cdot \omega_b$  будет равна энергии вращения электрона вокруг ядра  $E_H = \hbar \cdot \omega_0 = -13.6$  эВ ( $\omega_b = \omega_0$ ). Казалось бы, тогда общая энергия электрона составит  $-27.2$  эВ, но это не так, поскольку общее изменение энергии электрона приводит к изменению, к поправке в значении радиуса вращения электрона  $r_H$ . Меняется радиус вращения электрона, следовательно, появляется поправка к его общей энергии, поскольку меняются и энергия вращения электрона, и энергия его осцилляций. Появившаяся последовательность поправок к общей энергии имеет предел и приводит, в конце концов, к тому, что общая энергия электрона станет равной не двум, а трем энергиям вращения электрона вокруг ядра  $3E_H$ . Основное состояние водорода с осциллирующим электроном станет равным  $E_H^T = -40.8$  эВ, а его радиус вращения будет в три раза меньше  $r_H$ , т.е.  $r_H^T \approx 0.018$  нм. Атом водорода с осциллирующим электроном называется Трансводородом.

Магнитный момент электрона в трансводороде в соответствие с формулой (1a) создаёт на расстоянии от ядра  $1.2r_H^T$  магнитное поле равное  $B_{rH} \sim 420$  Тл. Для других водородоподобных трансатомов в основных состояниях их радиусы

будут уменьшаться обратно пропорционально заряду ядра  $0.018/Z$  нм (2), а энергии связи их электронов будут увеличиваться как  $40.8 \cdot Z^2$  эВ (3). Будут увеличиваться магнитные поля, создаваемые магнитным моментом электрона, как  $\sim 420 \cdot Z^3$  Тл ( $1/r^3$ ,  $1a$ ). Например, у иона трансгелия  $\text{He}^+$ :  $Z = 2$ ,  $r_{\text{He}^+}^T = 8.8 \cdot 10^{-12}$  м,  $E_{\text{He}^+}^T = -163.2$  эВ,  $B_{r\text{He}^+} \sim 3.4 \cdot 10^3$  Тл.

Заселение осцилляционных состояний у водородоподобных ионов происходит за счет их столкновения друг с другом в плотной плазме.

#### 4. СПАРИВАНИЕ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНСАТОМАХ

В сильных магнитных полях, благодаря обменному кулоновскому взаимодействию [26] и появлению у электронов осцилляционных квантовых чисел, электроны могут спариваться, образуя ортобозоны [27]. Ортобозон имеет общий спин равный единице  $S = 1\hbar$ . В ортобозонной паре спины электронов  $s_e$  параллельны друг другу  $\uparrow\uparrow$ , как и их спиновые магнитные моменты  $\mu_e \uparrow\uparrow$  (Рис. 3а). Электроны в ортобозоне находятся в одинаковых энергетических состояниях, но с осцилляционными квантовыми числами, имеющие противоположный знак  $n_{b1} = -n_{b2}$ .

У ортобозонной пары обменное кулоновское притяжение между электронами точно равно их кулоновскому отталкиванию. Поэтому энергия взаимодействия между электронами становится равной нулю [27]. Электроны в ортобозонной паре взаимодействуют кулоновским образом только с атомным ядром. Располагаются они на одном радиусе  $r_z$  и с одинаковой энергией связи. В ортобозонной паре электроны осциллируют около одной орбитали в противофазе  $\mathbf{P}_{1e} = -\mathbf{P}_{2e}$  [23]. Согласно правилу квантования:  $n_{b1} \cdot \hbar = r_z \cdot P_{1e} = r_z \cdot (-P_{2e}) = -n_{b2} \cdot \hbar$ , следовательно  $n_{b1} = -n_{b2}$  (Рис. 3б). Электроны осциллируют как вдоль, так и поперек магнитного поля, создавая своим движением траекторию в виде тора (Рис. 3с).

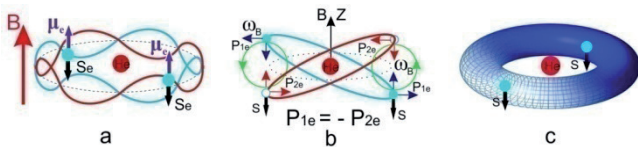


Рис. 3. а – образование ортобозона в основном состоянии в сильном магнитном поле  $B$ , б – осцилляции электронов в противофазе, с – трансгелий и тор ортобозона.

Ортобозоны в трансатомах с зарядом ядер  $Z \geq 4$  образуют конденсат Бозе-Эйнштейна. Поскольку все электроны в Бозе-конденсате находятся в одинаковом состоянии, то общая энергия связи электронов у трансатомов в основном состоянии равна сумме энергий связи каждого отдельного электрона. То же относится и к магнитному полю трансатома  $B_S$  (1b), создаваемому суммой магнитных моментов электронов. Поскольку магнитные моменты электронов в Бозе-конденсате направлены в одну сторону, то они порождают вокруг трансатома и внутри него, там, где расположено ядро, направленное, неоднородное, анизотропное и ультрасильное магнитное поле до  $B_S \sim 10^5 - 10^{10}$  Тл [28,29]. Такое огромное поле, взаимодействуя с магнитными спиновыми и магнитными орбитальными моментами протонов и нейтронов в ядре, меняет структуру ядра, превращая его в ТрансЯдро. ТрансЯдро с электронным конденсатом Бозе-Эйнштейна называется ТрансАтомом. Образуется новое состояния вещества: спиновый нуклидный электронный конденсат. У трансатома гелия с ортобозонной парой:  $r_{\text{He}^+}^T = 8.8 \cdot 10^{-12}$  м,  $E_{\text{He}^+}^T = -326.4$  эВ,  $B_{r\text{He}^+} \sim 6.8 \cdot 10^3$  Тл.

#### 5. НУКЛЕОСИНТЕЗ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭПОХУ ФОТОНОВ

По современным представлениям эпоха фотонов началась через 10 секунд после Большого взрыва (БВ) и продолжалась 380000 лет. Эпоха фотонов включает в себя эпоху Рекомбинации, которая началась через 18000 лет после БВ. В эпоху Рекомбинации электроны связываются с протонами и ядрами гелия с образованием ионов гелия и нейтральных атомов. Таким образом, промежуток времени от 10 секунд до 18000 лет характеризовался тем, что протоны и нейтроны были представлены в нем первичными атомными ядрами: протонами ( $\sim 92$  ат.%), гелием-4 ( $\sim 8$  ат.%), а также следовыми количествами дейтронов, гелия-3 и лития. Вселенная тогда находилась в состоянии абсолютной плазмы (без нейтральных атомов и ионов), состоящей из “голых” ядер, электронов и фотонов. Температура плазмы в эпоху фотонов менялась от  $10^9$  К до 4000 К, от 100 кэВ до 0.4 эВ.

Через  $10^4$  секунд после БВ температура плазмы составляла  $10^6$  К, а ее энергия 100 эВ. Значение этой энергии более чем в три раза меньше энергии электронного ортобозона в основном состоянии у трансатома гелия  $E_{He}^T = -326.4$  эВ. Поэтому, начиная с этого момента, могут образовываться нейтральные атомы трансгелия. Но для этого необходимо, чтобы в абсолютной плазме образовались сильные магнитные поля  $B > 30$  Тл.

Известно, что сильные магнитные поля появляются в конденсированных ионизированных средах при наличии в них однонаправленного движения ансамбля свободных электронов с плотностью  $\rho > 10^{21}$  эл/см<sup>3</sup> [30]. Магнитные моменты электронов  $\mu_e$ , которые движутся в одном направлении, благодаря свойству спиральности, направлены в основном в одну сторону, в сторону их импульсов  $\mu_e \uparrow m_e V_e$  (Рис. 4а). В соответствие с формулой (1b) они генерируют магнитное поле  $B_\mu$ , вектор магнитной индукции которого совпадает с направлением движения электронов (Рис. 4б). Кроме поля  $B_\mu$  электроны формируют самосогласованное обменное спиновое поле  $S$ , в котором они притягиваются друг к другу, стимулируя тем самым образование ортобозонных электронных пар.

Поэтому, условия для создания сильных магнитных полей наилучшим образом реализуются как раз в эпоху фотонов с начальной большой плотностью абсолютной плазмы, которая преимущественно разлетается в одном направлении – от места Большого взрыва.

Более того, ансамбль электронов движется не только в одном направлении, его электроны дополнительно вращаются вокруг линий создаваемого ими магнитного поля  $B_\mu$ .

Вращение всех электронов в ансамбле так же однонаправленное – по часовой стрелке, если смотреть по направлению движения электронов. Кроме этого, создаваемые электронами магнитные поля являются своеобразными ловушками-сепараторами для них самих, если их скорости  $V_e$  – энергии  $E_e$  не превышают некоторого порогового значения  $V_{le} - E_{le}$ , определяемого формулой Лоренца:  $v_e = \frac{eBR_B}{m_e}$ ;  $E_e = \frac{(eBR_B)^2}{2m_e}$  (Рис. 4с). Для примера: при значений магнитного поля  $B_e \sim 10$  Тл, локализованного в области с радиусом  $R_B \sim 1$  мкм, значение пороговой энергии электрона в плазме составляет  $E_{le} \sim 8.8$  эВ. Вследствие этого эффекта происходит незначительное, но локальное охлаждение плазмы.

Электроны свободно вращаются также вокруг атомных ядер. Из-за постоянного изменения расстояния между ядрами и электронами, в результате кулоновского взаимодействия между ними, электроны начинают осциллировать как вдоль, так и поперек направления своего движения. Из-за теплового движения электронов и из-за их постоянного столкновения, как между собой, так и с ядрами, о вращении в магнитном поле и осцилляциях отдельного электрона можно говорить как о тенденциях в его движении в общем поле  $B_\mu - S$ . Однако по совокупности движения электронов с низкими энергиями в магнитном поле становятся коррелированными, и создаются благоприятные условия для образования трансгелиев и трансводородов (Рис. 4д). Вектора магнитной индукции трансатомов совпадают с направлением магнитного поля, создаваемого однонаправленным движением электронов. Сверхсильные магнитные поля трансатомов в свою очередь стимулируют образование других трансатомов, создавая тем самым условия для возможных “цепных” реакций трансмутации.

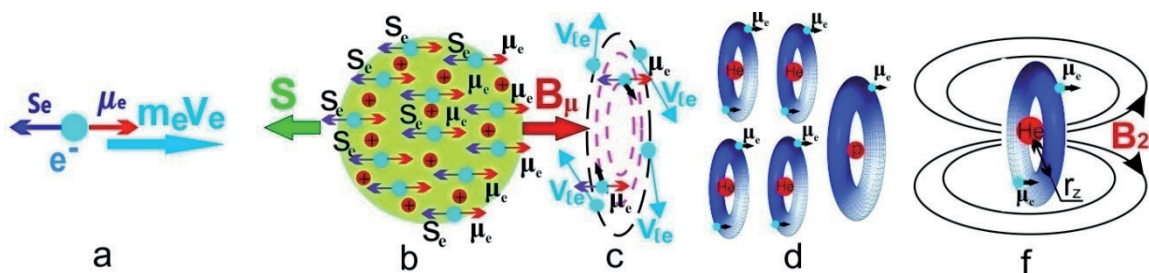


Рис. 4. а – спиральность электрона; б – генерация магнитных  $B_\mu$  и обменных  $S$  полей в однонаправленном потоке электронов; с – разделение электронов по скоростям в магнитном поле; д – образование трансгелия и трансводорода; е – сверхсильное магнитное поле трансгелия.

Обладая сверхсильными магнитными полями:  $B_{rH} \sim 424$  Тл,  $B_{rHe+} \sim 3.4 \cdot 10^3$  Тл,  $B_{2c} \sim 6.8 \cdot 10^3$  Тл (Рис. 4), трансатомы притягиваются друг к другу, образуют трансмолекулы и неотвратно вступают в многоядерные, низкоэнергетические реакции трансмутации с производством атомных ядер других химических элементов. Реакции трансмутации происходят благодаря резонансному интерференционному обменно-взаимодействию [31].

Началась нескончаемая эпоха естественного нуклеосинтеза.

В ионизированных конденсированных средах реакции естественного нуклеосинтеза происходят постоянно там, где имеется движущийся однонаправленно ансамбль свободных электронов с плотностью  $\rho > 10^{21}$  эл/см<sup>3</sup>: и в космической плазме, и в звездах, и на планетах и в других структурах и образованиях Вселенной.

На Рис. 5, 6 и 1, представлены результаты экспериментов, полученные Дидыком А.Ю. и Вишневым Р., по синтезу химических элементов при облучении тормозными гамма-квантами с граничной энергией 10 МэВ конденсированных газов: водорода, гелия и ксенона [14-16,32]. Однонаправленный поток тормозных гамма-квантов создает однонаправленный поток свободных электронов, которые порождают сильные магнитные поля. В этих магнитных полях атомы водорода, гелия и ксенона превращаются в трансатомы с собственными сверхсильными магнитными полями, которые, соединяясь в ядерные трансмолекулы, в свою очередь, с соблюдением всех законов сохранения преобразуются в другие стабильные химические элементы (Рис. 5, 6 и 1). После осуществления низкоэнергетических ядерных реакций атомные ядра разлетаются. И если они не находятся в сильном магнитном поле, то продукты реакций образуют обычные ядра и обычные атомы.

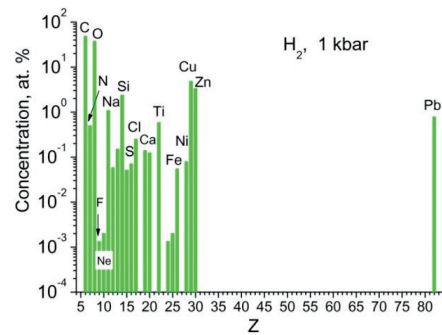


Рис. 5. Элементный состав, усредненный по 15 измерениям разных объектов.

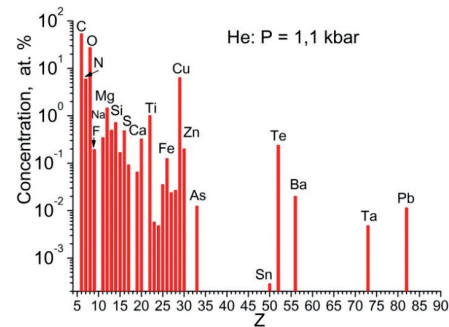


Рис. 6. Элементный состав, усредненный по 11 измерениям, в эксперименте с He при  $P=1.1$  кбар.

Как уже говорилось выше, в процессе трансмутации происходит синтез не только новых химических элементов, но и синтез посторонних твердотельных структур, содержащих эти новые элементы. Во всех экспериментах после окончания облучений в реакционных камерах были обнаружены новые объекты: частицы и другие простые и сложные микроструктуры. На Рис.7 представлены изображения частиц, полученные с помощью методов растровой электронной микроскопии. Частицы были произведены в экспериментах при облучении гамма-квантами разных газов: а – частица, состоящая из диоксида титана  $TiO_2$ , была синтезирована в эксперименте при облучении дейтерия при давлении 3 кбар в присутствии образца палладия; б – частицы свинца, произведенные в эксперименте при давлении



Рис. 7. РЭМ-изображения частиц, синтезированных в экспериментах с разными газами при высоком давлении.

дейтерия 1.2 кбар с палладием;  $c$ ,  $d$  – частицы, полученные в экспериментах с водородом при давлении  $P = 1$  кбар ( $\sim 700 \times 630$  мкм) и  $P = 3.4$  кбар, соответственно;  $e$  – графитовые фольги, синтезированные в эксперименте с давлением гелия 1.1 кбар.

## 6. БИООРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ

Время окончания эпох фотонов и Рекомбинации, наступает через 380000 лет после БВ и характеризуется моментом, когда все протоны захватили электроны и образовали атомы водорода. К этому времени в результате реакций низкоэнергетической трансмутации происходящий нуклеосинтез привел к появлению в космической водородно-гелиевой плазме всех химических элементов (Рис. 1). Но прежде всего легких химических элементов: углерода, азота и кислорода, атомное содержание которых более, чем на два порядка превосходило производство других химических элементов (Рис. 5, 6) [14-16,32]. Температура плазмы составляла в то время  $\sim 4000$  К или  $\sim 0.4$  эВ.

Очевидно, что появление в конденсированной среде плазмы углерода, азота и кислорода при подавляющем их окружении ионами водорода и его атомами немедленно приводит к запуску реакций органического мира. Водород, углерод, азот и кислород являются основными элементами в многообразном органическом и биотическом мире. Началось производство самых разнообразных органических молекул, как самых простых, так и высокомолекулярных.

В постоянно, с огромной интенсивностью меняющихся условиях существования конденсированной среды, при постоянном воздействии на возникающие молекулярные и твердотельные структуры разрушительных: радиационных, температурных и механических факторов, органические соединения не только увеличивали свое многообразие, но и параллельно преобразовывались в биологические молекулы. Так недавно группа ученых выявила химические реакции, которые могли привести к появлению жизни [33]. Эти химические реакции происходят с участием только четырех химических элементов, образующих самые простые органические молекулы: кетокислоты (производные углеводов, содержащие  $C=O$

и  $COOH$  группы), цианид  $HCN$ , аммиак  $NH_3$  и углекислый газ  $CO$ . Продуктами этих реакций является: аминокислоты и нуклеиновые кислоты – строительные блоки для белков и ДНК Живой материи. Другая группа ученых провела синтез пептидов, предшественников белков, в условиях, преобладающих в космосе [34]. Применение метода меченых атомов, использующим изотоп  $^{13}C$ , позволило авторам проследить предполагаемый путь образования пептидов, формирующихся за счет полимеризации молекул аминокетенов, которые синтезируются в реакции  $C + CO + NH_3$ .

Таким образом, начавшийся нуклеосинтез одновременно дал старт процессам неорганической химии, но, в большей степени, органической и биологической химии [35]. Продукты нуклео-, органического и био-синтеза, благодаря резонансному интерференционному обмену взаимодействию между ними и свойству самых разнообразных систем строить самоподобные структуры, соединялись и формировали макроскопические образования, из которых позднее образовывались органические и биологические планеты. На этих биологических планетах обязательно, благодаря интенсивно идущим мутациям, свойству фрактальной геометрии природы, законам существования, сохранения и развития систем, должна была сначала появиться примитивная биологическая Жизнь, которая неизбежно должна была породить разумную жизнь [36,37].

Органическое и биологическое вещество после периода Рекомбинации многократно преобладало над неорганическим веществом (без учета водорода и гелия). Последующий переход биологической и живой материи в неорганическое вещество, связан с разрушительным действием внешней среды, с идущими в конденсированных средах реакциями трансмутации и с жизнедеятельностью самой живой материи. Поэтому с самого начала нуклеосинтеза, эволюция Живой материи и развитие Косного вещества всегда шли и идут параллельно и взаимопроникая друг в друга. Поскольку они состоят из одинаковых атомов, то Живая материя прирастает за счет переработки Косного вещества, представленного органическими и неорганическими структурами,

а Космос пополняется за счет Живой материи после ее гибели.

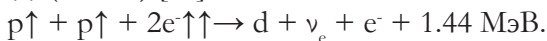
Таким образом, после окончания эпохи Рекомбинации, когда появилась возможность органического и биологического синтеза, началась эпоха возникновения Жизни, в том числе Разумной жизни. Поэтому Темные века в хронологии Вселенной, на самом деле являются Светлыми веками - веками возникновения Жизни. Из выше сказанного можно сделать три важных утверждения:

- Жизнь вечна в физически вечной Вселенной.
- Вселенная наполнена Живой материей.
- Космос, по большей части, является источником жизни на планетах, благоприятных для ее существования, в том числе источником земной жизни.

При возрасте Вселенной в 13.8 миллиардов лет и учитывая фрактальную геометрию природы [36] наивно полагать, что наша земная цивилизация является единственно разумной во всем окружающем нас Мире.

### 7. НУКЛЕОСИНТЕЗ В ЗВЕЗДАХ

Поскольку реакции трансмутации преимущественно происходят в расплавах, в растворах и в плотных газах, то они могут осуществляться как в звездах, так и на планетах. Так в жидких и газообразных верхних слоях звезд, имеющих температуру ниже  $10^6$  К и, соответственно, энергию ниже 100 эВ, могут создаться условия при которых формируются сильные магнитные поля. В таких условиях протоны, атомы водорода, ядра гелия, его ионы и атомы будут преобразовываться в трансатомы водорода и гелия. Трансатомы водорода "H", соединяясь в трансмолекулы "H<sub>2</sub>" или в трансмолекулы "pp" с параллельными спинами протонов ↑↑, вступают в ядерные реакции трансмутации без кулоновского барьера с участием электронов, спаренных в ортобозон  $2e^- \uparrow\uparrow$  (Рис. 8) [38]:



На Рис. 8 двойные линии показывают одновременное излучение двух фотонов в соответствующих трансатомных переходах. Цифры на линиях даны в электрон-вольтах.

После синтеза дейтронов тождественные атомы изотопов водорода: дейтерия D, а в дальнейшем и трития T, в сильном магнитном

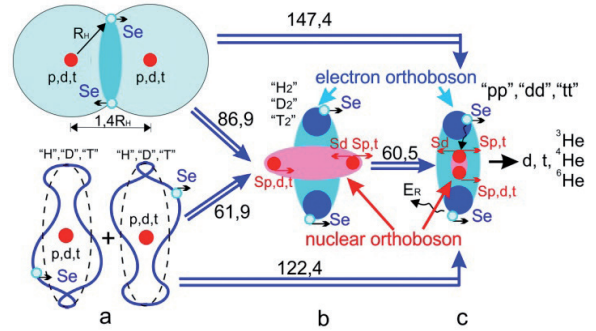
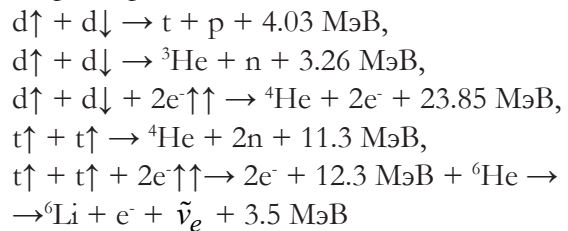
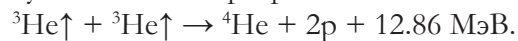


Рис. 8. а – два трансатома водорода "H" в сильном магнитном поле и молекула водорода; б – образование трансмолекулы водорода "H<sub>2</sub>"; в – образование трансмолекул "pp", "dd" и "tt".

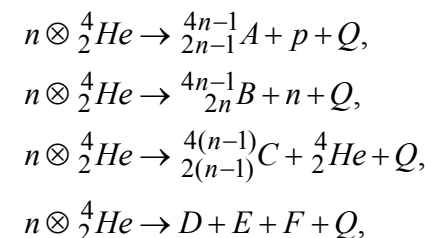
поле так же могут образовывать трансмолекулы "dd" и "tt" (Рис. 8). А тождественные ядра дейтронов, обладающие спином  $1\hbar$ , и тритонов t со спином  $\hbar/2$ , могут вступить в безкулоновские ядерные реакции синтеза:



Изотопы гелия  ${}^3\text{He}$ , имеющие спин  $\hbar/2$ , также могут вступать в ядерную реакцию без кулоновского барьера:



Другие изотопы гелия  ${}^4\text{He}$ , превращаясь в атомы трансгелия, благодаря собственным ультрасильным магнитным полям, будут притягиваться друг к другу и вступать в обменное взаимодействие своими электронными Бозе-конденсатами. Вследствие этого будут образовываться многоядерные трансмолекулы  $m \otimes {}^4\text{He}$  с гелиевым Бозе-Эйнштейна конденсатом [27]. Создание таких трансмолекул приводит к многоядерным реакциям трансмутации без кулоновского барьера с испусканием протонов, нейтронов, альфа-частиц и с образованием тяжелых химических элементов с зарядом ядра  $Z \geq 6$  (Рис. 6):





где  $Q$  – энергия, выделяющаяся в результате реакции.

## 8. ПЛАНЕТАРНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Поскольку преобразование химических элементов в реакциях низкоэнергетической трансмутации протекает в достаточно “мягких” физических условиях  $\sim 1$  эВ/атом и воспроизводит квазиравновесное распределение [39], то можно сделать вывод, что процесс нуклеосинтеза осуществляется на планетах и формирует их элементный состав [40-43]. Сейчас в магме Земли процессы трансмутации продолжаются, и выделяемая при этом колоссальная энергия, наблюдается нами в постоянном движении литосферных плит и в извержении вулканов. Известно, что внутриплитная тектоническая активность и вулканизм не находят объяснения в рамках тектоники плит. Наиболее распространенная гипотеза, удовлетворительно объясняющая вулканизм и тектоническую активность внутри как океанической, так и материковой литосферы, связана с идеей горячих точек и мантийных плюмов [44]. По-видимому, в этих горячих точках и мантийных плюмах, так же, как в жидком внешнем ядре и в D-слое, происходят процессы трансмутации. При этом синтезированные легкоплавкие химические элементы, начиная с лития, поднимаются по мантийным плюмам вверх к поверхности Земли, а изотопы железа и никеля, элементы которые не участвуют в реакциях трансмутации, опускаются вниз, увеличивая твердое внутреннее ядро Земли.

То, что планетарный нуклеосинтез определяется реакциями трансмутации, косвенно подтверждается результатами экспериментов. Оказалось, что выход химических элементов в реакциях трансмутации достаточно хорошо совпадает с распространенностью элементов по массам в земной коре. Более того, совпадают и изотопные соотношения химических элементов в продуктах трансмутации с природными изотопными соотношениями [45]. Вернадский В.И. писал: “Все указывает, что радиоактивный распад химических элементов – превращение одного изотопа в другой – есть не частный случай, а общее свойство земного вещества. Все химические элементы Земли находятся в радиоактивном распаде. Это основной физико-химический процесс, лежащий в основе

всех геологических явлений. Химическое перерождение планеты является, в конце концов, его следствием [46]”.

Важнейшим событием в геологии, в геохронологии стало открытие хорошо прослеживаемых циклов в геологической активности на Земле [47,48]. Ранее считалось, что геологические события имеют случайный характер. Но проведенный анализ геологических событий на протяжении последних 260 млн. лет показал, что в геологической активности наблюдается строгая цикличность с периодами  $\sim 32.5$  и  $\sim 26.2$  миллионов лет. Цикличность геологической активности на Земле мы связываем со струйными потоками вещества и энергии, выбрасываемые из центра нашей Галактики, которые Земля регулярно пересекает в процессе вращения вокруг него. Галактические энергетические потоки вызывают реакции трансмутации в мантии и в жидком внешнем ядре Земли [43,35]. А колоссальная энергия, выделяемая в этих реакциях, проявляется как катастрофическая, геологическая активность на Земле. Очевидно, что Галактические струйные энергетические потоки, стимулируя геологическую активность, определяют начала и окончания геологических эр и периодов в эволюции геосферы и биосферы Земли. Последняя геологическая активность на Земле произошла примерно 7 млн. лет назад. Это позволяет предположить и надеяться, что следующая крупная, катастрофическая геологическая активность начнется более чем через 25 млн. лет.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие низкоэнергетических ядерных реакций и создание теории этих реакций привели к обнаружению третьего пространственного осцилляционного квантового числа, “потерянного” в связанных системах: в атомах и в ядрах. Оно проявляется для атомных электронов во внешних, сильных магнитных полях  $>30$  Тл, а для нуклонов в ядрах в сверхсильных магнитных полях  $>10^4$  Тл, когда орбитальные моменты импульсов и спины этих частиц строго ориентируются относительно вектора магнитной индукции этих полей.

Осцилляционное квантовое число у атомных электронов ответственно за возникновение новых основных состояний в атоме водорода, в

ионе гелия, и других водородоподобных атомах. Атомы, электроны которых находятся в новых основных состояниях, называются трансатомами. Энергия связи электрона в трансатоме в три раза больше, чем в обычных атомах. Кроме того, поскольку спин электрона и, соответственно, его магнитный момент строго ориентируются по направлению внешнего магнитного поля, то магнитный момент электрона создает собственное сильное магнитное поле.

Осцилляционные квантовые числа противоположного знака позволяют двум электронам, благодаря обменному кулоновскому взаимодействию, образовать ортобозон с параллельными спинами,  $S = 1h$ . В трансатомах с зарядом ядра  $Z \geq 4$  электронные ортобозоны образуют конденсат Бозе-Эйнштейна. Поскольку магнитные моменты всех электронов в Бозе-конденсате направлены в одну сторону, то они порождают вокруг трансатома и внутри него, там, где расположено ядро, направленное, неоднородное, анизотропное и ультрасильное магнитное поле до  $B_S \sim 10^5 - 10^{10}$  Тл.

Новые основные состояния в трансводороде, в ионе трансгелия и в атоме трансгелия:  $E_H^T = -40.8$  эВ,  $E_{He^+}^T = -163.2$  эВ,  $E_{He}^T = -326.4$  эВ, позволили сместить начало рекомбинации электронов с протонами и ядрами гелия в эпоху фотонов, через  $10^4$  секунд после БВ, когда температура абсолютной плазмы Вселенной составляла  $10^6$  К, а ее энергия 100 эВ. Внешние магнитные поля, в которых происходила рекомбинация электронов с ядрами в основные состояния трансатомов, были образованы в абсолютной космической плазме, благодаря магнитным моментам свободных электронов с плотностью  $\rho > 10^{21}$  эл/см<sup>3</sup>, движущихся в одном направлении.

Собственные сверхсильные магнитные поля трансатомов:  $B_{rH} \sim 424$  Тл,  $B_{rHe^+} \sim 3.4 \cdot 10^3$  Тл,  $B_{rHe} \sim 6.8 \cdot 10^3$  Тл, притягивают их друг к другу. Трансатомы объединяются в трансмолекулы и вступают в низкоэнергетические реакции трансмутации с производством атомных ядер других химических элементов. В реакциях трансмутации с наибольшим выходом производятся ядра углерода, азота, кислорода.

После окончания эпохи Рекомбинации, когда температура космической плазмы составляла  $\sim 4000$  К или  $\sim 0.4$  эВ, наступил период

синтеза из атомов углерода, азота, кислорода при подавляющем их окружении атомами водорода самых разнообразных органических молекул, как самых простых, так и высокомолекулярных. Практически сразу, параллельно органическому синтезу, происходил синтез биологических молекул: аминокислот и нуклеиновых кислот – строительных блоков для белков и ДНК Живой материи.

Продукты нуклео-, органического- и био-синтеза соединялись друг с другом, строили самоподобные структуры, и формировали макроскопические образования, из которых позднее образовывались органические и биологические планеты. На этих биоорганических планетах обязательно должна была сначала появиться примитивная биологическая Жизнь, которая неизбежно должна была породить разумную жизнь [43,44]. Трудно представить возможности Высшего Разума возрастом более 12 млрд. лет. По другую сторону оси времени наша земная цивилизация является, по-видимому, одной из самых молодых во Вселенной и, в силу возраста, самой неопытной и необразованной.

Поскольку реакции трансмутации преимущественно происходят в расплавах, в растворах и в плотных газах и протекают в достаточно “мягких” физических условиях  $\sim 1$  эВ/атом, то они могут осуществляться как в звездах, так и на планетах.

Недавно открытая цикличность в геологической активности на Земле с периодами  $\sim 32.5$  и  $\sim 26.2$  миллионов лет, позволила нам предположить существование галактических потоков вещества и энергии, истекающих из центрального диска нашей галактики. Эти потоки стимулируют реакции трансмутации в мантии и в жидком внешнем ядре Земли. Выделяющаяся в этих реакциях энергия вызывает регулярно происходящую катастрофическую геологическую активность на Земле. Очевидно, что геологическая активность определяет начала и окончания эр и периодов в эволюции геосферы и биосферы Земли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы 1-27-й Российских конференций по холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии (РКХТЯХЭ и ШМ).

2. Proceedings of the 1-24th International Conferences on Condensed Matter Nuclear Science (Cold Fusion, ICCF).
3. Балакирев ВФ, Крымский ВВ, Болотов БВ, Вачаев АВ, Иванов НИ и др. *Взаимопревращение химических элементов*. Екатеринбург, УрО РАН, 2003, 96 с.
4. Karabut AV, Kucherov YaR, Savvatimova IB. Nuclear product ratio for glow discharge in deuterium. *Phys. Letters A*, 1992, 170:265-272.
5. Савватимова ИБ, Карабут АВ. Продукты ядерных реакций, регистрируемые на катоде после экспериментов в тлеющем разряде в дейтерии. *Поверхность*, 1996, 1:63-75 и 76-81.
6. Savvatimova IB. Transmutation Effects in the Cathode Exposed Glow Discharge. Nuclear Phenomena Or Ion Irradiation Results? *Proc. 7th Int. Conf. on Cold Fusion (ICCF)*, Canada, 1998:342-350; Reproducibility of Experiments in Glow Discharge and Processes Accompanying Deuterium ions Bombardment. *Proc. 8th ICCF*, Italy, 2000:277-283.
7. Солин МИ. Экспериментальные факты спонтанного зарождения конденсата солитонных зарядов с образованием продуктов ядерного синтеза в жидком цирконии. *Физическая мысль России*, 2001, 1:43-58.
8. Adamenko SV., Selleri F., A. van der Merwe (eds.). Controlled Nucleosynthesis Breakthroughs in Experiment and Theory. *Series: Fundamental theories in Physics*, Springer, 2007, 156:780. <http://www.springer.com/physics/elementary/book/978-1-4020-5873-8>.
9. Адаменко СВ. Концепция искусственно инициируемого коллапса вещества и основные результаты первого этапа её экспериментальной реализации. *Препринт Лаборатории электродинамических исследований «Протон-21»*, Киев, 2004; [http://proton-21.com.ua/publ/Preprint\\_ru.pdf](http://proton-21.com.ua/publ/Preprint_ru.pdf).
10. Уруцкоев ЛИ, Ликсонов ВИ, Циноев ВГ. Экспериментальное обнаружение “странного” излучения и трансформация химических элементов. *Прикладная физика*, 2000, № 4:83-100. Urutskoev LI, Liksonov VI, Tsinoev VG. *Annales de la Fondation Louis de Broglie (AFLB)*, 2002, 27(4):701-726.
11. Kuznetsov VD, Mishinsky GV, Penkov FM, Arbutov VI, Zhemenik VI. Low energy transmutation of atomic nuclei of chemical elements. *AFLB*, 2003, 28(2):173-214.
12. Кривницкий ВА. *Парадоксы трансмутации и развитие Земли*. М., Академика, 2016, 239 с.
13. Кладов АФ. *Кавитационная деструкция материи*. <http://roslo.narod.ru/rao/rao1.htm>.
14. Didyk AYu, Wiśniewski R. Nuclear reactions, induced by gamma quanta, in palladium saturated with deuterium surrounded by dense deuterium gas. *Eur. Phys. Lett.*, 2012, 99. P.22001-P1-22001-P6.
15. Didyk AYu, Wiśniewski R and Wilczynska-Kitowska T. The carbon-based structures synthesized through nuclear reactions in helium at 1.1 kbar pressure under irradiation with braking  $\gamma$ -rays of 10 MeV threshold energy. *Euro. Phys. Lett.*, 2015, 109: P.22001-P.1-22001-P.6.
16. Дидык АЮ, Вишневецкий Р, Мышинский ГВ, Вилчинска-Китовска Т, Семин ВА. Синтез химических элементов при облучении гамма квантами палладия в среде конденсированных газов. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(2):143-160. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.143.
17. Wisniewski R, Mishinsky GV, Wilczynska-Kitowska T, Zukowska Z, Rostocki A. Graphite-like structures, synthesized from gaseous He under high pressure, by braking irradiation of maximum energy of 10 MeV – modeling of the process. *Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement*, 2020, 13(4).
18. Высоцкий ВИ., Корнилова АА. *Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах*, М., Мир, 2003, 304 с.
19. Vysotskii VI, Kornilova AA. Transmutation of stable isotopes and deactivation of radioactive waste in growing biological systems. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 62:626-633.
20. Корнилова АА, Высоцкий ВИ. Синтез и трансмутация стабильных и радиоактивных изотопов в биологических системах. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2017, 9(1): 52-64.
21. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. *Теория поля*. М., Наука, 1973, 504 с.
22. Сликтер Ч. *Основы теории магнитного резонанса*. М., Мир, 1967, 324 с.
23. Мышинский ГВ. Атом в сильном магнитном поле. Превращение атомов в трансатомы. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2017, 9(2):147-160. DOI: 10.17725/rensit.2017.09.147.
24. Fock VA. Bemerkung zur Quantelung des harmonischen Oszillators im Magnetfeld. *Z.Phys.*, 1928, 47:446-448.
25. Heiss WD., Nazmitdinov RG. Orbital magnetism in small quantum dots with closed shells. *Pis'ma v ZhETF*, 1998, 68(12):870-875.
26. Heisenberg W. Über die Spektren von Atomsystemen mit zwei Elektronen. *Z. Phys.*, 1926, 39(7):499-518.
27. Мышинский ГВ. Многоядерные реакции в конденсированном гелии. *РЭНСИТ*, 2017, 9(1): 94-105. DOI: 10.17725/rensit.2017.09.094.
28. Мышинский ГВ. Магнитные поля трансатомов. Спиновый-нуклидный-электронный конденсат. *Журнал Формирующихся Направлений Науки*

- (ЖФНН), 2017, 15-16(5):6-25; <http://www.unconv-science.org/>.
29. Мышинский ГВ. Спиновый электронный конденсат. Спиновый нуклидный электронный конденсат. РЭНСИП: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2018, 10(3):411-424. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.411.
  30. Мышинский ГВ. Магнитные поля и высокотемпературная сверхпроводимость в возбужденных жидкостях. Неизвестные частицы. РЭНСИП: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(3):303-318. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.303.
  31. Мышинский ГВ. Резонансное интерференционное обменное взаимодействие. РЭНСИП: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2019, 11(3):261-278. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.261.
  32. Вишневецкий Р, Мышинский ГВ, Гульбеян ГТ, Вилячинска-Китовска Т, Семин ВА. Синтез химических элементов и твердотельных структур при облучении гамма квантами конденсированных газов. ЖФНН, 2017, 17-18(5):6-15.
  33. Pulletikurti S, Yadav M, Springsteen G. Prebiotic synthesis of  $\alpha$ -amino acids and orotate from  $\alpha$ -ketoacids potentiates transition to extant metabolic pathways. *Nature Chemistry*, 2022. DOI: 10.1038/s41557-022-00999-w.
  34. Krasnokutski SA, Jäger C, Henning T, Geffroy C, Remaury QB and Poinot P. Formation of extraterrestrial peptides and their derivatives. *Sci. Adv.*, 2024, 10, ead7179. DOI: 10.1126/sciadv.ad7179.
  35. Мышинский Г.В. В.И. Вернадский и новая парадигма. РЭНСИП. 2023, 15(4):463-482.
  36. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва, Ин-т комп. исследований, 2002, 656 с.
  37. Турчин ВФ. Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. Изд. 2-е. М., Словарное издательство ЭТС, 2000, 368 с.
  38. Мышинский ГВ. Безкулоновские ядерные реакции трансатомов. Энергия звезд и нуклеосинтез. РЭНСИП: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2018, 10(1):35-52. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.035.
  39. Мышинский ГВ, Кузнецов ВА, Старостин ВИ. Естественный нуклеосинтез. РЭНСИП: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(4):473-496. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.473.
  40. Кривицкий ВА, Мышинский ГВ, Старостин ВИ. Планетарный нуклеосинтез и рудообразование. Спиновый конденсат Бозе-Эйнштейна из атомных электронов и атомных ядер. *Смирновский сборник*, 246-265. М., МАКС Пресс, 2019.
  41. Мышинский ГВ, Кривицкий ВА, Старостин ВИ. Квантовая геология. Возможность протекания нуклеосинтеза не только в звездах, но и на планетах в процессе их эволюции. *Смирновский сборник*. 2020:96-136, М., МАКС Пресс, 2021.
  42. Мышинский ГВ, Старостин ВИ. Квантовая геология – научная дисциплина, рожденная новой научной революцией. Планетарный нуклеосинтез и рудообразование. *Смирновский сборник*, 2021: 155-192, М., МАКС Пресс, 2021.
  43. Мышинский ГВ, Старостин ВИ. Естественный нуклеосинтез – фундаментальный процесс в эволюции земли. *Смирновский сборник*, 2023:86-134, М., МАКС Пресс, 2023.
  44. Грачев АФ. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии. *Физика Земли*, 1996, 12:3-32.
  45. Mishinsky GV, Kuznetsov VD. Element distribution in the products of low energy transmutation. *Nucleosynthesis. AFLB*, 2008, 33(3-4):331-356
  46. Вернадский ВИ. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., Наука, 1965, 374 с.
  47. Rampino MR, Caldeira K, Zhu Yu. A pulse of the Earth: A 27.5-Myr underlying cycle in coordinated geological events over the last 260 Myr. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12:101245.
  48. Rampino MR, Caldeira K, Rodriguez S. Cycles of ~32.5 My and ~26.2 My in correlated episodes of continental flood basalts (CFBs), hyper-thermal climate pulses, anoxic oceans, and mass extinctions over the last 260 My: Connections between geological and astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 2023, 246:(18723):104548. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104548.

#### Мышинский Геннадий Владимирович

научный сотрудник

Объединенный институт ядерных исследований  
6, ул. Жолио-Кюри, Дубна 141980, Моск. обл., Россия  
E-mail: mysh@jinr.ru

#### Вишневецкий Роланд

доктор физических наук, профессор

Институт сельскохозяйственной и пищевой биотехнологии  
Раковецка 36, 02-532 Варшава, Польша  
E-mail: roland.wisniewski@gmail.com

#### Старостин Виктор Иванович

д.г.-м.н., профессор, академик РАЕН

МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет  
1, Ленинские горы, Москва 119234, Россия  
E-mail: vistar.geol@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.367

## Возбуждение терагерцовых плазмонных мод в графеновом квадратном микрорезонаторе

Полищук О.В., Фатеев Д.В., Попов В.В.

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

Саратов 410019, Российская Федерация

E-mail: [polischuk.sfire@mail.ru](mailto:polischuk.sfire@mail.ru), [fateevdv@yandex.ru](mailto:fateevdv@yandex.ru), [glorvv@gmail.com](mailto:glorvv@gmail.com)

Поступила 08.04.2024, рецензирована 15.04.2024, принята 20.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.А. Бушуевым

**Аннотация:** Рассматривается графеновый квадрат, расположенный на границе раздела между двумя полупространствами с разными диэлектрическими постоянными. Проблема исследована в трехмерной постановке задачи с использованием самосогласованного электродинамического подхода, основанного на методе интегрального уравнения. Решена задача о рассеянии линейно поляризованной терагерцовой волны на графеновом квадрате. Рассчитанные спектры сечений экстинкции, поглощения и рассеяния демонстрируют возбуждение серии плазмонных мод в графеновом квадрате. Обсуждаются свойства различных типов плазмонных мод.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, плазмон, графен, двумерно-ограниченные структуры  
УДК 530.182

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00611.

**Для цитирования:** Полищук О.В., Фатеев Д.В., Попов В.В. Возбуждение терагерцовых плазмонных мод в графеновом квадратном микрорезонаторе. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):367-372. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.367.

## Terahertz plasmon modes excitation in a graphene square microcavity

Olga V. Polischuk, Denis V. Fateev, Viacheslav V. Popov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Saratov Branch, <http://www.cplire.ru/>  
Saratov 410019, Russian FederationE-mail: [polischuk.sfire@mail.ru](mailto:polischuk.sfire@mail.ru), [fateevdv@yandex.ru](mailto:fateevdv@yandex.ru), [glorvv@gmail.com](mailto:glorvv@gmail.com)

Received April 08, 2023, peer-reviewed April 15, 2023, accepted April 20, 2023

**Abstract:** We consider a graphene square located in the interface between two half-spaces with different dielectric constants. Using a self-consistent electromagnetic approach based on the integral equation method, we solve the problem of a linearly polarized terahertz electromagnetic wave scattering by the graphene square. The spectra of extinction, absorption, and scattering cross sections reveal the various plasmon modes excitation in graphene square. The properties of the plasmon modes different types are discussed.

**Keywords:** terahertz range, plasmon, graphene, two-dimensionally limited structures

UDC 530.182

**Acknowledgements:** This work was supported by Russian Science Foundation Grant No. 22-19-00611

**For citation:** Olga V. Polischuk, Denis V. Fateev, Viacheslav V. Popov. Terahertz plasmon modes excitation in a graphene square microcavity. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):367-372e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.367.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (368)
  2. ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА И МЕТОД РЕШЕНИЯ (368)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ (370)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (372)
- ЛИТЕРАТУРА (372)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работы по исследованию двумерных плазменных колебаний (плазмонов) в графеновых структурах являются одним из многообещающих направлений терагерцовой (ТГц) оптоэлектроники [1]. Плазменные колебания ТГц диапазона в графене интенсивно изучаются [2], начиная с открытия графена [3]. Интерес к графеновой плазмонике в большой степени вызван высокой подвижностью носителей заряда в графене (в том числе при комнатной температуре) [4], значительно превышающей подвижность электронов в полупроводниковых гетероструктурах [5]. Плазмоны характеризуются малыми длинами волн (на 2-3 порядка величины меньшими, чем длина ТГц волны) и сильной локализацией ТГц поля вблизи графена [6]. Это позволяет сконцентрировать ТГц поле в очень малом объеме (с субмикронными размерами) и, тем самым, значительно увеличить эффективность взаимодействия ТГц поля с графеном.

Плазмоны в графеновых структурах могут возбуждаться в широком диапазоне ТГц частот [7]. Были предложены различные устройства, использующие свойства плазменных резонансов и бегущих плазменных волн в графеновых структурах [8,9]. Таким образом, исследование плазменных колебаний в разнообразных графеновых структурах в качестве платформы для создания эффективных компактных устройств управления ТГц излучением является актуальной задачей.

В настоящее время, моделирование возбуждения двумерных плазмонов проводится, в основном, для бесконечных структур или для структур, ограниченных только в одном направлении [10-13], что не позволяет изучить важные размерные эффекты и снижает практическую ценность приближенных теоретических моделей. Плазменные

возбуждения в двумерной электронной системе на основе структуры AlGaAs/GaAs с квадратной геометрией были исследованы экспериментально и теоретически с использованием упрощенной модели в работе [14].

В данной работе рассматривается графеновый квадрат, расположенный на границе раздела между двумя полупространствами с разными диэлектрическими постоянными. С использованием строгого самосогласованного электродинамического подхода, основанного на методе интегрального уравнения, решена задача о рассеянии линейно поляризованной терагерцовой волны на графеновом квадрате. Исследуются свойства различных типов плазменных мод, возбуждаемых в графеновом квадрате.

## 2. ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Рассматриваемая структура представляет собой графеновый квадрат с длиной стороны  $l$ , расположенный в плоскости  $z = 0$ , разделяющей два полупространства 1 и 2 с разными действительными диэлектрическими постоянными. Внешняя плоская однородная электромагнитная ТГц волна с произвольной линейной поляризацией относительно оси симметрии квадрата падает из среды 1 нормально (вдоль отрицательного направления оси  $z$ ) на границу раздела сред и рассеивается на графеновом квадрате. Эванесцентные компоненты рассеянного поля возбуждают плазмоны в двумерном графеновом квадрате.

Метод решения задачи состоит из нескольких этапов. Сначала электрические и магнитные поля рассеянных электромагнитных волн в средах 1 и 2 представляются в виде двойного интеграла Фурье по  $x$ - и  $y$ -направлениям вдоль сторон графенового квадрата. Ниже приведено фурье-представление для  $x$ -компоненты электрического поля (фурье-представления для всех других компонент полей аналогичны):

$$E_x^{(1,2)}(x, y, z, t) = \exp(-i\omega t) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_x^{(1,2)} dq_x dq_y, \quad (1)$$

где  $\Psi_x^{(1,2)} = E_{x,q_x,q_y}^{(1,2)} \exp(ik_{z,q_x,q_y}^{(1,2)} z + iq_y y + iq_x x)$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $E_{x,q_x,q_y}^{(1,2)}$  – пространственные фурье-гармоники электрического поля  $E_x(x, y, z, t)$ ,

индексы 1 и 2 относятся соответственно к средам с диэлектрическими постоянными  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ,  $k_{z,q_x,q_y}^{(1,2)}$  – z-компонента волнового вектора фурье-гармоники соответственно в средах 1 и 2,  $q_x$  и  $q_y$  – компоненты волнового вектора фурье-гармоники в плоскости границы раздела сред 1 и 2. Компоненты волнового вектора фурье-гармоники связаны соотношением

$$k_{z,q_x,q_y}^{(1,2)} = \left( \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{1,2} - q_x^2 - q_y^2 \right)^{1/2},$$

где  $c$  – скорость света.

На следующем этапе решаются уравнения Максвелла для компонент электрических и магнитных полей в фурье-представлении (1) в средах 1 и 2. Далее поля в средах 1 и 2 свиваются с использованием стандартных граничных условий, обеспечивающих равенство тангенциальных компонент электрического поля и скачок тангенциальной компоненты магнитного поля, определяемый величиной плотности фурье-компоненты электрического тока на границе раздела сред. При этом отклик графена описывается законом Ома в фурье-представлении с использованием выражения для динамической проводимости легированного графена (с конечной энергией Ферми) [15,16].

На заключительном этапе осуществляется обратный переход от фурье-представления к координатному представлению и формируются интегральные уравнения для компонент электрических токов  $J_x$  и  $J_y$  в графеновом квадрате:

$$\begin{aligned} J_x(x, y) &= \sigma(\omega) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-w/2}^{w/2} J_x(x', y') G_{q_x, q_y}^{x,x}(x, x', y, y') dx' dy' + \\ &+ \sigma(\omega) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-w/2}^{w/2} J_y(x', y') G_{q_x, q_y}^{x,y}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma(\omega) \tilde{Z} E_{in,x}, \\ J_y(x, y) &= \sigma(\omega) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-w/2}^{w/2} J_x(x', y') G_{q_x, q_y}^{y,x}(x, x', y, y') dx' dy' + \\ &+ \sigma(\omega) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-w/2}^{w/2} J_y(x', y') G_{q_x, q_y}^{y,y}(x, x', y, y') dx' dy' + \sigma(\omega) \tilde{Z} E_{in,y}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} G_{q_x, q_y}^{m,k}(x, x', y, y') &= \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Z_{m,k,q_x,q_y} j_k(x', y') \exp(iq_x(x-x')) \times \\ &\times \exp(iq_y(y-y')) dq_y dq_x \end{aligned}$$

– ядра интегральных уравнений с верхними индексами  $m$  и  $k$ , принимающими значения  $x$  и  $y$  в разных интегральных уравнениях, при

$$\begin{aligned} Z_{x,x,q_x,q_y} &= -\frac{\mu_0 \omega}{k_{z,q_x,q_y}^{(1)} - k_{z,q_x,q_y}^{(2)}} - \frac{q_x^2}{\epsilon_0 \omega (k_{z,q_x,q_y}^{(2)} \epsilon_1 - k_{z,q_x,q_y}^{(1)} \epsilon_2)}, \\ Z_{x,y,q_x,q_y} &= Z_{y,x,q_x,q_y} = -\frac{q_x q_y}{\epsilon_0 \omega (k_{z,q_x,q_y}^{(2)} \epsilon_1 - k_{z,q_x,q_y}^{(1)} \epsilon_2)}, \\ Z_{y,y,q_x,q_y} &= -\frac{\mu_0 \omega}{k_{z,q_x,q_y}^{(1)} - k_{z,q_x,q_y}^{(2)}} - \frac{q_y^2}{\epsilon_0 \omega (k_{z,q_x,q_y}^{(2)} \epsilon_1 - k_{z,q_x,q_y}^{(1)} \epsilon_2)}, \\ \tilde{Z} &= 2\sqrt{\epsilon_1} / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}), \end{aligned}$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – соответственно электрическая и магнитная постоянные.

Система интегральных уравнений (2) решается численно с использованием процедуры Галеркина [17], путем разложения искомых плотностей тока  $J_x$  и  $J_y$  в двойные ряды по полиномам Лежандра по координатам  $x$  и  $y$  в границах графенового квадрата:

$$\begin{aligned} J_x(\chi_x, \xi_y) &= \sum_{n,n_1=0}^{\infty} \beta_{n,n_1}^{(x)} P_n(\chi_x) P_{n_1}(\xi_y), \\ J_y(\chi_x, \xi_y) &= \sum_{n,n_1=0}^{\infty} \beta_{n,n_1}^{(y)} P_n(\chi_x) P_{n_1}(\xi_y), \end{aligned}$$

где  $P_n(\chi_x)$  и  $P_{n_1}(\xi_y)$  – полиномы Лежандра  $n$ -ой степени,  $\beta_{n,n_1}^{(x,y)}$  – числовые коэффициенты разложения,  $\chi_x$  и  $\xi_y$  – нормированные координаты, определенные на отрезке  $[-1, 1]$ ,  $\chi_x = 2x/w$ ,  $\xi_y = 2y/w$ . Метод Галеркина [17] позволяет преобразовать систему интегральных уравнений (2) в бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения  $\beta_{n,n_1}^{(x,y)}$ . Для достижения требуемой сходимости решения в разложении каждой компоненты плотности тока по полиномам Лежандра по каждой координате учитываются только первые  $N$  слагаемых. Таким образом, имеем всего  $2N^2$  неизвестных коэффициентов в разложениях для двух компонент плотности тока, что приводит к системе из  $2N^2$  линейных алгебраических уравнений, которая решается численно с контролем сходимости метода. Вычисленные компоненты плотности тока позволяют рассчитать индуцированные электрические и магнитные поля в любой точке рассматриваемой структуры.

С использованием найденных компонент плотности тока в графеновом квадрате можно рассчитать сечение поглощения ТГц волны  $S^{(ab)}$  путем интегрирования выражения Джоуля-Ленца для плотности поглощаемой мощности по геометрической площади графенового квадрата:

$$S^{(ab)} = \frac{A}{P_0},$$

где

$$A = \operatorname{Re} \left( \frac{1}{\sigma(\omega)} \right) \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-w/2}^{w/2} (|J_x(x, y)|^2 + |J_y(x, y)|^2) dx dy$$

– полная поглощенная мощность в графеновом квадрате и

$$P_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{Z_0}} (|E_{in,x}|^2 + |E_{in,y}|^2)$$

– плотность потока мощности в падающей ТГц волне,  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства,  $E_{in}$  – амплитуда электрического поля падающей волны.

Сечение экстинкции  $S^{(ex)}$  вычислялось с использованием так называемой оптической теоремы [18]

$$S^{(ex)} = 4\pi^2 \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}} \frac{\operatorname{Re} [E_{in,x} J_{x,0,0} + E_{in,y} J_{y,0,0}]}{|E_{in,x}|^2 + |E_{in,y}|^2},$$

согласно которой сечение экстинкции пропорционально проекции на направление электрического вектора падающей волны амплитуды волны, рассеянной в направлении падения.

Сечение рассеяния  $S^{(sc)}$  вычисляется как интеграл потока мощности рассеянного излучения по всем углам уходящих от графенового квадрата плоских электромагнитных волн. При всех вычислениях контролировалось выполнение закона сохранения энергии в виде  $S^{(ex)} = S^{(ab)} + S^{(sc)}$ . Расчеты выполнены для реалистичных параметров структуры. Диэлектрические постоянные сред 1 и 2 полагались равными соответственно единице и 11.7 (SiC). Энергия уровня Ферми в графене принималась равной 150 мэВ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были рассчитаны спектры сечений экстинкции, поглощения и рассеяния ТГц волны при ее падении на графеновый квадрат. На всех

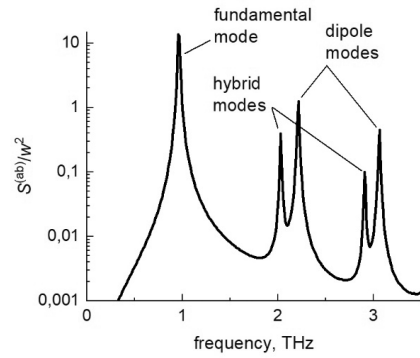


Рис. 1. Спектр нормированного сечения поглощения  $S^{(ab)}$  для графенового квадрата со стороной  $w = 10 \mu\text{m}$ .

рисунках ниже показаны сечение поглощения и суммарное сечение рассеяния (вперед плюс назад), нормированные на геометрическую площадь графенового квадрата.

Показано, что экстинкция, поглощение и рассеяние ТГц волны не зависят от поляризации электрического поля падающей волны вследствие симметрии структуры. Далее для более наглядной демонстрации физики исследуемых явлений положим, что электрическое поле падающей ТГц волны линейно поляризовано вдоль одной из сторон графенового квадрата (для определенности, вдоль  $x$ -направления).

На Рис. 1 представлен спектр сечения поглощения для основного и высших плазмонных резонансов. Видно, что для заданных параметров исследуемой структуры, сечение поглощения в основном плазмонном резонансе существенно превышает геометрическую площадь графенового квадрата.

Поглощение является основным механизмом экстинкции падающей волны, так как сечение суммарного рассеяния  $S^{(sc)}$ , как видно из Рис. 2, на порядок величины меньше сечения поглощения  $S^{(ab)}$ .

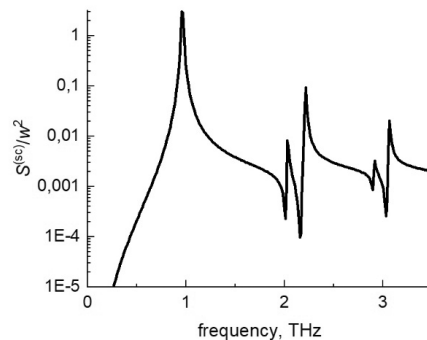
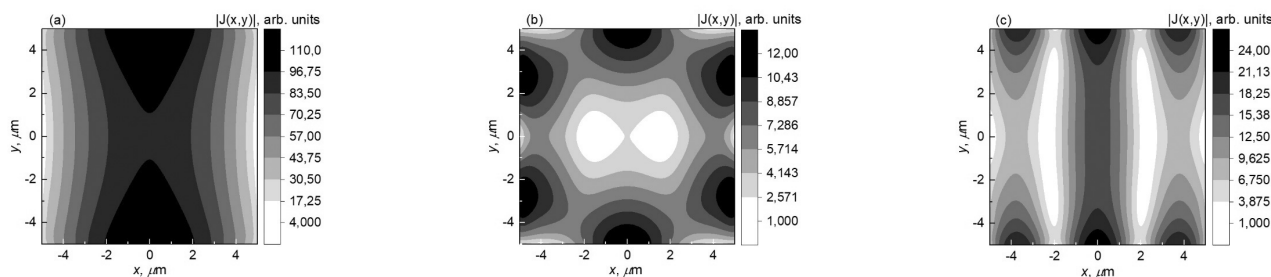


Рис. 2. Спектр нормированного сечения суммарного рассеяния  $S^{(sc)}$  для графенового квадрата со стороной  $w = 10 \mu\text{m}$ .





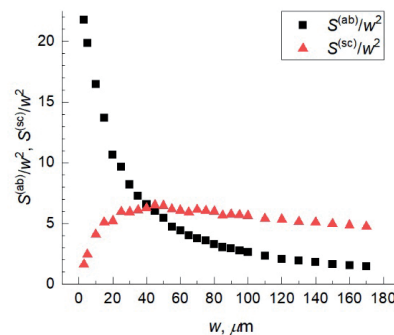
**Рис. 3.** Распределение модуля плотности полного (с компонентами по  $x$ - и  $y$ -координатам) индуцированного электрического тока в графеновом квадрате со стороной  $w = 10 \mu\text{m}$  в (a) основном плазмонном резонансе, (b) во втором по возрастанию частоты плазмонном резонансе, (c) в третьем по возрастанию частоты плазмонном резонансе.

Нечетные по порядку возрастания частоты плазмонные резонансы соответствуют возбуждению простых дипольных плазмонных мод, в которых колебания электрических зарядов в графеновом квадрате происходят преимущественно вдоль направления поляризации электрического поля падающей волны (вдоль  $x$ -координаты), см. Рис. 3a и 3c. Четные по порядку следования с ростом частоты плазмонные резонансы связаны с возбуждением гибридных плазмонных мод.

Колебания электрических зарядов в гибридных плазмонных модах происходят одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль  $x$ - и  $y$ -направлений), см. Рис. 3b. Важно отметить, что колебания электрических зарядов в гибридной моде в двух взаимно перпендикулярных направлениях имеют разную четность количества узлов стоячей волны плотности заряда. В направлении вдоль поляризации внешнего электрического поля имеется нечетное число узлов колебания плотности электрического заряда и соответственно четное число узлов колебания плотности электрического тока, тогда как в поперечном направлении имеется четное число узлов колебания электрических зарядов и соответственно нечетное число узлов колебания плотности электрического тока. Вследствие этого, гибридные плазмонные моды имеют меньший суммарный дипольный момент и поэтому слабее возбуждаются внешней ТГц волной по сравнению с простой дипольной модой. Гибридные моды возбуждаются в виде сателлитов простых дипольных плазмонных мод. Существование гибридных плазмонных мод связано с двумерной ограниченностью структуры. Эти моды не существуют в одномерно-неоднородных графеновых

структурах (например, в периодическом массиве графеновых микролент).

На Рис. 4 представлены зависимости сечения поглощения  $S^{(ab)}$  (квадраты) и сечения суммарного рассеяния  $S^{(sc)}$  (треугольники), рассчитанные на резонансной частоте основной плазмонной моды и нормированные на геометрическую площадь графенового квадрата, от длины стороны квадрата. Из Рис. 4 видно, что графеновый квадрат микронных размеров значительно сильнее поглощает ТГц излучение в плазмонном резонансе (резонансное сечение поглощения на порядок величины превосходит геометрическую площадь квадрата), чем рассеивает падающую волну. Последнее связано с дифракцией ТГц волны (с длиной волны сотни микрон), т.е., с огибанием ТГц волной рассеивателя микронного размера. В принципе, в сечение поглощения и в сечение рассеяния дают вклад как геометрический эффект, определяемый размером графенового квадрата, так и возбуждение плазмонного резонанса в графеновом квадрате. Для графеновых квадратов микронного размера преобладают резонансные эффекты (что приводит к значительному росту резонансного поглощения). С увеличением



**Рис. 4.** Зависимости нормированных величин сечения поглощения  $S^{(ab)}$  и сечения суммарного рассеяния  $S^{(sc)}$  от длины стороны графенового квадрата, рассчитанные на резонансной частоте основной плазмонной моды.

графенового квадрата уменьшается сила плазмонного резонанса, что приводит к уменьшению нормированной величины сечения поглощения  $S^{(ab)}$ . С другой стороны, с увеличением графенового квадрата дифракция перестает играть существенную роль и поэтому сечение рассеяния  $S^{(sc)}$  увеличивается, приобретая физический смысл отражения ТГц волны от поверхности графенового квадрата. Дальнейшее уменьшение сечения рассеяния (отражения) для больших квадратов на Рис. 4 объясняется уменьшением вклада резонансного отражения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе рассчитаны спектры экстинкции, поглощения и рассеяния ТГц волны при ее падении на графеновый квадрат. Показано, что поглощение является основным механизмом экстинкции падающей волны при микронных размерах графенового квадрата, для которого сечение поглощения на частоте основного плазмонного резонанса существенно превышает геометрическую площадь квадрата. Показана возможность возбуждения в графеновом квадрате как простых дипольных плазмонных мод, так и гибридных плазмонных мод, не существующих в одномерно-неоднородных графеновых структурах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Li X, Tao L, Chen Z, Fang H, Li X, Wang X, Zhu H. Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics. *Applied Physics Reviews*, 2017, 4(2):021306.
- Grigorenko AN, Polini M, Novoselov KS. Graphene plasmonics. *Nat Photonics*, 2012, 6:749-758.
- Geim AK, Novoselov KS. The rise of graphene. *Nature materials*, 2007, 6(3):183-191.
- Orlita M, Faugeras C, Plochocka P, Neugebauer P, Martinez G, Maude DK, Potemski M. Approaching the Dirac point in high-mobility multilayer epitaxial graphene. *Physical Review Letters*, 2008, 101(26):267601.
- Otsuji T, Watanabe T, El Moutaouakil A, Karasawa H, Komori T, Satou A, Suemitsu T, Suemitsu M, Sano E, Knap W, Ryzhi, V. Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano- and hetero-structures. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2011, 32:629-645.
- Koppens FH, Chang DE, Garcia de Abajo FJ. Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions. *Nano Letters*, 2011, 11(8):3370-3377.
- Gao W, Shi G, Jin Z, Shu J, Zhang Q, Vajtai R, Xu Q. Excitation and active control of propagating surface

- plasmon polaritons in graphene. *Nano Letters*, 2013, 13(8):3698-3702.
- Ryzhii V, Otsuji T, Shur M. Graphene based plasma-wave devices for terahertz applications. *Applied Physics Letters*, 2020, 116:140501.
- Shur M, Aizin G, Otsuji T, Ryzhii V. Plasmonic field-effect transistors (TeraFETs) for 6G communications. *Sensors*, 2021, 21(23):7907.
- Bludov YV, Ferreira A, Peres NMR, Vasilevskiy MI. A primer on surface plasmon-polaritons in graphene. *International Journal of Modern Physics B*, 2013, 27(10):1341001.
- Popov VV, Polischuk OV, Davoyan AR, Ryzhii V, Otsuji T, Shur MS. Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities. *Phys. Rev. B*, 2012, 86:195437.
- Polischuk OV, Melnikova VS, Popov VV. Giant cross-polarization conversion of terahertz radiation by plasmons in an active graphene metasurface. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(13):131101.
- Morozov MY, Popov VV, Fateev DV. Electrically controllable active plasmonic directional coupler of terahertz signal based on a periodical dual grating gate graphene structure. *Sci. Rep.*, 2021, 11:11431.
- Zarezin AM, Mylnikov D, Petrov AS, Svintsov D, Gusikhin PA, Kukushkin IV, Muravev VM. Plasmons in a square of two-dimensional electrons. *Physical Review B*, 2023, 107(7):075414.
- Falkovsky LA, Varlamov AA. Space-time dispersion of graphene conductivity. *The European Physical Journal B*, 2007, 56:281-284.
- Jang MS, Brar VW, Sherrott MC, Lopez JJ, Kim L, Kim S, Atwater HA. Tunable large resonant absorption in a midinfrared graphene Salisbury screen. *Physical Review B*, 2014, 90(16):165409.
- Fletcher CA, Fletcher CAJ. *Computational Galerkin methods*. Springer Berlin Heidelberg, 1984, pp. 72-85.
- Bohren CF, Huffman DR. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.

**Полищук Ольга Витальевна**

к.ф.-м.н.

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия  
E-mail: polischuk.sfir@mail.ru

**Фатеев Денис Васильевич**

к.ф.-м.н.

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия  
E-mail: fateevdv@yandex.ru

**Попов Вячеслав Валентинович**

д.ф.-м.н.

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
38, ул. Зелёная, Саратов 410019, Россия  
E-mail: glorvv@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.373

## Мультиплицирование дифракционных картин от плоских геометрических фрактальных объектов с использованием метода прореживания

Арзамасцева Г.В., Евтихов М.Г., Лисовский Ф.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fireras.su/>  
Фрязино 141120, Московская область, Российская Федерация

E-mail: [arzamastseva@mail.ru](mailto:arzamastseva@mail.ru), [emg20022002@mail.ru](mailto:emg20022002@mail.ru), [lisovsky.f@yandex.ru](mailto:lisovsky.f@yandex.ru)

Поступила 14.03.2024, рецензирована 20.03.2024, принята 24.03.2024

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

**Аннотация:** Описан алгоритм и изучены особенности мультиплицирования дифракционных картин (то есть спектров пространственных частот, как вычисленных, так и экспериментально полученных) от плоских фрактальных объектов методом прореживания. В качестве основного объекта использовался один подробно описанный и изученный авторами фрактал L-системы, что значительно облегчало интерпретацию полученных результатов.

**Ключевые слова:** бифрактал, мультиплицирование, дифракция, дифракционная картина, префрактал, прореживание, сеточная функция, спектр пространственных частот, фрактал L-системы, Фурье-образ

УДК 51.74; 535.4

*Для цитирования:* Арзамасцева Г.В., Евтихов М.Г., Лисовский Ф.В. Мультиплицирование дифракционных картин от плоских геометрических фрактальных объектов с использованием метода прореживания. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):373-380. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.373.

## Diffraction patterns multiplication from flat geometric fractal objects using the thinning method

Galina V. Arzamastseva, Mikhail G. Evtikhov, Fedor V. Lisovsky

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://fireras.su/>

Fryazino 141120, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: [arzamastseva@mail.ru](mailto:arzamastseva@mail.ru), [emg20022002@mail.ru](mailto:emg20022002@mail.ru), [lisovsky.f@yandex.ru](mailto:lisovsky.f@yandex.ru)

Received March 14, 2023, peer-reviewed March 20, 2023, accepted March 24, 2023

**Abstract:** An algorithm is described and the features of multiplying diffraction patterns (that is, spatial frequency spectra, both calculated and experimentally obtained) from flat fractal objects using the thinning method are studied. One fractal of the L-system, described in detail and studied by the authors, was used as the main object, which greatly facilitated the interpretation of the results obtained.

**Keywords:** bifractal, multiplication, diffraction, diffraction pattern, prefractal, thinning, grid function, spatial frequency spectrum, L-system fractal, Fourier image

UDC 51.74; 535.4

*For citation:* Galina V. Arzamastseva, Mikhail G. Evtikhov, Fedor V. Lisovsky. Diffraction patterns multiplication from flat geometric fractal objects using the thinning method. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):373-380e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.373.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (374)
  2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (375)
  3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (378)
- ЛИТЕРАТУРА (379)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] численным методом было проведено исследование мультиплицирования спектров пространственных частот при фраунгоферовой дифракции света на плоских прореженных фрактальных объектах, результаты которого были подтверждены экспериментально в работе [2]. Мультиплицирование отображается квадратной матрицей, транслируемым элементом которой является та часть спектра, которая соответствует фрактальной части дифракционной картины исходного "непрореженного" фрактала. Как показано впервые в работе [3], на дифрактограммах реальных фрактальных объектов можно выделить центральную фрактальную часть, обладающую свойством масштабирования, и периферическую часть, которая таковым не обладает. В данной работе численно и экспериментально исследуются условия, при которых происходит расширение транслируемого элемента за счет периферической части спектра исходного "непрореженного" фрактала.

Задача о мультиплицировании спектров пространственных частот плоских объектов родственна задаче о мультиплицировании изображений, успешное решение которой позволило реализовать технологию изготовления интегральных схем с однократной экспозицией [4,5], что привело к бурному развитию микроэлектроники. Необходимость решения первой задачи возникала значительно реже,

например, в системах многоканальной обработки и передачи данных. Наиболее известный к настоящему времени метод мультиплицирования спектров пространственных частот основан на использовании дискретизации двумерной функции с помощью квадратной решетки дельта функций, называемой также двумерной гребенчатой функцией, см., например, [6,7].

Сходная идея была использована в описанном нами численном методе [1], когда с помощью компьютера выполнялись все необходимые операции: создание черно-белых растровых изображений двумерных объектов, их оцифровка с использованием однородной сеточной функции периода  $d$  большим числом узлов (до  $4096 \times 4096$ ), обеспечивающим адекватное отображение наименьших деталей с габаритным размером  $l_{\min}$ , прореживание оцифрованного изображения до выбранной степени, расчет спектра пространственных частот разреженного объекта с помощью быстрого преобразования Фурье и получение итогового растрового изображения в виде квадратной решетки  $m \times m$ , транслируемым элементом которой является та часть спектра, которая соответствует фрактальной части дифракционной картины исходного непрореженного фрактала. Для отображения интенсивности спектральных составляющих на плоскости использовалась линейная шкала с различными уровнями серого<sup>1</sup>. Ранее авторами работы [11] было обнаружено, что соответствие вычисленных дифракционных картин наблюдаемым в экспериментах достигается при  $p \geq 4$ , где параметр  $p = l_{\min}/d$  определяется отношением габаритного размера наименьшего элемента к периоду сетки; данное условие соблюдалось при создании с помощью компьютера исследуемых фрактальных объектов.

Цель настоящей работы заключается в исследовании условий, при которых происходит расширение спектра частот в транслируемом элементе за счет периферической части спектра исходного непрореженного фрактала и сравнении получаемых численным методом спектров с наблюдаемыми в экспериментах при фраунгоферовой дифракции света на изображениях прореженных фракталов, переносимых на прозрачную пленку с помощью фотонаборного автомата высокого разрешения. Ранее подобное сравнение спектров было выполнено для многих "непрореженных" объектов, таких как фрактал Вичека, ковер Серпинского, снежинки Коха и др. В экспериментах использовался работающий на длине волны 0.63 мкм гелий-неоновый лазер, пучок света от которого с помощью системы из конфокальных линз коллимировался и расширялся до диаметра, превышающего поперечные размеры изображения фрактального объекта. Изображение дифракционной картины в плоскости дифракции можно было визуально наблюдать на экране, либо подвергать необходимой обработке с помощью сопряженного с компьютером цифрового фотоаппарата [11].

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным объектом исследования являлся подробно описанный в [1,12] фрактал  $L$ -системы [13,14] с затравочным множеством (аксиомой) в виде единичного черного квадрата (далее – фрактал  $1L$ ). Если этот квадрат на комплексной плоскости (с направлением вещественной и мнимой осей вниз и направо соответственно) поместить в начало координат так, как показано на Рис. 1а, то процесс конструирования этого фрактала может быть представлен в виде рекуррентных соотношений:

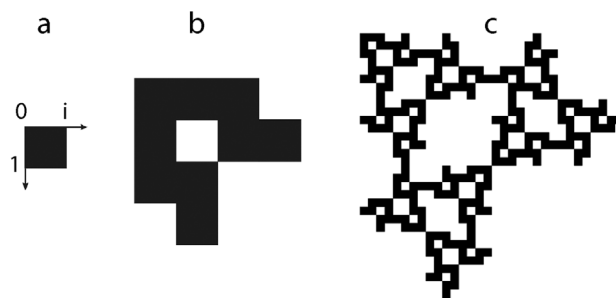


Рис. 1. Аксиома (а) и предфракталы 1-го (b) и 4-го (c) поколений для фрактала  $1L$ .

$$Z^{(n+1)} = Z^{(n)} \cup \left( iZ^{(n)} + (1+i)2^n \right) \cup \left( -iZ^{(n)} + (1+i)2^n \right) \quad (1)$$

где  $Z^{(0)}$  – затравочное множество (единичный черный квадрат), а символ  $\cup$  означает объединение множеств. Изображения предфракталов первого и четвертого поколения представлены на Рис. 1b и 1c.

Вычисленные и экспериментально полученные дифрактограммы для фрактала  $1L$  седьмого поколения приведены на Рис. 2 в трех разных масштабах.

Мультипликация спектров пространственных частот фракталов  $1L$  любого поколения становится возможной, если при сохранении правил конструирования (1) исходную аксиому (см. Рис. 1а) заменить единичным белым

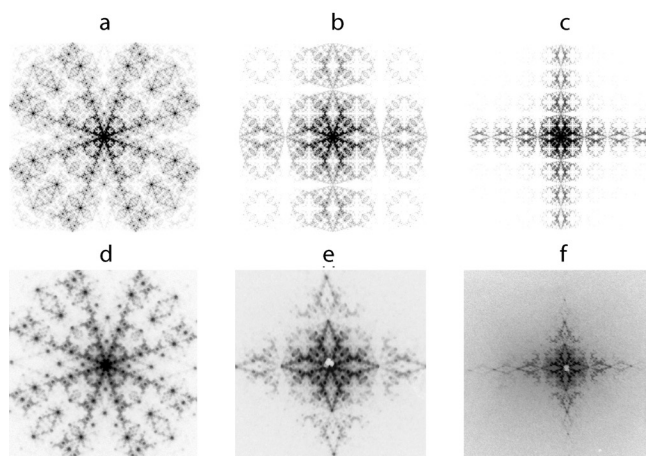
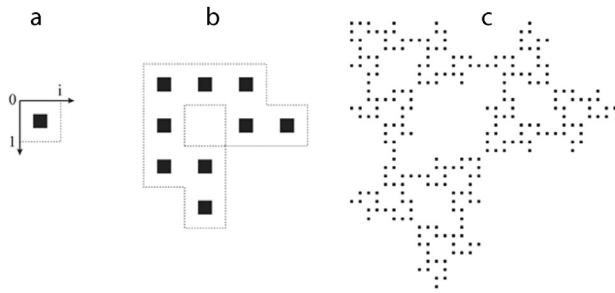


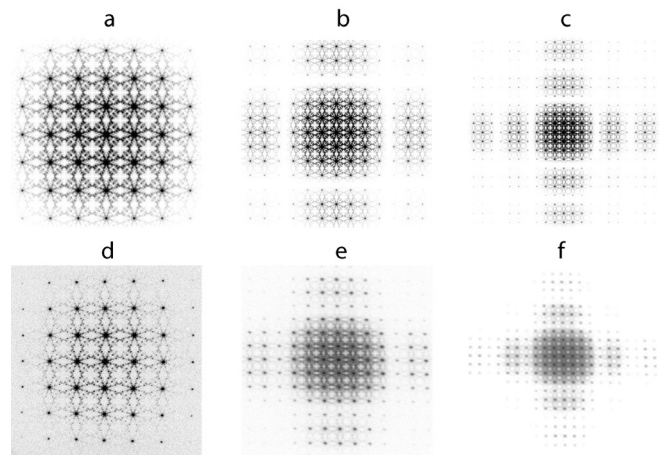
Рис. 2. Вычисленные (a,b,c) и экспериментально полученные (d,e,f) дифрактограммы для фрактала  $1L$  8-го поколения в трех разных масштабах: (a,d)-фрактальная часть (ближний план); (b,e)- средний план и (c,f)- дальний план.



**Рис. 3.** Аксиома (a) и разреженные предфракталы 1-го (b) и 4-го (c) поколений при  $q = 3$  для фрактала  $1L$ ,  $n = 1$ .

квадратом с расположенным в центре черным квадратом со стороной  $1/q$ , где  $q$  – любое положительное число, большее единицы (см. **Рис. 3a**). Замена аксиомы приводит к прореживанию фрактального множества. Чем больше  $q$ , тем более разреженным получается итоговый объект. На **Рис. 3b** и **Рис. 3c** показаны "разреженные" фракталы 1-го и 4-го поколения соответственно при  $q = 3$ .

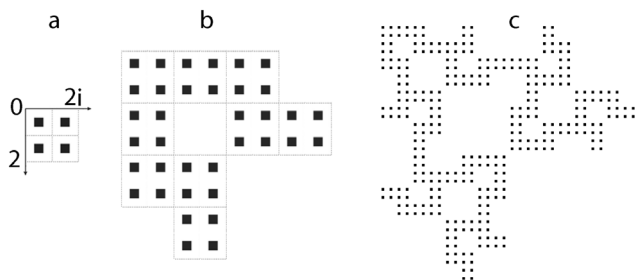
При таком алгоритме построения "разреженного" предфрактала его спектры пространственных частот (изображений разреженных предфракталов) имеют довольно сложную, зависящую от параметра  $q$  конфигурацию, в которой можно выделить центральную часть, представляющую из себя квадратную решетку  $m \times m$  из копий спектра фрактальной части исходного фрактала  $1L$ , обладающей самоподобием (см. **Рис. 2a** и **Рис. 4a**), и периферийную, образуемую удаленными от центральной части группами сателлитов, расположенными симметрично на исходящих из центра под прямым углом друг к другу четырех лучах. Заметим, что и эти группы составляют копии спектра фрактальной части исходного фрактала; фактически весь дифракционный спектр "промодулирован" в соответствии с фрактальной частью исходного фрактала. Наличие особенностей в спектре пространственных частот плоских фракталов обнаружили авторы работы [3], где они для обозначения центральной и периферийной частей использовали термины "фрактальная



**Рис. 4.** Вычисленные (a,b,c) при  $q = 3.67$  и экспериментально полученные (d,e,f) дифрактограммы для разреженного фрактала  $1L$  7-го поколения при  $n = 1$  в трех разных масштабах: (a,d) – центральная часть (ближний план); (b,e) – средний план и (c,f) – дальний план.

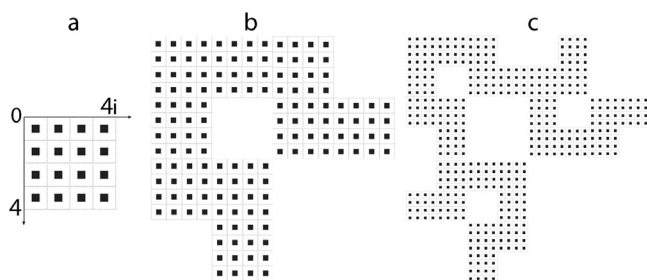
часть" и "решеточная часть" и связали появление последней с тем, что в двумерном множестве элементов, образующих фрактал, можно выделить одномерные дифракционные решетки, состоящие из одинаково ориентированных элементов. Число копий  $m \times m$  определяется степенью разреженности исходного фрактала, т.е., параметром  $q$ . Чем больше  $q$ , тем больше становится  $m$  [1,2].

На **Рис. 4** в трех разных масштабах приведены полученные численным методом спектры при  $q = 3.67$  (**Рис. 4a,b,c**) и экспериментальные спектры пространственных частот для "разреженного" фрактала  $1L$  (разрежение для компьютерных изображений соответствовало значению  $q = 3$ ) (**Рис. 4d,e,f**). При тщательном изучении экспериментальных дифракционных картин для "разреженных" фракталов было обнаружено, что они практически всегда имеют отличия в периферической части от получаемых численным методом. Визуальные наблюдения с микроскопом за напечатанными на фотонаборном автомате фрактальными структурами показали, что они являются более разреженными, чем исходные компьютерные с  $q = 3$  и реальное



**Рис. 5.** Аксиома (a) и разреженные предфракталы 1-го (b) и 3-го (c) поколений при  $q = 3$  для фрактала  $1L$ ,  $n = 2$ . значение  $q = 3.67$ . При использовании в вычислениях параметра  $q = 3.67$  отличия в экспериментальных и вычисленных дифрактограммах были устранены (см. Рис. 4).

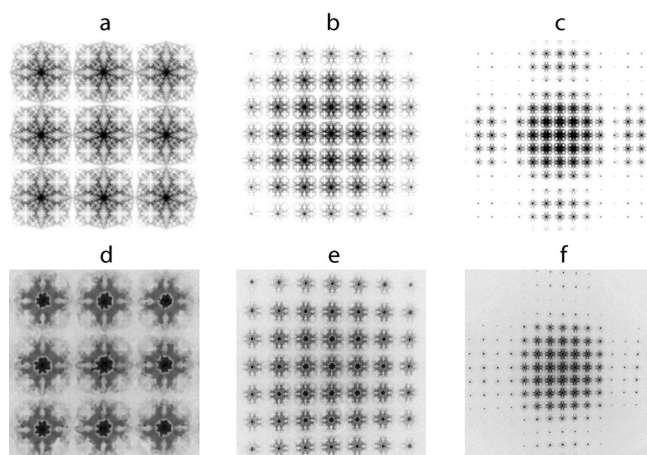
Изменение содержимого транслируемого элемента происходит при изменении алгоритма построения "прореженного" фрактала, а именно: при сохранении правил конструирования (1) исходная аксиома (см. Рис. 1a) заменяется решеткой  $n \times n$ , состоящей из единичных белых квадратов с расположенными в центре черными квадратами со стороной  $1/q$ , где  $q$  – любое положительное число, большее единицы (Рис. 3a). При этом построение, показанное на Рис. 3, будет соответствовать случаю  $n = 1$ . На Рис. 5a приведена такая решетка для случая  $n = 2$ ; на Рис. 5b и Рис. 5c показаны



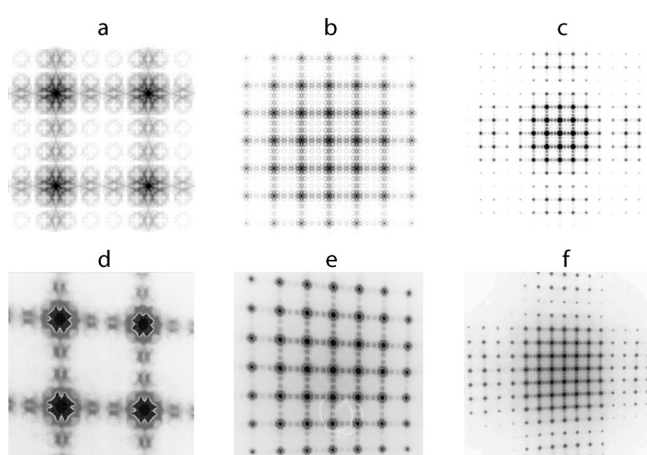
**Рис. 7.** Аксиома (a) и разреженные предфракталы 1-го (b) и 2-го (c) поколений при  $q = 3$  для фрактала  $1L$ ,  $n = 4$  "разреженные" фракталы 1-го и 3-го поколения соответственно при  $q = 3$ .

На Рис. 6 приведены в разных масштабах вычисленные (Рис. 6a,b,c) и экспериментально полученные (Рис. 6d,e,f) дифрактограммы для  $n = 2$ . В мелком масштабе (ближний план, Рис. 6a,d), видно, что содержимое транслируемых элементов расширяется по сравнению со случаем  $n = 1$  в два раза, тогда как в крупном (дальний план, Рис. 6c,f) дифракционная картина неплохо совпадает с таковой для случая  $n = 1$  (Рис. 4c,f).

Аналогичные построения при  $q = 3$  были выполнены для случаев  $n = 4$  (Рис. 7) и  $n = 8$  (Рис. 9). Соответствующие вычисленные дифрактограммы (также, как и для случая  $n = 1$ , была проведена коррекция  $q$ , т.е.  $q = 3.67$ ) приведены на Рис. 8a,b,c и Рис. 10(a,b,c), а экспериментально полученные – на



**Рис. 6.** Вычисленные (a,b,c) при  $q = 3.67$  и экспериментально полученные (d,e,f) дифрактограммы для разреженного фрактала  $1L$  6-го поколения при  $n = 2$  в трех разных масштабах: (a,d) – центральная часть (ближний план); (b,e) – средний план и (c,f) – дальний план.



**Рис. 8.** Вычисленные (a,b,c) при  $q = 3.67$  и экспериментально полученные (d,e,f) дифрактограммы для разреженного фрактала  $1L$  5-го поколения при  $n = 4$  в трех разных масштабах: (a,d) – центральная часть (ближний план); (b,e) – средний план и (c,f) – дальний план.

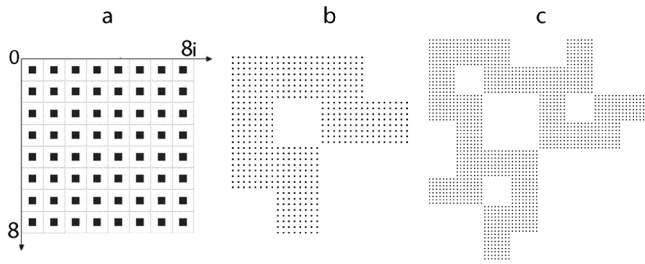


Рис. 9. Аксиома (a) и разреженные предфракталы 1-го (b) и 2-го (c) поколений при  $q = 3$  для фрактала  $1L$ ,  $n = 8$ .

Рис. 8(d,e,f) и Рис. 10(d,e,f). В обоих случаях в крупном масштабе (дальний план) дифрактограммы выглядят почти одинаково, так же, как и для случая  $n = 1$ . В мелком масштабе (ближний план) видно, что содержимое транслируемого элемента увеличивается при увеличении  $n$  и включает в себя все большую часть дифракционной картины исходного непрореженного фрактала. Во всех случаях наблюдается хорошее соответствие вычисленных (с коррекцией  $q$ ) и экспериментально полученных дифрактограмм. Однако для случаев  $n = 2, 4, 8$  периферические части на экспериментально полученных дифрактограммах (Рис. 6f, Рис. 8f и Рис. 10f) несколько хуже соответствуют вычисленным (Рис. 6c, Рис. 8c и Рис. 10c),

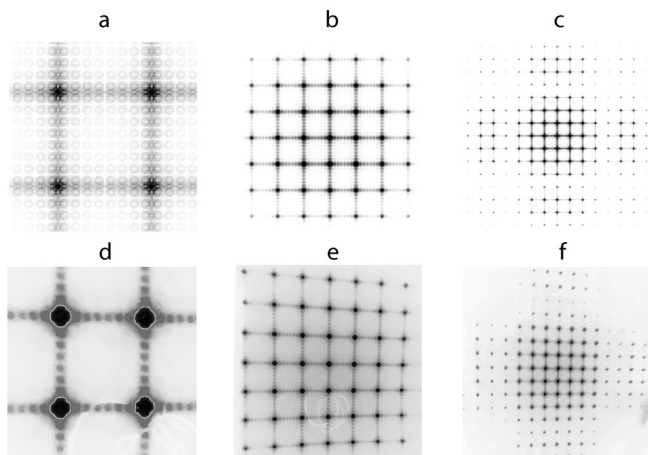


Рис. 10. Вычисленные (a,b,c) при  $q = 3.67$  и экспериментально полученные (d,e,f) дифрактограммы для разреженного фрактала  $1L$  4-го поколения при  $n = 8$  в трех разных масштабах: (a,d) – центральная часть (ближний план), (b,e) – средний план и (c,f) – дальний план.

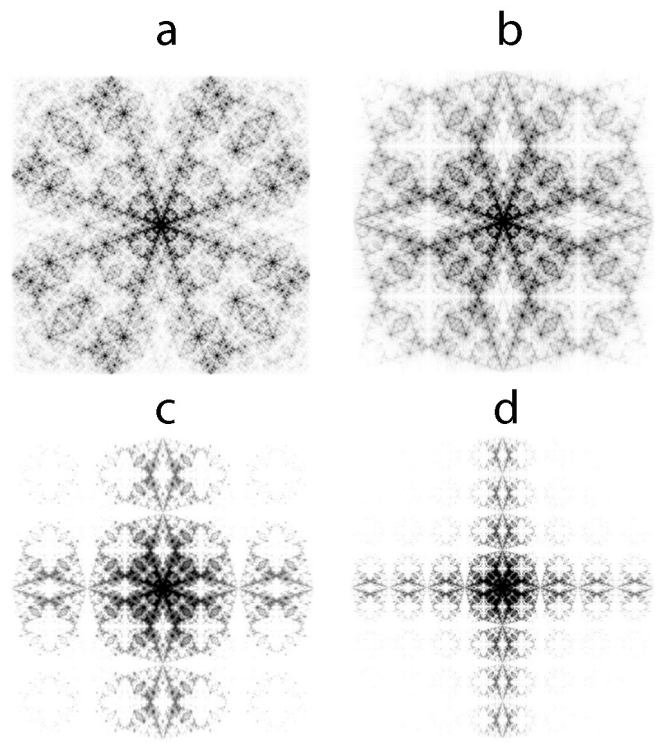


Рис. 11. Транслируемые элементы при  $n = 1$  (a),  $n = 2$  (b),  $n = 4$  (c) и  $n = 8$  (d).

чем для случая  $n = 1$ . Мы полагаем, что это связано с тем, что печать образцов для случаев  $n = 2, 4, 8$  проводилась спустя 5 лет после печати таковых с  $n = 1$  и фотонаборный автомат за это время отчасти изменил свои характеристики.

На Рис. 11a,b,c,d показаны соответствующие транслируемые элементы для случаев  $n = 1, 2, 4, 8$ . Видно, что при увеличении  $n$  в два раза содержимое транслируемого элемента возрастает также в 2 раза.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе численным методом и экспериментально исследовалось мультиплицирование дифракционных картин на "прореженных" фрактальных объектах.

Мультиплицирование происходило в случае замены наименьших элементов, образующих фрактал, на решетку  $n \times n$ , состоящую из единичных белых квадратов с расположенными в центре черными квадратами со стороной



$1/q$ , где  $q$  – любое положительное число, большее единицы. При таком алгоритме построения разреженного предфрактала его спектры пространственных частот имеют довольно сложную конфигурацию, в которой можно выделить центральную часть, представляющую из себя квадратную решетку  $m \times m$  из копий части спектра исходного неразрезанного фрактала и периферийную, образуемую удаленными от центральной части группами сателлитов, расположенными симметрично на исходящих из центра под прямым углом друг к другу четырех лучах и состоящими из тех же элементов трансляции. Как было показано ранее [1,2], число копий  $m \times m$  в центральной части и общий вид дифракционной картины определяются параметром  $q$ , причем с увеличением  $q$  возрастает число копий в центре  $m \times m$ . Содержимое транслируемой ячейки определяется числом  $n$ . При  $n = 1$  в качестве транслируемого элемента выступает фрактальная часть спектра исходного непрореженного фрактала. При увеличении  $n$  в 2, 4 и 8 раз происходит соответствующее расширение спектра в транслируемом элементе в 2, 4 и 8 раз. Эти элементы образуют не только центральную часть дифрактограммы, но и периферическую. При  $n = 8$  транслируемый элемент содержит практический полный спектр исходного "непрореженного" фрактала.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ. Компьютерное моделирование мультиплицирования фурье-спектров предфракталов  $L$ -системы. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2012, 17(12):29-32.
2. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Мансветова ЕГ. Мультиплицирование спектров пространственных частот

черно-белых изображений плоских фрактальных объектов. *Журнал радиоэлектроники*, 2018, 9:1-15.

3. Uozumi J, Kimura H, Asakura T. Fraunhofer diffraction by Koch fractals. *J. Mod. Optics*, 1990, 37(6):1011-1031.
4. Grove AS. *Physics and technology of semiconductor devices*. New York, John Wiley & Sons, 1967, 388 p.
5. Lu S. Generating multiple images for integrated circuits by Fourier-transform holograms. *Proc. IEEE*, 1968, 56(1):116-117.
6. Goodman JW. *Introduction to Fourier optics*. New York, McGraw Hill Book Co., 1968, 457 p.
7. Pratt WK. *Digital image processing*. New York, John Wiley & Sons, 2007, 738 p.
8. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Лукашенко ЛИ. Компьютерное моделирование дифракции света на фрактальных доменных структурах. *Тр. XIX Междунар. школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники"*, Москва, 2004, с. 632-634.
9. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Мансветова ЕГ, Темиряева МП. Аморфизация бипериодических доменных структур в квазиодноосных магнитных пленках критической толщины. *ЖЭТФ*, 2008, 134(2):282-290.
10. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Мансветова ЕГ. Фурье-образы фрактальных объектов. *Изв. РАН, Сер. физ.*, 2010, 74(10):1430-1432.
11. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Мансветова ЕГ. Дифракция света на фракталах: сопоставление данных экспериментов с получаемыми численными методами Фурье-образами изображений объектов. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2017, 9(2):221-229. DOI: 10.17725/rensit.2017.09.221.

12. Арзамасцева ГВ, Евтихов МГ, Лисовский ФВ, Мансветова ЕГ. Свойства плоских геометрических бифракталов. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2012, 4(2):93-107.
13. Linder Mayer A. Mathematical model for cellular interaction in development. I. Filaments with one-sided inputs. *J. Theor. Biol.*, 1968, 18(3):280-299.
14. Linder Mayer A. Mathematical model for cellular interaction in development. II. Simple and branching filaments with two-sided inputs. *J. Theor. Biol.*, 1968, 18(3):300-315.

**Арзамасцева Галина Васильевна**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Фрязино 141190, Московская область, Россия**

**E-mail: arzamastseva@mail.ru**

**Евтихов Михаил Георгиевич**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Фрязино 141190, Московская область, Россия**

**E-mail: emg20022002@mail.ru**

**Лисовский Федор Викторович**

*д.ф.-м.н., проф.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Фрязино 141190, Московская область, Россия**

**E-mail: lisovsky.f@yandex.ru.**

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.381

## Экспериментальные исследования акустического поля поперечных волн в модели биологической ткани

<sup>1</sup>Кравчук Д.А., <sup>1</sup>Чернов Н.Н., <sup>2</sup>Переселков С.А., <sup>1</sup>Михралиева А.И.

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, <https://www.sfedu.ru/>

Таганрог 347922, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, <https://www.vsu.ru/>

Воронеж 394006, Российская Федерация

E-mail: [kravchukda@sfedu.ru](mailto:kravchukda@sfedu.ru), [nchernov@sfedu.ru](mailto:nchernov@sfedu.ru), [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru), [mihralieva.amaliya@yandex.ru](mailto:mihralieva.amaliya@yandex.ru)

Поступила 08.04.2024, рецензирована 15.04.2024, принята 20.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Разработаны принципы проведения ультразвуковой диагностики при помощи технологии эластографии и представлена схема экспериментальной установки. Биологическая ткань смоделирована материалом силикон. Проведены исследования по определению продольной и поперечной составляющей скорости звука. Дальнейшие исследования позволят создать базу данных различных образцов патологических и здоровых тканей.

**Ключевые слова:** скорость звука, ультразвук, биологическая ткань, сжимаемость, импульс.

**УДК:** 534.8+57.087.1

*Для цитирования:* Кравчук Д.А., Чернов Н.Н., Переселков С.А., Михралиева А.И. Экспериментальные исследования акустического поля поперечных волн в модели биологической ткани. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):381-386. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.381.

## Transverse waves acoustic field experimental studies in a biological tissue model

Denis A. Kravchuk, Nikolay N. Chernov, Amaliya I. Mihralieva

Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Instrumentation  
<https://www.sfedu.ru/>

Taganrog 347922, Russian Federation

E-mail: [kravchukda@sfedu.ru](mailto:kravchukda@sfedu.ru), [nchernov@sfedu.ru](mailto:nchernov@sfedu.ru), [mihralieva.amaliya@yandex.ru](mailto:mihralieva.amaliya@yandex.ru)

Sergey A. Pereselkov

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

E-mail: [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru)

Received April 08, 2023, peer-reviewed April 15, 2023, accepted April 20, 2023

**Abstract:** This article develops the ultrasound diagnostics principles using elastography technology and presents the experimental setup diagram. Biological tissue is modeled using silicone material. Research has been carried out and the longitudinal and transverse sound speeds have been determined. Further research will create a database of pathological and healthy tissues various samples.

**Keywords:** sound speed, ultrasound, biological tissue, compressibility, impulse

PACS 43.35.Yb

*For citation:* Denis A. Kravchuk., Nikolay N. Chernov, Sergey A. Pereselkov, Amaliya I. Mihralieva. Transverse waves acoustic field experimental studies in a biological tissue model. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(4):381-386e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.381

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (382)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (383)
3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА (384)
4. РЕЗУЛЬТАТЫ (384)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (385)

## ЛИТЕРАТУРА (385)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Биологическая ткань часто описывается с точки зрения ее структурных и материальных свойств. Структурные свойства характеризуют ткань в ее неповрежденном виде. Важные структурные свойства представляются отношением между силой и деформацией, или напряжением и деформацией, и должны быть поняты, чтобы предсказать, как ткань будет вести себя *in vivo* [1].

Под механическими свойствами биологических тканей понимают две их разновидности [2]. Как технический объект биологическая ткань – это композиционный материал, он образован объемным сочетанием химически разнородных компонентов. Механические свойства биологической ткани отличаются от механических свойств каждого компонента, взятого в отдельности. Методы определения механических свойств биологических тканей аналогичны методам определения этих свойств у технических материалов.

Жесткость материала представляет собой способность материала сопротивляться деформации. Жесткость обычно характеризуется наклоном линейной области кривой напряжение-деформация, также называемой модулем

Юнга при испытании на растяжение. В зависимости от типа нагрузки могут существовать различные типы модулей (например, модуль сдвига, модуль сжатия). Чем больше жесткость, тем больше сила, необходимая для возникновения заданной деформации. Если напряжение в материале прямо пропорционально деформации для деформаций до предела упругости, материал называется материалом Гука.

Биологические ткани являются вязкоупругими материалами; их поведение является одновременно вязким, то есть зависящим от времени и истории, а также эластичным. Вязкоупругий материал обладает характеристиками релаксации напряжений, ползучести, чувствительности к скорости деформации и гистерезиса.

Объемный модуль упругости, который влияет на распространение ультразвука, практически однороден в различных биологических тканях и не зависит от эластичности тканей [3]. Эластография, развитие которой началось около 20 лет назад, направлена на визуализацию жесткости (или упругости) тканей, что дает дополнительную и клинически значимую информацию. Отображение жесткости может быть оценено либо из анализа деформации в ткани под напряжением (квазистатические методы), либо путем визуализации сдвиговых волн, механических волн, распространение которых определяется жесткостью ткани, а не ее объемным модулем.

Целью работы является разработка биотехнической системы для эластографии и проведение экспериментальных исследований скорости звука.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На Рис. 1 изображена схема принципа проведения ультразвуковой диагностики при помощи технологии эластографии.

Генератор УЗ волн порождает сигнал с определенными частотными характеристиками для того, чтобы можно было оценить относительную деформацию изучаемых тканей (упругость) на основе величины модуля Юнга. Этот сигнал будет передан на излучатель.

Излучатель получает сигнал от генератора и преобразует его в ультразвуковую волну, направляемую непосредственно в исследуемую область (область интереса).

Зона интереса – орган пациента, который необходимо обследовать.

Квазистатическое воздействие (компрессия) воздействует на изучаемую ткань, чтобы можно было оценить ее относительную степень упругости (измерения делают при разной компрессии, чтобы оценить относительную деформацию тканей).

Приемник – устройство для получения отраженных сигналов (эхосигналов).

Усилитель сигнала – необходим, чтобы усилить полученный с приемника сигнал перед дальнейшей обработкой. Блоки "Приемник" и "Усилитель" восприимчивы к слабому эхосигналу, но перед дальнейшей работой сигнал необходимо усилить.

Блок фильтрации – убирает из сигнала большую часть шумов, которые неизбежно появляются на этапах работы "Приемника" и "Усилителя". Затем улучшенный сигнал попадает в следующий блок.

АЦП (анало-цифровой преобразователь) – устройство, преобразующее аналоговый сигнал в цифровой. АЦП необходим, т.к. последующие блоки работают с цифровым сигналом.

Блок обработки и анализа сигнала – получает сигнал от АЦП. Во время обработки и анализа сигнала должны быть получены данные в удобном виде для хранения и дальнейшей работы с ними.

Эластографическая картина исследуемой области составляется на основе многих измерений с разной степенью компрессии участков ткани. Составление эластографической картины происходит за счет данных о распределении деформации в зоне интереса. Эти данные хранит блок накопления результатов и составления эластографической картины. Визуальное представление эластографической картины происходит за счет раскраски картины изучаемой области. Как правило используются разные цвета (или оттенки) для маркировки упругости тканей в исследуемой зоне.

Монитор – выводит полученное изображение, являясь устройством оперативной визуальной связи пользователя с устройством. Врач-эксперт – контактирует с пациентом и аппаратом, проводит ультразвуковое исследование, анализирует увиденные результаты. Экспертное заключение составляет "Врач-эксперт" на основе полученной картины исследуемой области. ЭМК (электронная медицинская карта) – заносятся результаты проведенного обследования, диагноз.

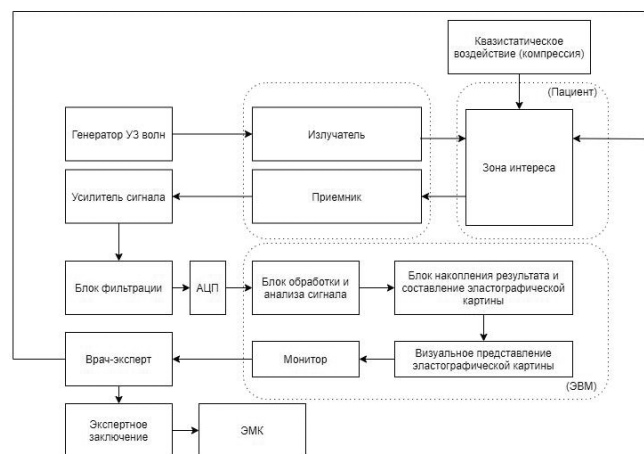


Рис. 1. Структурная схема эластографии.

### 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

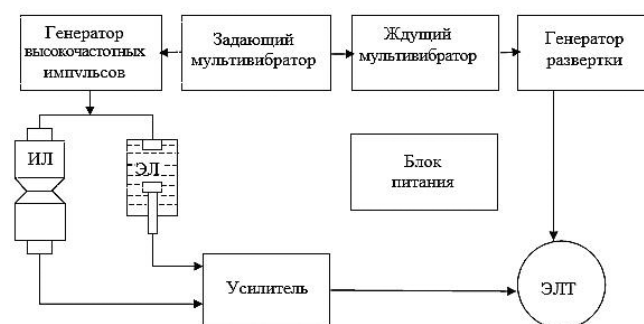
Измерение скорости упругих волн в образцах модели биоткани проводилось на установке УЗИС ЛЭТИ, принцип измерения которой основан на сравнении времени прохождения ультразвуковых импульсов в исследуемом образце и в эталонной жидкости с известной скоростью ультразвука.

Структурная схема УЗИС ЛЭТИ [4] и временная диаграмма электрических сигналов показаны на **Рис. 2**.

Задающий мультивибратор генерирует прямоугольные импульсы переменной длительности с частотой повторения около 500 Гц.

Передний фронт этих импульсов запускает генератор высокочастотных сигналов. Вырабатываемый генератором сигнал одновременно возбуждает ультразвуковые колебания излучающих пьезопластин жидкостной эталонной (ЭЛ) и измерительной (ИЛ) линий.

На экране осциллографа наблюдаются два импульса: импульс, прошедший через жидкостную эталонную линию, и импульс, прошедший через измерительную линию. При совмещении импульсов, делают два отсчета, первый – без образца в измерительной линии ( $n_1$ ), второй – с образцом ( $n_2$ ). Таким образом, время прохождения ультразвукового импульса в образце будет равно времени прохождения импульса в столбе эталонной жидкости высотой ( $n_2 - n_1$ ):



**Рис. 2.** Структурная схема УЗИС ЛЭТИ

$$t = \frac{l}{v} = \frac{n_1 - n_2}{v_w}, \quad (1)$$

где  $v_w$  – скорость ультразвука в эталонной жидкости;  $l$  – длина образца;  $v$  – искомая скорость ультразвука в образце. Тогда:

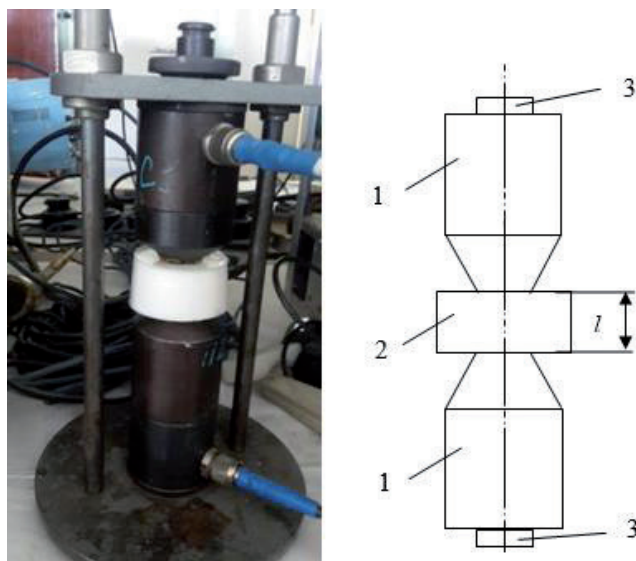
$$v = v_w \frac{l}{n_2 - n_1}. \quad (2)$$

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На **Рис. 3** показана экспериментальная установка. Моделью биоткани служил образец силикона. На **Рис. 4а,б** приведены экспериментально полученные осциллограммы импульсов, прошедшие через жидкостную эталонную линию и через измерительную линию, соответственно.

Измерительная линия как на **Рис. 4** представляет собой два цилиндрических стержня из титана 1, которые используются как постоянные ультразвуковые линии задержки.

Верхний стержень может перемещаться вертикально, при этом оставаясь с нижним стержнем соосным. Образец подлежащий исследованиям 2, который имеет форму короткого цилиндра, располагают между двумя титановыми стержнями 1, к торцам стержней 1 приклеены пьезопластины 3.



**Рис. 3.** Экспериментальная установка.

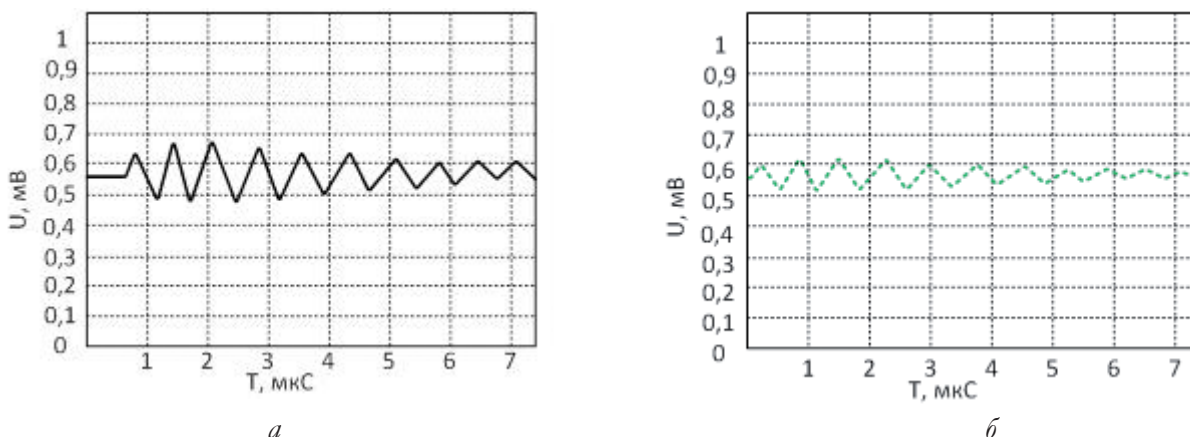


Рис. 4. а) Импульс, прошедший через жидкостную эталонную линию. б) Импульс, прошедший через измерительную линию.

Необходима длина образца такая, чтобы время прохождения ультразвукового импульса в нем было больше длительности самого импульса.

Данное исследование позволило измерить скорость распространения продольных и поперечных упругих волн в модельном образце силикона, который в данном эксперименте заменял биологические ткани.

Полученное в результате эксперимента значение продольной скорости звука составило

$$v = \frac{10}{(16.06 + 5.26)} 1590 = 1472 \text{ м/с.}$$

Экспериментальное значение 1472 м/с количественно совпадает с приведенным в справочном материале значением продольной скорости звука в силиконе 1485 м/с [5].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если и дальше проводить измерения скорости распространения поперечных упругих волн в биологических тканях, в различных образцах патологических и здоровых тканей, то можно создать базу данных эталонных значений скоростей прохождения ультразвуковых волн, которая может быть использована для ранней диагностики различных патологий [6-9]. В настоящей работе измерена

скорость распространения продольных и поперечных упругих волн в биологических тканях. Если и дальше проводить измерения скорости распространения поперечных упругих волн в биологических тканях в различных образцах патологических и здоровых тканях, можно создать базу данных эталонных значений скоростей прохождения ультразвуковых волн, которая может быть использована для ранней диагностики различных патологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pal S. *Design of Artificial Human Joints & Organs, Ch. 2*. Springer Science+Business Media, New York, 2014. DOI 10.1007/978-1-4614-6255-2\_2.
2. Березовский ВА, Колотилов НН. *Биофизические характеристики тканей человека. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1990, 224 с.
3. Sarvazyan AP, Skovoroda AR, Emelianov SY, Fowlkes JB, Pipe JG, Adler RS, Buxton RB, Carson PL. Biophysical bases of elasticity imaging. *Acoustical imaging*, 1995, 21:223-240.
4. Шукейло ЮА, Степанов СК, Белова ЕЮ, Липьяйнен ТС, Лысков АИ. *Методы определения механических свойств материалов*. СПб, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2017, 32 с.

5. Material Sound Velocities [электронный ресурс]; <https://www.olympus-ims.com/ru/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/> (дата доступа 28.05.2020).
6. Руденко ОВ, Сафонов ДВ, Рыхтик ПИ, Гурбатов СН, Романов СВ. Физические основы эластографии. Часть 1. Компрессионная эластография. *Радиология – практика*, 2014, 46(3):41-50 с.
7. Руденко ОВ, Сафонов ДВ, Рыхтик ПИ, Гурбатов СН, Романов СВ. Физические основы эластографии. Часть 2. Эластография на сдвиговой волне. *Радиология – практика*, 2014, 46(4):62-72.
8. Михралиева АИ, Заграй НП, Чернов НН, Аль-Саман АХ. Определение упругих свойств биологических слоистых сред на основе нелинейного взаимодействия акустических волн. *Инженерный вестник Дона*, 2016, 42(3):13.
9. Михралиева АИ, Карстин ВА, Заграй НП, Чернов НН. Исследование распространения поперечных упругих волн в биологических тканях. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2018, 6(4):53-60.

**Кравчук Денис Александрович**

*д.т.н.*

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения  
2/Е, ул. Шевченко, г. Таганрог 347922, Россия

**E-mail: kravchukda@sfedu.ru**

**Чернов Николай Николаевич**

*д.т.н.*

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения  
2/Е, ул. Шевченко, г. Таганрог 347922, Россия

**E-mail: nnchernov@sfedu.ru**

**Переселков Сергей Алексеевич**

*д.ф.-м.н.*

Воронежский государственный университет  
1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

**E-mail: pereselkov@yandex.ru**

**Михралиева Амалия Исмиевна**

*аспирант*

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения  
2/Е, ул. Шевченко, г. Таганрог 347922, Россия

**E-mail: mihralieva.amalya@yandex.ru.**



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.387

## Электрофизические и температурные характеристики

### тонких слоёв квантовых точек $\text{Ag}_2\text{S}$

Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, <https://cfuv.ru/>

Симферополь 295007, Российская Федерация

E-mail: [mazinovas@cfuv.ru](mailto:mazinovas@cfuv.ru), [tyutyunikas@mail.ru](mailto:tyutyunikas@mail.ru), [gurchenko\\_v@mail.ru](mailto:gurchenko_v@mail.ru)

Поступила 02.05.2024, рецензирована 06.05.2024, принята 09.05.2024

Представлена действительным членом РАЕН С.П. Губиным

**Аннотация:** В работе представлено исследование электрофизических свойств тонких плёнок коллоидных квантовых точек сульфида серебра ( $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$ ) и квантовых точек сульфида серебра, декорированных плазмонными наночастицами золота ( $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2/\text{Au}$ ). Проведено исследование температурных зависимостей проводимости в диапазоне температур от 300 до 360 К. Были получены значения энергии активации из линейных аппроксимаций вольт-амперных характеристик в координатах Аррениуса. Показано, что декорирование  $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$  плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещенной зоны с 0.29 до 0.89 эВ. В работе рассчитан фактор идеальности и определены основные механизмы проводимости представленных тонкоплёночных структур. Показано, что декорирование  $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$  наночастицами Au приводит к изменению типа проводимости. Согласно модели Мотта-Герни рассчитана подвижности носителей заряда.

**Ключевые слова:** квантовые точки, сульфид серебра, энергия активации, подвижность носителей заряда

УДК 537.312.6, 538.935, 53.096

**Благодарности:** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-10007 и региона Крым.

**Для цитирования:** Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С. Электрофизические и температурные характеристики тонких слоёв квантовых точек  $\text{Ag}_2\text{S}$ . РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):387-394. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.387.

## Electrophysical and temperature characteristics of $\text{Ag}_2\text{S}$

### quantum dots thin layers

Alim S. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, <https://cfuv.ru/>

Simferopol 295007, Russian Federation

E-mail: [mazinovas@cfuv.ru](mailto:mazinovas@cfuv.ru), [tyutyunikas@mail.ru](mailto:tyutyunikas@mail.ru), [gurchenko\\_v@mail.ru](mailto:gurchenko_v@mail.ru)

Received May 02, 2024, peer-reviewed May 06, 2024, accepted May 09, 2024

**Abstract:** This paper presents a study of the electrical properties of colloidal silver sulfide quantum dots thin films ( $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$  QDs) and silver sulfide quantum dots decorated with Au plasmon nanoparticles ( $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2/\text{Au}$  QDs). A study of the conductivity temperature dependences was carried out in the temperature range from 300 to 360 K. The activation energy values were obtained from linear approximations of the current-voltage characteristics in Arrhenius coordinates. It has been shown that decorating  $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$  QDs with Au plasmon nanoparticles leads to an increase in the band gap from 0.29 to 0.89 eV. In this work, the ideality factor is calculated and the main conductivity mechanisms of the presented thin-film structures are determined. It has been shown that decorating  $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$  QDs with Au plasmon nanoparticles leads to a change in the conductivity type. According to the Mott-Gurney model, the charge carriers mobility is calculated.

*Keywords:* quantum dots, silver sulfide, activation energy, charge carrier mobility

UDC 537.312.6, 538.935, 53.096

*Acknowledgments:* This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-22-10007 and Crimea region.

*For citation:* Alim S. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko. Electrophysical and temperature characteristics of  $\text{Ag}_2\text{S}$  quantum dots thin layers. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3)387-394e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.387.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (388)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (389)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (389)
  - 3.1. РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ (389)
  - 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРОВОДИМОСТИ (391)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (392)

## ЛИТЕРАТУРА (393)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследователи уделяют большое внимание свойствам наноструктур, реализованных на базе полупроводниковых коллоидных квантовых точек (КТ). Особый интерес вызывают новые структурные, электрические и оптические свойства, полученные посредством включения проводящих и полупроводниковых наноматериалов в структуру КТ [1-4]. Наряду с этим интерес к коллоидным КТ обусловлен квантово-размерным эффектом, который определяет уникальные свойства квантовых точек. В частности, изменение размера КТ позволяет управлять положением пиков фотолюминесценции [5,6]. Как следствие коллоидные квантовые точки выступают в качестве активных элементов нового поколения фотодетекторов [3], ИК сенсоров [7], солнечных элементов [8,9], фототранзисторов [4]. При этом использование коллоидных растворов КТ позволяет получить необходимые для приложений тонкие плёнки такими методами как спин-коатинг, дип-коатинг, технология Лэнгмюра-Блоджетт и т.п. [3,4,9].

Полупроводниковые коллоидные КТ сульфида серебра ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) являются перспективными материалами с точки зрения их использования в качестве активных слоёв в современной электронике [9-11]. Преимуществом использования квантовых точек на основе

сульфида серебра является его малая токсичность и высокая эффективность. Квантовые точки  $\text{Ag}_2\text{S}$  характеризуются высоким коэффициентом поглощения и излучения электромагнитной энергии, высокой химической стабильностью и шириной запрещенной зоны порядка 0.9-1.1 эВ [12,13]. Исследователями было показано, что изменение размера частиц сульфида серебра позволяет варьировать ширину запрещенной зоны. Уменьшение среднего размера наночастиц  $\text{Ag}_2\text{S}$  с  $\sim 500$  нм до  $\sim 60$  нм приводит к увеличению ширины запрещенной зоны  $E_g$  с 0.88 до 1.21 эВ, что может быть использовано в устройствах фотовольтаики [14]. Также установлено существенное влияние размерного эффекта и химической структуры на транспорт носителей заряда. В частности, квантово-размерный эффект проявляется в виде закономерностей в процессах возбуждения и распада экситонов [8]. Достижение высоких значений подвижности носителей заряда также тесно связано с выбором поверхностного лиганда КТ, в том числе с использованием плазмонных наночастиц [6,9,12]. Однако исследования процессов переноса заряда коллоидных квантовых точек в литературе встречаются крайне редко. Отметим, что исследование КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  в основном посвящены люминесцентным, оптическим и фотокаталитическим свойствам, тогда как исследования механизмов образования и распада экситонов и механизмов проводимости в таких структурах являются актуальными и исследованы не в полной мере.

Данная работа направлена на исследование проявлений плазмон-экситонных взаимодействий при температурном воздействии для сэндвич структур и посвящена исследованию электрофизических свойств тонких плёнок КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$ , покрытых молекулами (3-меркаптопропил)-триметоксисилана (МРТМС), а также

декорированных сферическими наночастицами Au (НЧ Au). Работа направлена на исследование механизмов проводимости коллоидных КТ Ag<sub>2</sub>S. Представленные здесь материалы являются развитием исследований электрофизических параметров сэндвич структур на основе плёнок КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au, о которых нами сообщалось ранее [15].

**2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Объектами исследований служили коллоидные квантовые точки Ag<sub>2</sub>S, приготовленные методами водного синтеза [15,16]. Методика синтеза коллоидных квантовых точек Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> заключалась в смешивании водных растворов нитрата серебра (AgNO<sub>3</sub>) и (3-меркаптопропил)-триметоксисилана (МРТМС) в молярном соотношении 1:2 при рН 10. Далее в реакционную смесь добавляли водный раствор сульфида натрия (Na<sub>2</sub>S) в молярном соотношении к AgNO<sub>3</sub> – 0.6:1.

Методика синтеза коллоидных квантовых точек Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>, декорированных на поверхности плазмонными НЧ Au заключалась в следующем. Отдельно были синтезированы плазмонные НЧ Au средним размером ~2-3 нм. Наночастицы золота были получены в ходе реакции восстановления золотохлорводородной кислоты (HAuCl<sub>4</sub> 1 мМ) водным раствором боргидрида натрия (NaBH<sub>4</sub> 0.2 мМ) в присутствии цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ 40 мМ) [17,18]. Декорирование поверхности КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> плазмонными НЧ Au осуществляли путем дополнительной функционализации интерфейсов КТ аминоклассами. В частности,

производили внесение этанольного раствора (3-аминопропил)-триметоксисилана (АРТМС) в коллоидный раствор КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>. Далее осуществляли смешивание коллоидных растворов НЧ Au и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> в соотношении ~ 6:1 соответственно (далее КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au) [17,18].

Формирование тонких плёнок КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au осуществляли методом полива на проводящие подложки [19]. Исследование электрических параметров тонких плёнок квантовых точек было реализовано путем формирования сэндвич-структур Al-Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>-ITO и Al-Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au-ITO (рис. 1) [20]. Проводящие подложки алюминия и оксида индия-олова (ITO), были получены методом магнетронного напыления. Удельное сопротивление ITO составляло 16-18 Ом/кв, в свою очередь сопротивление алюминия - 20 Ом/кв. Исходный раствор исследуемых материалов в объёме 0.4 мл наносился на поверхность подложек, геометрические параметры которых составляли – 10×10 мм.

Проводящие свойства, в том числе температурные зависимости проводимости исследуемых структур измерялись при помощи анализатора полупроводников Keysight B1500A. Исследование проводящих свойств осуществлялось посредством анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения проводились в диапазоне напряжений от -1 до 1 В. Исследование температурных зависимостей реализовано при помощи экранированной камеры (клетка Фарадея), помещённой в муфельную печь. Температурный диапазон составлял от 300 до 360 К.

**3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

**3.1. РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ**

В ходе проведения температурных измерений, в условиях прикладываемого к исследуемому образцу электрического поля малой напряжённости ( $E < 10^2$  В/см), было обнаружено, что температурная зависимость проводимости подчиняется известному экспоненциальному закону [21]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_a}{2kT}}, \tag{1}$$

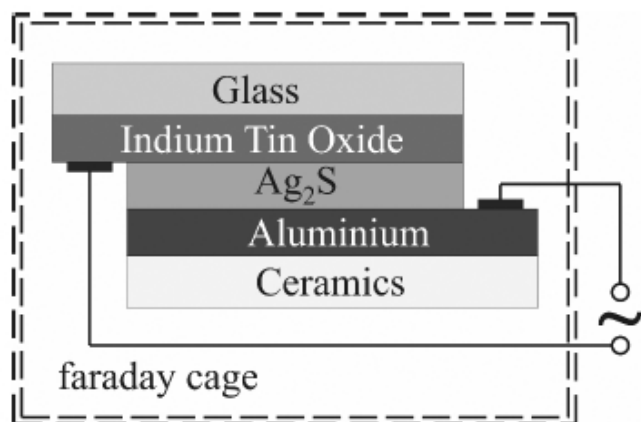


Рис. 1. Схема сэндвич-структуры в измерительной камере.

где  $E_a$  - энергия активации,  $\sigma$  - электропроводность исследуемого материала,  $k$  - постоянная Больцмана. Энергия активации в таком случае равна:

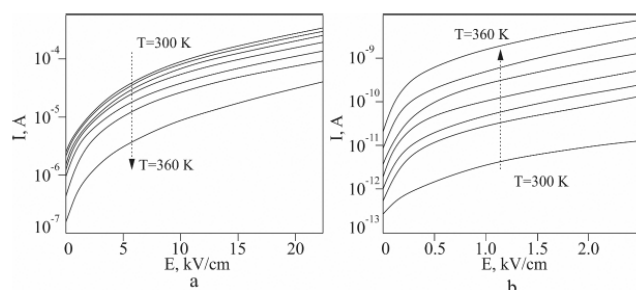
$$E_a = \frac{2kT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (2)$$

где  $T_1, T_2$  - начальная и конечная температуры соответственно;  $\sigma_0$  и  $\sigma$  - электропроводности исследуемого материала при начальной и конечной температуре.

Таким образом, для тонкопленочных коллоидных квантовых точек значение энергии активации составило: КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  - 0.3 эВ и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  - 0.87 эВ. Отметим, что декорирование КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещённой зоны.

Рассмотрим далее электрофизические свойства исследуемых тонкопленочных структур КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  в области более высоких приложенных полей ( $E > 10^2$  В/см). На **Рис. 2** представлены вольт-амперные характеристики в температурном диапазоне (ВАХТ) плёнок  $\text{Ag}_2\text{S}$ , сформированных в виде сэндвич структуры ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al и ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al. Отметим, что для КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  наблюдается уменьшение проводимости при увеличении температуры (Рис. 2а). В свою очередь при возрастании температуры проводимость КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  увеличивается, что может быть связано с тепловым возбуждением носителей заряда и обусловлено проявлением плазмон-экситонного взаимодействия в системе КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  (Рис. 2б).

Ранее нами было показано, что при температуре 300 К коллоидные КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  имеют ВАХ близкую к линейной, что определяется омической проводимостью этой



**Рис. 2.** ВАХТ тонкопленочных КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  - (а) и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  - (б).

структуры [15]. Воздействие электромагнитным излучением видимого диапазона приводит к нелинейности ВАХ и изменению типа проводимости сэндвич структуры с омического на барьерный [15].

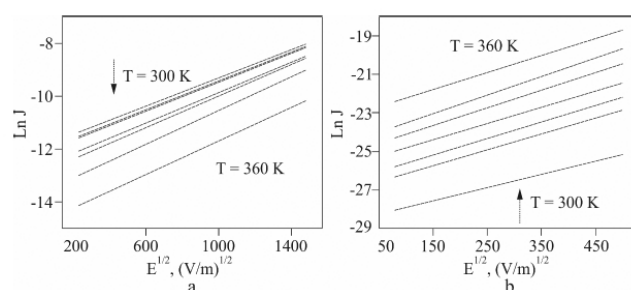
В данной работе мы наблюдаем схожее проявление изменения типа проводимости сэндвич структуры ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al. Аналогично предыдущим исследованиям, при температуре 300 К наблюдается идентичная, практически линейная ВАХ, однако при нагреве структуры прослеживается увеличение нелинейности характеристики. Нелинейная ВАХ указывает на формирование барьерной структуры, в которой протекающий ток определяется инжекцией носителей заряда через барьер. Поэтому можно заключить, что в сэндвич структуре ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al также возникает барьер Шоттки на границе контакта Al- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ , аналогично структуре ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al. Механизм проводимости по типу эмиссии Шоттки [22, 23] и описывается уравнением (3):

$$J = A^* T^2 \exp \left\{ \frac{-e \left[ \varphi_b - \sqrt{eE / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0)} \right]}{kT} \right\}, \quad (3)$$

где  $J$  - плотность тока;  $A^*$  - эффективная константа Ричардсона ( $m$  - эффективная масса носителей заряда;  $h$  - постоянная Планка);  $T$  - абсолютная температура;  $e$  - заряд электрона;  $\varphi_b$  - высота барьера Шоттки;  $E$  - напряжённость электрического поля;  $\epsilon_r$  - динамическая диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная;  $k$  - постоянная Больцмана.

$$A^* = 4\pi e m^* k^2 / h^3. \quad (4)$$

Для определения механизма проводимости, построим ВАХТ в координатах Шоттки  $\ln J(\sqrt{E})$  (Рис. 3) [24,25]. Наклон линейных



**Рис. 3.** ВАХТ в координатах Шоттки КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  - (а) и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  - (б).

аппроксимаций ВАХТ меняется в зависимости от температуры.

Исходя из значений угла наклона линейных аппроксимаций, в координатах Шоттки можно вычислить значение  $\varepsilon_r$ , воспользовавшись уравнением (3) [26]:

$$\varepsilon_r = \frac{e^3}{4\pi\varepsilon_0 b^2 k^2 T^2}, \quad (5)$$

где  $b$  – тангенс угла наклона линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Шоттки.

Для оценки влияния нагрева на величину тока в исследуемых плёночных структурах за счёт возбуждения носителей в зоне проводимости, ВАХТ могут быть рассмотрены в рамках теории термоэлектронной эмиссии [27,28]. В свою очередь ток, обусловленный тепловым возбуждением носителей заряда, будет описываться выражением (6):

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (6)$$

где  $E_a$  – энергия активации носителей заряда. Прологарифмировав (6), получим (7):

$$\ln J = \ln(A^* T^2) - \frac{E_a}{kT}. \quad (7)$$

Представление ВАХТ в координатах Аррениуса ( $\ln J$  и  $(kT)^{-1}$ ), позволит найти значение энергии активации носителей заряда (Рис. 4) [24]. В частности, энергия активации соответствует наклону линейных аппроксимаций ВАХТ.

По своей сути, энергия активации является эффективной высотой барьера Шоттки и описывается уравнением (7) [29]:

$$E_a = e\phi_b - \sqrt{e^3 E / (4\pi\varepsilon_r \varepsilon_0)}. \quad (8)$$

Значения энергии активации носителей заряда тонкоплёночных коллоидных КТ,

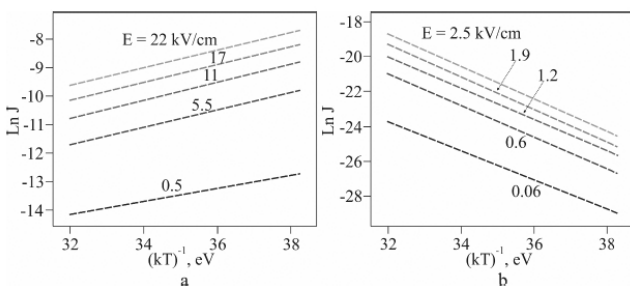


Рис. 4. ВАХТ в координатах Аррениуса КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> – (а) и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au – (б).

вычисленные из линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Аррениуса, составило: КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> – 0.29 эВ и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au – 0.89 эВ. Отметим, что значения энергии активации, полученные из линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Аррениуса, коррелируются с результатами, полученными при помощи экспоненциального закона (уравнение 1).

### 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРОВОДИМОСТИ

Для определения механизма проводимости и оценки использования исследуемых материалов в органической электронике был рассчитан фактор идеальности  $\eta$ , который определялся по наклону линейной части прямого смещения графика  $\ln(I)$ - $V$  и рассчитывался из соотношения [30]:

$$\eta = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)}. \quad (9)$$

Учитывая параметры  $\eta$  идеального диода, у которого доминирующим является термоэлектронный эмиссионный механизм, фактор идеальности равен единице.

Полученные значения  $\eta$  для исследуемых плёночных структур Ag<sub>2</sub>S больше единицы (Таблица 2). Следовательно, механизм проводимости таких соединений сложнее [31].

Определим доминирующий механизм проводимости, представив вольт-амперные характеристики в логарифмической шкале (Рис. 5). В таком случае, зависимость тока от приложенного напряжения описывается типичным степенным законом  $I \sim V^m$  [32], где  $m$  – значение наклона для каждой области приложенного напряжения характеризует кинетику носителей заряда.

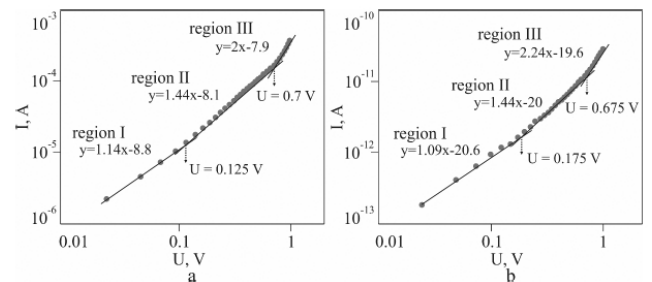


Рис. 5. Логарифм плотности тока как функция логарифма приложенного напряжения при отрицательном смещении, где: КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> – (а) и КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au – (б).

Таблица 1

Механизм проводимости КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ 

Соединение	$m1$	$m2$	$m3$	$U(m1), \text{В}$	$U(m2), \text{В}$	$U(m3), \text{В}$
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$	1.14	1.45	2	0 – 0.125	0.125 – 0.7	> 0.7
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$	1.09	1.44	2.24	0 – 0.175	0.175 – 0.675	> 0.675

Рассматривая сэндвич структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al, при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , мы можем выделить три региона характеризующие кинетику носителей заряда (Рис. 5а). Резистивный механизм проводимости, характеризующийся коэффициентом  $m$ , соответствует диапазону напряжений от 0 до 0.125 В (коэффициент  $m1$ , Таблица 1). Токковый режим с ограниченным пространственным зарядом (space charge limited conduction (SCLC))[30] работает в диапазоне напряжений от 0.125 до 0.7 В (коэффициент  $m2$ , Таблица 1). Третий диапазон, соответствующий переносу заряда за счет механизма trap charge limited conduction (TCLC) работает при напряжениях более 0.7 В (коэффициент  $m3$ , Таблица 1) [30].

Анализируя сэндвич структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al ранее было показано, что при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , доминирующим механизмом проводимости является резистивный механизм. При построении в логарифмической шкале зависимости плотности тока от напряжения, мы также получаем линейную характеристику, что определяется омической проводимостью. В свою очередь нагрев КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  сопровождается увеличением нелинейности ВАХ – формированием барьера. В связи с этим рассмотрим механизмы проводимости сэндвич структуры ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al при температуре  $T = 360 \text{ К}$  (Рис. 5б). Можно выделить три региона отличающиеся углом наклона. Резистивный механизм проводимости КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  соответствует диапазону напряжений от 0 до 0.175 В (коэффициент  $m1$ , Таблица 1). Механизм SCLC преобладает в диапазоне напряжений от 0.175 до 0.675 В (коэффициент

$m2$ , Таблица 1). Перенос заряда за счет механизма TCLC работает при напряжениях более 0.675 В (коэффициент  $m3$ , Таблица 1).

Параметр подвижности носителей заряда с ограниченным пространственным зарядом (SCLC) согласно модели Мотта-Герни [31], может быть описан следующим образом:

$$J_{SCLC} = \frac{9}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_{eff} \frac{V^2}{d^3}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала;  $d$  – толщина плёнки;  $V$  – приложенное напряжение, а  $\mu_{eff}$  – эффективная подвижность заряда. Эффективная подвижность носителей заряда КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  рассчитанная в соответствии с моделью Мотта-Герни представлена в Таблице 2.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования электрофизических свойств коллоидных КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  и  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$  подтверждены закономерности, указывающие на изменение типа проводимости с барьерной на омическую при декорировании  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  плазмонными наночастицами золота. Также установлено, что температурное воздействие на сэндвич-структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al приводит к нелинейности ВАХ и изменению типа проводимости сэндвич-структуры с омического на барьерный. Показано, что проводимость сэндвич-структур ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al и ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al определяется барьером Шоттки на границе КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  пленка-Al. С использованием двух методов были рассчитаны значения энергии активации процесса теплового возбуждения носителей заряда.

Показано, что декорирование КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещенной зоны с 0.29 до 0.89 эВ. Данный факт может быть обусловлен проявлением мелких ловушек плазмон-экситонного взаимодействия в системе КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ , что косвенно

**Таблица 2**  
Энергия активации, фактор идеальности и кинетика носителей заряда КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  и КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$

Соединение	$E_a, \text{эВ}$	Фактор идеальности $\eta$	$\mu_{eff}, \text{м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$	0.29	3.39	$3.81 \times 10^{-7}$
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$	0.89	1.37	$1.25 \times 10^{-10}$

подтверждается уменьшением подвижности носителей заряда с  $3.81 \times 10^{-7}$  до  $1.25 \times 10^{-10}$  м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Полученные результаты указывают на возможность разработки модельных диодных структур на основе коллоидных КТ Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> и Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub>/Au.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Alharthi SS, Alzahrani A, Razvi MAN, Badawi A, Althobaiti MG. Spectroscopic and Electrical Properties of Ag<sub>2</sub>S/PVA Nanocomposite Films for Visible-Light Optoelectronic Devices. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30(1):3878-3885.
2. Cotta MA. Quantum Dots and Their Applications: What Lies Ahead? *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(6):4920-4924.
3. Lei Y, Xu S, Ding M, Li L, Sun Q, Wang ZL. Enhanced Photocatalysis by Synergistic Piezotronic Effect and Exciton-Plasmon Interaction Based on (Ag-Ag<sub>2</sub>S)/BaTiO<sub>3</sub> Heterostructures. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(51):2005716.
4. Gao H, Wang F, Wang S, Wang X, Yi Z, Yang H. Photocatalytic activity tuning in a novel Ag<sub>2</sub>S/CQDs/CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composite: Synthesis and photocatalytic mechanism. *Materials Research Bulletin*, 2019, 115:140-149.
5. Kubendhiran S, Bao Z, Dave K, Liu R-S. Microfluidic Synthesis of Semiconducting Colloidal Quantum Dots and Their Applications. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(4):1773-1790.
6. Chand S, Sharma E, Sharma P. Phase change induced quantization in NIR emitting Ag<sub>2</sub>S nanocrystals: structural and optical response for solar energy applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 770:1173-1180.
7. Smirnov MS, Ovchinnikov OV. IR luminescence mechanism in colloidal Ag<sub>2</sub>S quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2020, 227:117526.
8. Mir WJ, Swarnkar A, Sharma R, Katti A, Adarsh KV, Nag A. Origin of Unusual Excitonic Absorption and Emission from Colloidal Ag<sub>2</sub>S Nanocrystals: Ultrafast Photophysics and Solar Cell. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(19):3915-3922.
9. Tretyakov I, Svyatodukh S, Perepelitsa A, Ryabchun S, Kaurova N, Shurakov A, Smirnov M, Ovchinnikov O, Goltsman G. Ag<sub>2</sub>S QDs/Si Heterostructure-Based Ultrasensitive SWIR Range Detector. *Nanomaterials*, 2020, 10(5):861.
10. Geiregat P, Thourhout DV, Hens Z. A bright future for colloidal quantum dot lasers. *NPG Asia Materials*, 2019, 11(1).
11. Ruiz D, del Rosal B, Acebron M, Palencia C, Sun C, Cabanillas-Gonzalez J, Lopez-Haro M, Hungria AB, Jaque D, Juarez BH. Ag/Ag<sub>2</sub>S nanocrystals for high sensitivity near-infrared luminescence nanothermometry. *Advanced Functional Materials*, 2016, 27(6):1604629.
12. Zamiri R, Abbastabar Ahangar H, Zakaria A, Zamiri G, Shabani M, Singh B, Ferreira JMF. The structural and optical constants of Ag<sub>2</sub>S semiconductor nanostructure in the Far-Infrared. *Chemistry Central Journal*, 2015, 9(1).
13. Banerjee S, Bhattacharya S, Chakravorty D. Resistivity Hysteresis of Ag<sub>2</sub>S Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(36):13410-13413.
14. Sadovnikov SI, Kuznetsova YV, Rempel AA. Ag<sub>2</sub>S silver sulfide nanoparticles and colloidal solutions: Synthesis and properties. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2016, 7:81-91.
15. Gurchenko VS, Mazinov AS, Tyutyunik AS, Grevtseva IG, Smirnov MS, Chevychelova TA, Ovchinnikov OV. The voltage-current and spectral characteristics of thin layers of Ag<sub>2</sub>S quantum dots and their mixtures with plasmon nanoparticles. *Journal of the Korean Physical Society*, 2023, 83:471-476.
16. Perepelitsa AS, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Kondratenko TS, Grevtseva IG, Aslanov SV, Khokhlov VY. Structural and optical properties of Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> core/shell quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2021, 231:117805.
17. Grevtseva IG, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Kondratenko TS, Perepelitsa AS, Hussein AMH. Luminescence of Ag<sub>2</sub>S/SiO<sub>2</sub> Colloidal Quantum Dots Decorated with Small Au Nanoparticles. *Optics and Spectroscopy*, 2022, 130(11):567-572.
18. Grevtseva IG, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Tikhomirov SA, Ponyavina AN, Binh NTh, Minh PhH, Turishchev SU, Chuvenkova OA. Formation of plasmon-exciton nanostructures upon decorating Ag<sub>2</sub>A/SiO<sub>2</sub> quantum dots with Au nanoparticles. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, 86(6):692-695.

19. Gusev AN, Mazinov AS, Tyutyunik AS, Fitaev IS, Gurchenko VS, Braga EV. Effect of Doping with N, Br, and F Atoms on Electrodynamic Characteristics and Physical Properties of Isatin- $\beta$ -anil. *Technical Physics*, 2021, 66(1):84-92.
20. Gusev AN, Mazinov AS, Shevchenko AI, Tyutyunik AS, Gurchenko VS, Braga EV. Research of heterojunctions based on the system of fullerene and hydrazine. *Applied Physics*, 2019, (6):48-53.
21. Laidler KJ. The development of the Arrhenius equation. *Journal of Chemical Education*, 1984, 61(6):494.
22. Lengyel G. Schottky Emission and Conduction in Some Organic Insulating Materials. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(2):807-810.
23. Matsumura M, Jinde Y, Akai T, Kimura T. Analysis of Current-Voltage Characteristics of Organic Electroluminescent Devices on the Basis of Schottky Emission Mechanism. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(11):5735-5739.
24. Tyutyunik AS, Gurchenko VS, Mazinov AS. Investigation of temperature dependences of current-voltage characteristics of hybrid organic materials based on zinc complexes. *Applied Physics*, 2021, (5):81-87.
25. Rusu M, Rusu GI. High-field electrical conduction in thin-film sandwich structures of the metal/organic semiconductor/metal type. *Applied Surface Science*, 1998, 126(3-4):246-254.
26. Белявский ПЮ, Плотников ВВ. Исследование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик тонкопленочных конденсаторов на основе твердых растворов титаната бария стронция. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 2016, 1:38-43.
27. Badali Y, Azizian-Kalandaragh Y, Akhlaghi EA, Altindal S. Ultrasound-Assisted Method for Preparation of Ag<sub>2</sub>S Nanostructures: Fabrication of Au/Ag<sub>2</sub>S-PVA/n-Si Schottky Barrier Diode and Exploring Their Electrical Properties. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(1).
28. De Leeuw DM, Lous EJ. Metal-insulator-semiconductor Schottky-type diodes of doped thiophene oligomers. *Synthetic Metals*, 1994, 65(1):45-53.
29. Chang S-T, Lee JY. Electrical conduction mechanism in high-dielectric-constant (Ba<sub>0.5</sub>,Sr<sub>0.5</sub>)TiO<sub>3</sub> thin films. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(4):655-657.
30. Gusev A, Braga E, Tyutyunik A, Gurchenko V, Berezovskaya M, Kryukova M, Kiskin M, Linert W. Synthesis, Photoluminescence and Electrical Study of Pyrazolone-Based Azomethine Ligand Zn(II) Complexes. *Materials*, 2020, 13(24):5698.
31. Dhifaoui H, Aloui W, Bouazizi A. Optical, electrochemical and electrical properties of p-N,N-dimethyl-amino-benzylidene-malononitrile thin films. *Materials Research Express*, 2020, 7(4):045101.
32. Gupta RK, Ghosh K, Kahol PK. Fabrication and electrical characterization of Au/p-Si/STO/Au contact. *Current Applied Physics*, 2009, 9(5):933-936.

**Мазинов Алим Сеит-Аметович**

д.ф.-м.н., доцент

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского  
Симферополь 295007, Россия

E-mail: mazinovas@cfuv.ru

**Тютюник Андрей Сергеевич**

к.ф.-м.н.

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского  
Симферополь 295007, Россия

E-mail: tyutyunikas@mail.ru

**Гурченко Владимир Сергеевич**

м.н.с.

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского  
Симферополь 295007, Россия

E-mail: gurchenko\_v@mail.ru.



DOI 10.17725/rensit.2024.16.395.

## Разрешение шумовых сигналов при наличии случайных неоднородностей океанической среды

<sup>1</sup>Кузькин В.М., <sup>2</sup>Переселков С.А., <sup>3</sup>Грачев В.И., <sup>2</sup>Рыбьянец П.В., <sup>2</sup>Ткаченко С.А.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>

Москва 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, <http://www.vsu.ru/>

Воронеж 394006, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>

Москва 125009, Российская Федерация

*E-mail: kumiov@yandex.ru pereselkov@yandex.ru; grachev@cplire.ru rybyanets.edu@yandex.ru; tkachenko.edu@yandex.ru*

*Поступила в редакцию 11.05.2024, рецензирована 14.05.2024, принята 16.05.2024*

**Аннотация:** Обсуждено формирование голограммы шумовых сигналов в случайно-неоднородной океанической среде. Показано, что голограмма сигналов нескольких источников представляется преимущественно суммой голограмм сигналов, формирующихся невозмущенными и возмущенными полями. Описан метод очищения голограммы от возмущенных полей. Предложены критерии разрешения сигналов. Приведены результаты численного моделирования по разрешению двух сигналов и оценке параметров источников на фоне интенсивных внутренних волн, вызывающих горизонтальную рефракцию мод звукового поля.

**Ключевые слова:** голографическая обработка, неоднородная среда, спектральная плотность, разрешение сигналов, интенсивные внутренние волны

**УДК 004.052.34**

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

**Для цитирования:** Кузькин В.М., Переселков С.А., Грачев В.И., Рыбьянец П.В., Ткаченко С.А. Разрешение шумовых сигналов при наличии случайных неоднородностей океанической среды. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):395-406. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.395.

## Noise signals resolution in the random inhomogeneities presence of oceanic environment

Venedikt M. Kuz'kin

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

Moscow 119991, Russian Federation

*E-mail: kumiov@yandex.ru*

Sergey A. Pereselkov, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko

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

Voronezh 394006, Russian Federation

*E-mail: pereselkov@yandex.ru; rybyanets.edu@yandex.ru; tkachenko.edu@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](mailto:grachev@cplire.ru)

Received May 11, 2024, peer-reviewed May 14, 2024, accepted May 16, 2024

**Abstract:** The formation of a hologram of noise signals in a randomly inhomogeneous oceanic environment is discussed. It is shown that a hologram of signals from several sources appears predominantly as a sum of holograms of signals formed by undisturbed and disturbed fields. A method for clearing a hologram from disturbed fields is described. Criteria for signal resolution are proposed. The results of numerical modeling are presented for resolving two signals and estimating the parameters of sources against the background of intense internal waves causing horizontal refraction of sound field modes.

**Keywords:** holographic processing, inhomogeneous medium, spectral density, signal resolution, intense internal waves

UDC 004.052.34

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

**For citation:** Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Vladimir I. Grachev, Pavel V. Rybyanets, Sergey A. Tkachenko. Noise signals resolution in the random inhomogeneities presence of oceanic environment. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):395-406. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.395.

### СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (396)
2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (397)
3. РАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛОВ (400)
4. КРИТЕРИЙ РАЗРЕШЕНИЯ ДВУХ СИГНАЛОВ (400)
5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (401)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (404)

### ЛИТЕРАТУРА (404)

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из слабо разработанных проблем обработки гидроакустических сигналов – обеспечение высокой помехоустойчивости в условиях пространственно-временной изменчивости акватории, совмещенной с адаптивностью к изменяющимся условиям распространения волнового поля. Трудности подхода к ее решению вытекают из ограниченности применяемых методов решения, не учитывающих устойчивые структурные особенности интерференционной картины (интерферограммы) энергетических характеристик звукового поля, формируемой широкополосными источниками. Как показали теоретические исследования, численные и натурные эксперименты последних лет, решение

проблемы делает возможным голографическая обработка [1-3]. Она реализует квазикогерентное накопление максимумов спектральной плотности сигнала вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота-время, которая далее подвергается двумерному преобразованию Фурье. На выходе интегрального преобразования (голограммы) спектральная плотность сигнала фокусируется в малой области по сравнению с помехой, обеспечивая большую помехоустойчивость. Развиваемый голографический подход позволяет по-новому осмыслить и пересмотреть сложившиеся ранее представления в обработке сигналов малошумных источников, где играет роль интерференция волн.

Разрабатываемые голографические методы продемонстрировали высокую устойчивость в волноводах с пространственно-временными неоднородностями, в частности, при наличии возмущений, обусловленных интенсивными внутренними волнами [4-8]. Уникальную возможность избежать (или существенно уменьшить) эти искажения предоставляет голографический метод записи и восстановления

интерферограммы, опирающейся на разделении на голограмме областей невозмущенного и возмущенного полей. Впервые этот эффект был установлен при голографической обработке данных эксперимента SWARM-95 [4,5], когда интенсивные внутренние волны (ИВВ) вызывали горизонтальную рефракцию и взаимодействие мод акустического поля источника. Голографическая обработка гидроакустических сигналов позволяет эффективно решать важные прикладные задачи гидроакустики: обнаруживать малозвучный источник [9-11], оценивать его дальность и пеленг [12-17]. Следует отметить, что предложенная модовая голография [18-20] обеспечивает возможность разделения мод звукового поля источника в точке приема и оценку их параметров: амплитуды, скорости распространения и коэффициенты затухания и т.д. Одним из многообещающих приложений голографической обработки является разрешение нескольких шумовых сигналов с использованием одиночного приемника. Решение этой задачи на основе численного моделирования для регулярного волновода на фоне интенсивной помехи, маскирующей сигналы, впервые рассмотрено в [21].

В данной работе изложена голографическая обработка шумовых сигналов нескольких источников в условиях пространственно-временной нестабильности океанической среды. Представлен алгоритм, позволяющий с минимальными искажениями восстанавливать сигналы на фоне неоднородностей среды. Сформулированы критерии разрешения сигналов с применением одиночного приемника. Приведены результаты численного моделирования разрешения двух шумовых сигналов на фоне ИВВ, вызывающих горизонтальную рефракцию мод звуковых полей источников, и оценены параметры движущихся источников

## 2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Рассмотрим голографическую обработку  $N$  шумовых сигналов  $p_{(n)}(t)$ ,  $n = \overline{1, N}$ , в случайно-неоднородной океанической среде на примере звукового давления, регистрируемого одиночным приемником. Нижние индексы в скобках « $(n)$ » относятся к номеру сигнала источника. Для

векторных компонент поля векторно-скалярного приемника рассмотрение аналогично [13]. Звуковое давление в точке приема, искаженное неоднородностями среды в отсутствие помехи, запишем в виде

$$p(t) = \sum_{n=1}^N \left[ \bar{p}_{(n)}(t) + \tilde{p}_{(n)}(t) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{p}_{(n)}(t)$  и  $\tilde{p}_{(n)}(t)$  – сигналы  $n$ -го источника, порожденные невозмущенным и возмущенным волновыми полями. В частотной полосе  $\Delta f$  за время наблюдения  $\Delta t$  накапливаются  $J$  независимых шумовых реализаций  $p(t)$  продолжительностью  $T$  и с временным интервалом  $\delta T$  между ними

$$J = \Delta t / (\delta T). \quad (2)$$

Реализации независимы, если  $\delta T \geq 1/\Delta f$ . Оконным преобразованием Фурье восстанавливаются частотно-временные представления шумовых реализаций  $p(f, t)$  и формируется интерферограмма звукового давления

$$P(f, t) = p(f, t) p^*(f, t), \quad (3)$$

где верхний индекс «\*» обозначает комплексно-сопряженную величину. Сгруппируем члены в интерферограмме (3) следующим образом

$$P(f, t) = \sum_{b=1}^4 P_b(f, t). \quad (4)$$

Здесь

$$P_1(f, t) = \sum_{n=1}^N \left| \bar{p}_{(n)}(f, t) \right|^2 \quad (5)$$

– интерферограмма невозмущенного поля, формируемая квазикогерентным накоплением максимумов спектральной плотности сигналов;

$$P_2(f, t) = \sum_{n=1}^N \left| \tilde{p}_{(n)}(f, t) \right|^2 \quad (6)$$

– интерферограмма возмущенного поля, вызванная пространственно-временной изменчивостью океанической среды;

$$P_3(f, t) = \sum_{n=1}^N \left[ \bar{p}_{(n)}(f, t) \tilde{p}_{(n)}^*(f, t) + \right. \quad (7)$$

$\left. + \tilde{p}_{(n)}(f, t) \bar{p}_{(n)}^*(f, t) \right]$  – интерферограмма, обусловленная интерференцией волн возмущенного и

невозмущенного полей, формируемая каждым сигналом;

$$P_4(f, t) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left[ \bar{P}_{(m)}(f, t) \bar{P}_{(n)}^*(f, t) + \tilde{P}_{(m)}(f, t) \tilde{P}_{(n)}^*(f, t) + \bar{P}_{(m)}(f, t) \tilde{P}_{(n)}^*(f, t) + \tilde{P}_{(m)}(f, t) \bar{P}_{(n)}^*(f, t) \right] \quad (8)$$

– интерферограмма, содержащая перекрестные интерференционные слагаемые невозмущенного и возмущенного полей, относящиеся к разным сигналам,  $m \neq n$ . Всего в сумме (4) имеется  $4N^2$  слагаемых. В интерферограммах (5), (6) содержится  $N$  членов, в интерферограмме (7) –  $2N$  членов, в интерферограмме (8) –  $4N(N - 1)$  членов. В случае одного шумового сигнала,  $n = 1$ , составляющая  $P_4(f, t) = 0$ .

Таким образом, в условиях пространственно-временной изменчивости среды волновые поля шумовых источников имеют сложную интерференционную структуру. Применим к интерферограмме (4) двумерное преобразование Фурье

$$F(\tau, \nu) = \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{f_2} P(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - \tau f)] df dt = \sum_{b=1}^4 F_b(\tau, \nu). \quad (9)$$

Здесь  $\nu$  и  $\tau$  – частота и время голограммы;  $f_{1,2}$   $f_{1,2} = f_0 \mp (\Delta f / 2)$ ,  $f_0$  – средняя частота спектра;  $F_b(\tau, \nu)$  – парциальная голограмма интерферограммы  $P_b(f, t)$ ,  $b = \overline{1, 4}$ . При выполнении преобразования Фурье на интерферограмме (4) устраняется среднее значение. Если это не выполнено до применения анализа Фурье, то на голограмме в начале координат появляется интенсивный пик, уменьшающий разрешающую способность. Рассмотрим структуру спектральных плотностей парциальных голограмм.

Спектральная плотность голограммы  $F_1(\tau, \nu)$  движущихся источников сконцентрирована в  $2N$  узких полосах в виде отдельных фокальных пятен, вызванных интерференцией мод разных номеров [12]. Они расположены в первом и третьем квадрантах голограммы, если радиальные скорости источников  $w_{(n)} < 0$  (источники

приближаются к приемнику), и во втором и четвертом квадрантах, когда они удаляются от приемника ( $w_{(n)} > 0$ ). Под радиальной скоростью источника понимается проекция скорости в направлении на приемник. При неподвижных или движущихся источниках с радиальными скоростями, равными нулю, координаты пиков фокальных пятен расположены на оси времени  $\tau$ . Область локализации каждого из сигналов содержит  $(M-1)$  главных максимумов с координатами  $(\tau_{\mu(n)}, \nu_{\mu(n)})$ , расположенными на прямых  $\nu = \varepsilon_{(n)} \tau$  с угловыми коэффициентами  $\varepsilon_{(n)} = \nu_{\mu(n)} / \tau_{\mu(n)}$ . Здесь  $M$  – число мод, формирующих поле,  $\mu = \overline{1, (M-1)}$  – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат максимум первого фокального пятна, обусловленный интерференцией соседних мод, приходится на значения  $(\tau_{1(n)}, \nu_{1(n)})$ . Координаты соседнего пика, вызванного интерференцией мод номеров  $(m, m + 2)$ , расположены в точке  $(\tau_{2(n)}, \nu_{2(n)})$  и т.д. И, наконец, координаты самого удаленного пика, продиктованного интерференцией первой и последней моды –  $(\tau_{(M-1)(n)}, \nu_{(M-1)(n)})$ . В точках с координатами  $(\tau_{\mu(n)}, \nu_{\mu(n)})$  суммируются  $(M - \mu)$  главных максимумов.

Угловые коэффициенты прямых расположения максимумов фокальных пятен  $\varepsilon_{(n)}$  и интерференционных полос  $\delta f_{(n)} / \delta t_{(n)}$  связаны соотношением

$$\varepsilon_{(n)} = -\delta f_{(n)} / \delta t_{(n)}, \quad (10)$$

где  $\delta f_{(n)}$  – частотный сдвиг максимума волнового поля за время  $\delta t_{(n)}$ .

При условии  $r_{0(n)} \gg |w_{(n)}| \Delta t$ , где  $r_{0(n)}$  – удаление источника от приемника в начальный момент времени  $t = 0$ , радиальная скорость и начальное расстояние равны

$$\dot{w}_{(n)} = -2\pi \kappa_{w\mu} \nu_{\mu(n)}, \quad \dot{r}_{0(n)} = \kappa_{r\mu} \tau_{\mu(n)}, \quad (11)$$

$$\kappa_{w\mu} = \left| h_{m(m+\mu)}(f_0) \right|^{-1}, \quad (12)$$

$$\kappa_{r\mu} = 2\pi \left| dh_{m(m+\mu)}(f_0) / df \right|^{-1}$$

– коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода [22]. Здесь  $h_{mn} = h_m - h_n$ ,  $h_m$  – невозмущенное горизонтальное волновое число  $m$ -й моды. Восстановленные параметры

источников, в отличие от их истинных значений, отмечены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Для первого ( $\mu = 1$ ) и последнего ( $\mu = M - 1$ ) номеров фокальных пятен, ограничивающих область концентрации спектральной плотности сигналов, соотношение (12) упрощается

$$\begin{aligned} \kappa_{w1} &= (M-1) |h_{1M}(f_0)|^{-1}, \\ \kappa_{r1} &= 2\pi(M-1) |dh_{1M}(f_0)/df|^{-1}, \\ \kappa_{w(M-1)} &= \kappa_{w1}/(M-1), \quad \kappa_{r(M-1)} = \kappa_{r1}/(M-1). \end{aligned} \quad (13)$$

Спектральная плотность сигналов сфокусирована в полосе, ограниченной прямыми  $\nu_{I(n)}(\tau) = \varepsilon(n)\tau + \delta\nu$ ,  $\nu_{II(n)}(\tau) = \varepsilon(n)\tau - \delta\nu$ , (14) ширина полосы

$$d(n) = 2\delta\nu / \left(1 + \varepsilon(n)^2\right), \quad (15)$$

длина полосы

$$l(n) = \left[ \left( \tau_{(M-1)(n)} - \tau_{I(n)} \right) + 2\delta\tau \right] \left( 1 + \varepsilon(n)^2 \right). \quad (16)$$

Здесь  $\delta\nu = 1/\Delta t$  – полуширина фокальных пятен в направлении оси  $\nu$ ,  $\delta\tau = 1/\Delta f$  полуширина фокальных пятен в направлении оси  $\tau$ . Вне этой полосы спектральная плотность сигналов практически подавлена. Используя (15), (16), площади областей фокусировки можно выразить как

$$S(n) = d(n) \cdot l(n) = \frac{2 \left( \tau_{(M-1)(n)} - \tau_{I(n)} \right)}{\Delta t} + \frac{4}{\Delta t \Delta f} \quad (17)$$

или, принимая во внимание (11), (13),

$$S(n) = \frac{(M-2)}{\pi(M-1)} \frac{\dot{\tau}_0(n)}{\Delta t} \left| \frac{dh_{1M}(f_0)}{df} \right| + \frac{4}{\Delta t \Delta f}. \quad (18)$$

Площадь области фокусировки не зависит от радиальной скорости источника, увеличивается с возрастанием удаленности и уменьшением времени наблюдения, ширины полосы и средней частоты спектра.

Итак, двумерное преобразование Фурье позволяет получать независимые отображения различных источников, интерференционные полосы которых перекрываются по частоте и времени.

Для случайно-неоднородных океанических волноводов характерны слабые и медленные

изменения квадрата показателя преломления, которые инициируют вариации горизонтальных волновых чисел и амплитуд мод [23]. При этом, как показывают модельные расчеты [19,20], производные горизонтальных волновых чисел мод по частоте (величины, обратные групповым скоростям мод) менее подвержены влиянию возмущения среды. В условиях, когда можно пренебречь изменениями поправок групповых скоростей мод, спектральные плотности голограммы  $F_2(\tau, \nu)$  концентрируются вдоль оси частоты  $\nu$  в форме фокальных пятен. Данное положение ранее получило экспериментальное подтверждение на примере рассмотрения неоднородностей среды в форме ИВВ [4,5,16,17]. Спектральная плотность возмущенного поля возрастает с увеличением времени наблюдения и может превышать спектральную плотность невозмущенного поля.

Контрастность интерферограммы  $P_3(f, t)$  (7), обусловленной интерференцией невозмущенных и возмущенных волновых полей разных источников, невелика. Поэтому спектральную плотность голограммы  $F_3(\tau, \nu)$ , получаемую частотно-временным накоплением при фурье-преобразовании, следует рассматривать как некий слабоконтрастный размазанный фон, который на голограмме концентрируется в малой области.

Невозмущенные и возмущенные поля разных источников не коррелированы, так что спектральная плотность голограммы  $F_4(\tau, \nu)$  пренебрежимо мала по сравнению со спектральными плотностями голограмм  $F_{1,2,3}(\tau, \nu)$ ,  $|F_4(\tau, \nu)| \ll |F_{1,2,3}(\tau, \nu)|$ .

Пренебрегая вкладом спектральной плотности голограммы  $F_4(\tau, \nu)$ , результирующую голограмму (9) шумовых сигналов в случайно-неоднородной среде можно записать в виде

$$\begin{aligned} F(\tau, \nu) &= \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{f_3} \sum_{b=1}^3 I_b(f, t) \exp[i2\pi(\nu t - \tau f)] df dt = \\ &= \sum_{b=1}^3 F_b(\tau, \nu). \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, в случайно-неоднородной среде модель голограммы нескольких шумовых сигналов отличается достаточной простотой и в то же время содержит в себе большое разнообразие форм поведения. Кроме того, она

обладает предсказательной силой в отношении восстановления параметров шумовых источников.

### 3. РАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛОВ

На голограмме (19) спектральные плотности шумовых сигналов, обусловленные невозмущенным и возмущенным волновыми полями, локализованы в разных областях, которые практически не пересекаются. В результате появляется возможность получения голограмм незначительно искаженных шумовых сигналов при наличии неконтролируемых неоднородностей среды. Очищение голограммы от возмущений среды основано на вырезании спектральной плотности на временном интервале  $2\delta\tau = 2/\Delta f$  вдоль оси частоты  $\nu$ . Метод очистки не требует предварительного знания о характере возмущения и сигналов. Если теперь к очищенной голограмме применить двумерное обратное преобразование Фурье, то восстановленная интерферограмма преимущественно будет представлять собой муаровую картину из локализованных полос отдельных сигналов, сформированных невозмущенным полем.

Очищенную от возмущения голограмму можно теперь использовать для разрешения шумовых сигналов, мало искаженных неоднородностями среды. Под разрешением сигналов понимается их раздельное обнаружение и определение параметров источников. В качестве критерия разрешающей способности принимается точность, с которой параметры (пеленг, радиальная скорость, удаление, глубина) каждого источника определяются при наличии других источников. Механизм разрешения сигналов основан на том, что результирующая голограмма приближенно рассматривается как линейная суперпозиция голограмм отдельных сигналов.

Разрешение сигналов осуществляется следующим образом. Вначале на голограмме выделяется область локализации спектральной плотности наиболее мощного сигнала. Она вырезается и по отношению к очищенной голограмме применяется обратное двумерное преобразование Фурье по восстановлению интерферограммы. Выделяя последовательно на голограмме области локализации отдельных

сигналов и вырезая их, будем получать голограммы и интерферограммы менее интенсивных сигналов. Возможности очистки ограничены входным отношением с/п [21].

С каждым шагом очистки восстанавливаемая голограмма сигнала будет все больше отличаться от оригинала его голограммы в отсутствие возмущения среды. Это обусловлено тем, что при вырезании локализованной области одного из сигналов частично могут вырезаться и спектральные плотности других, менее интенсивных сигналов. Эффект преимущественно будет проявляться в областях расположения малых номеров фокальных пятен, т.е. будут ослабляться и искажаться низкочастотные компоненты. Механизм очистки может приводить к искажению голограммы и соответственно к повышению погрешности определения параметров источников при увеличении шага очистки. Так как вырезание изменяет только распределение спектральной плотности, то оно должно незначительно влиять на положение максимумов фокальных пятен и форму интерферограммы. Для повышения точности восстановления параметров источников следует использовать фокальные пятна высших номеров.

### 4. КРИТЕРИЙ РАЗРЕШЕНИЯ ДВУХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим критерий разрешения двух сигналов с применением одиночного приемника. В качестве критерия разрешения сигналов положим требование, чтобы их спектральные плотности на голограмме не пересекались. Для выполнения этого условия достаточно потребовать непересечения спектральных плотностей их первых фокальных пятен. Если спектральные плотности сигналов расположены в разных квадрантах голограммы (радиальные скорости источников имеют разные знаки), то возможности разделения сигналов улучшаются.

Для определенности проанализируем случай, когда спектральные плотности сигналов расположены в первом квадранте голограммы. Положим  $\epsilon_{(1)} > \epsilon_{(2)}$ . Тогда сформулированный критерий разрешения сигналов сводится к условию

$$\epsilon_{(1)}\tau_{I(1)} - \epsilon_{(2)}\tau_{I(2)} \geq (2/\Delta t). \quad (20)$$

Используя (11), (13), неравенство (20) можно привести к виду

$$\Delta t \left| \dot{w}_{(1)} - \dot{w}_{(2)} \right| \geq 2D_{\max} \cdot \quad (21)$$

где

$$D_{\max} = 2\pi / \left| \dot{h}_{m(m+1)}(f_0) \right| \quad (22)$$

– усредненный максимальный пространственный период интерферограммы, обусловленный интерференцией соседних мод [22]. Выполнение условия (21) не зависит от начальных расстояний источников  $r_{0(1,2)}$  и ширины полосы  $\Delta f$ . Условие остается справедливым и тогда, когда спектральные плотности сигналов расположены в четвертом квадранте голограммы, а также, если радиальная скорость одного из источников равна нулю. Единственным переменным параметром, которым определяется качество разрешения сигналов при заданных характеристиках акватории, является время наблюдения. Если его выбрать малым, то на голограмме интерференционная картина возмущенного поля (6) не запишется, сигнал на голограмме будет неискаженным. Однако при этом разрешающая способность снижается. Если его выбрать большим, то при очистке могут быть уничтожены существенные низкочастотные компоненты невозмущенных сигналов. Разрешающая способность при этом возрастает.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда радиальные скорости источников равны нулю,  $w'_{(1,2)} = 0$ , т.е. область фокусировки расположена вдоль оси времени  $\tau$ . Пусть  $r_{0(2)} > r_{0(1)}$ . Тогда требование разрешения сигналов сводится к условию непересечения последнего и первого фокальных пятен, формируемых сигналами первого и второго источников

$$\tau_{1(2)} - \tau_{(M-1)(1)} \geq (2 / \Delta f). \quad (23)$$

Вводя обозначения усредненного максимального частотного масштаба изменчивости интерферограммы сигнала второго источника

$$\Lambda_{\max(2)} = \frac{2\pi}{r_{0(2)} \left| \dot{h}_{m(m+1)}(f_0) / df \right|} \quad (24)$$

и минимального частотного масштаба изменчивости интерферограммы сигнала первого источника [22]

$$\Lambda_{\max(1)} = \frac{2\pi}{r_{0(1)} \left| \dot{h}_{1M}(f_0) / df \right|}, \quad (25)$$

неравенство (23), воспользовавшись выражениями (11), (13), можно привести к виду

$$\left( 1 / \Lambda_{\max(2)} \right) - \left( 1 / \Lambda_{\min(1)} \right) \geq (2 / \Delta f). \quad (26)$$

Реализация неравенства (22) от времени наблюдения не зависит.

Характерной чертой критериев разрешения сигналов (20) и (23) является то обстоятельство, что они определяются параметрами передаточной функции волновода. Поэтому их физическое содержание различно в зависимости от выбора акватории. Предлагаемые критерии удобны тем, что они дают априорные условия разрешения сигналов в зависимости от параметров передаточной функции волновода, радиальных скоростей и удаленностей источников.

## 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В рамках численного моделирования рассмотрим разрешение двух шумовых сигналов с применением одиночного приемника на фоне ИВВ, вызывающих горизонтальную рефракцию мод звукового поля.

Распределение скорости звука по глубине приведено на **Рис. 1**. Диапазон частот  $\Delta f = 100$ – $120$  Гц. Параметры жидкого поглощающего дна: отношение плотности грунта и воды  $\rho = 1.8$ ; комплексный показатель преломления  $n = 0.84(1 + i0.03)$ . Поле формируется  $M = 4$  модами. Постоянные распространения мод  $h_m(f_0)$  и их производные по частоте  $(dh_m(f_0)/df)$  на средней частоте спектра  $f_0 = 110$  Гц приведены в **Таблице 1**.

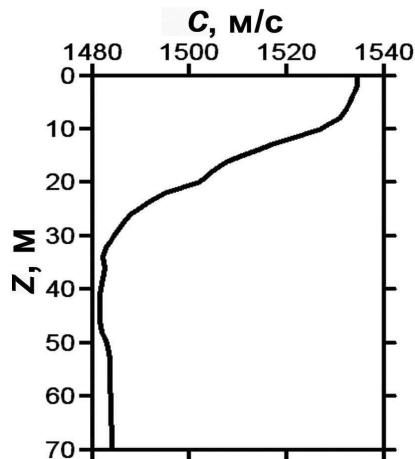


Рис. 1. Невозмущенный профиль скорости звука.

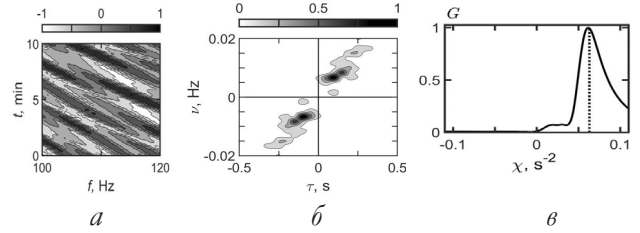
Таблица 1

Частота  $f_0 = 110$  Гц

Номера мод, $m$	1	2	3	4
$h_m, \text{м}^{-1}$	0.4635	0.4557	0.4450	0.4310
$(dh_m/df)/10^{-3}, \text{с/м}$	2.4015	2.4177	2.4504	2.5172

В начальный момент времени  $t_0 = 0$  расстояние между источниками и приемником  $r_{0(1,2)} = 12$  км. Радиальные скорости источников:  $w_{(1)} = -1$  м/с,  $w_{(2)} = -4$  м/с. Источники расположены на глубине  $z_{(1,2)} = 15$  м, одиночный приемник – на глубине  $z_q = 65$  м. Равномерный спектр шумоизлучения, интенсивность одинаковая. Шумовые реализации длительностью  $T = 4$  с звукового давления регистрируются с периодичностью  $T_* = 5$  с. Модель возмущения: цуг ИВВ, состоящий из трех одинаковых солитонов. Параметры солитона: амплитуда  $A = 20$  м, ширина  $\eta = 200$  м, скорость  $u = 0.7$  м/с. Период между солитонами  $\Lambda = 250$  м. Ширина фронта возмущения превышает длину трассы. Время наблюдения  $\Delta t = 10$  мин.

Согласно исходным данным, критерий (21) разрешения шумовых сигналов выполняется. Результаты голографической обработки в отсутствие ИВВ по сигналам отдельных источников и суммарному сигналу двух источников представлены на **Рис. 2–4**. Угловые коэффициенты наклона интерференционных полос:  $\delta f_{(1)}/\delta t_{(1)} = -0.015 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 2а);  $\delta f_{(2)}/\delta t_{(2)} = -0.062 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 3а). Координаты пиков первых фокальных пятен:  $\tau_{1(1)} = 0.075 \text{ с}$ ,  $\nu_{1(1)} = 0.0019 \text{ Гц}$  (Рис. 2б);  $\tau_{1(2)} = 0.077 \text{ с}$ ,  $\nu_{1(2)} = 0.0068 \text{ Гц}$  (Рис. 3б). Согласно (11) и данным Таблицы 1 восстановленные параметры источников:  $\dot{w}_{(1)} = -1.12 \text{ м/с}$ ,  $\dot{r}_{0(1)} = 12.21 \text{ км}$ ;  $\dot{w}_{(2)} = -3.93 \text{ м/с}$ ,  $\dot{r}_{0(2)} = 12.53 \text{ км}$ . Положения максимумов функций обнаружения:  $\epsilon_{(1)} = 0.015 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 2в);

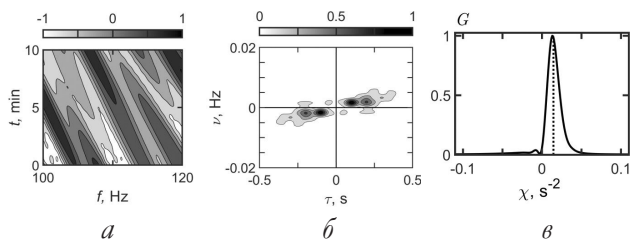


**Рис. 3.** Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б) и функция обнаружения (в) сигнала источника, движущегося с радиальной скоростью  $w_{(2)} = -4$  м/с, в отсутствие ИВВ.

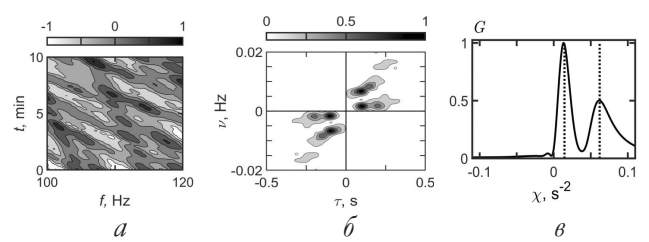
$\epsilon_{(2)} = 0.062 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 3в). Ширина полосы функции обнаружения на уровне 0.5 от максимума:  $\Delta\chi_{(1)} = 0.018 \text{ с}^{-2}$ ;  $\Delta\chi_{(2)} = 0.037 \text{ с}^{-2}$ .

На интерферограмме суммарного поля (Рис. 4а) прослеживаются перекрывающиеся интерференционные полосы сигналов двух источников, т.е. сигналы источников не интерферируют между собой. На голограмме (Рис. 4б) спектральные плотности сигналов практически не накладываются друг на друга, поэтому координаты фокальных пятен, определяющие координаты источников, не изменяются. Максимумы функций обнаружения (Рис. 4в) приходятся на значения угловых коэффициентов, отвечающих отдельным сигналам. При равной мощности излучения, как видно из Рис. 4в, максимум функции обнаружения, отвечающий первому сигналу, в 1.93 раза превышает максимум, второго сигнала. Это различие связано с увеличением ширины полосы функции обнаружения. Таким образом, в отсутствие ИВВ сигналы двух источников разрешаются.

Результаты голографической обработки при наличии ИВВ показаны на **Рис. 5–7**. ИВВ вызывают размытие интерференционных полос отдельных сигналов. Угловые коэффициенты

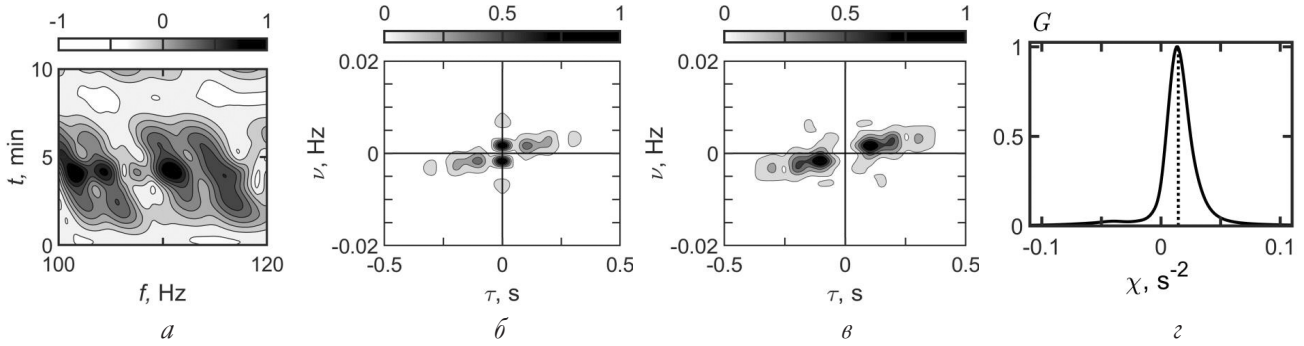


**Рис. 2.** Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б) и функция обнаружения (в) сигнала источника, движущегося с радиальной скоростью  $w_{(1)} = -1$  м/с, в отсутствие ИВВ.



**Рис. 4.** Нормированные интерферограмма (а), модуль голограммы (б) и функция обнаружения (в), сформированные сигналами двух источников в отсутствие ИВВ.





**Рис. 5.** Нормированные интерферограмма (а), модуль неочищенной голограммы (б), модуль голограммы после очистки (в) и функция обнаружения очищенной голограммы (г) в присутствии ИВВ. Источник движется с радиальной скоростью  $w = -1$  м/с.

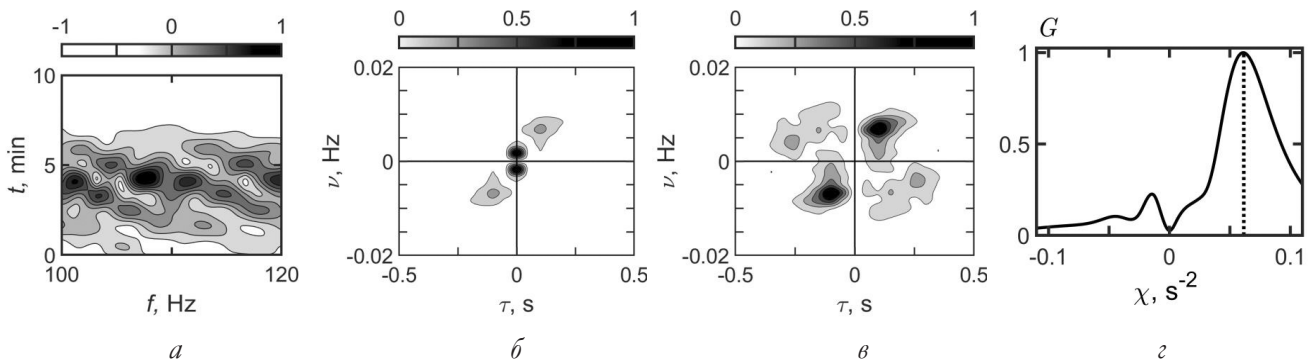
наклона локализованных полос  $\delta f_{(1)}/\delta t_{(1)} = -0.014 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 5а);  $\delta f_{(2)}/\delta t_{(2)} = -0.063 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 6а). Изменение угла наклона интерференционных полос по сравнению со случаем отсутствия ИВВ не заметно. На оси частоты неочищенных голограммах (Рис. 5б, 6б) наблюдаются спектральные плотности в форме фокальных пятен, обусловленных интерференцией волн возмущенного поля. Интенсивность этих спектральных пятен существенно превышает интенсивность фокальных пятен невозмущенных сигналов, что обусловлено большим временем наблюдения. Очищенные от ИВВ спектральные плотности голограмм вдоль оси частоты представлены на Рис. 5в, 6в. Координаты пика первых фокальных пятен:  $\tau_{1(1)} = 0.077 \text{ с}$ ,  $\nu_{1(1)} = 0.0017 \text{ Гц}$  (Рис. 5в);  $\tau_{1(2)} = 0.077 \text{ с}$ ,  $\nu_{1(2)} = 0.0070 \text{ Гц}$  (Рис. 6в). Восстановленные параметры источников:  $\dot{w}_{(1)} = -0.96 \text{ м/с}$ ,  $\dot{r}_{0(1)} = 12.53 \text{ км}$ ;  $\dot{w}_{(2)} = -4.06 \text{ м/с}$ ,  $\dot{r}_{0(2)} = 12.53 \text{ км}$ .

Как видно, при очистке голограмм ИВВ практически не влияют на восстановленные параметры отдельных источников. Положения максимумов функций обнаружения:  $\epsilon_{(1)} = 0.015$

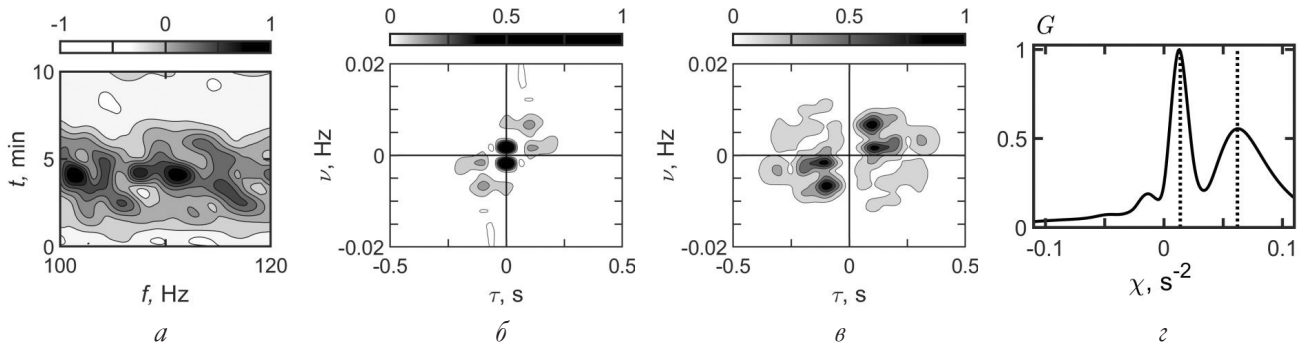
$\text{с}^{-2}$  (Рис. 5г);  $\epsilon_{(2)} = 0.061 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 6г). Ширина полосы функции обнаружения на уровне 0.5 от максимума:  $\Delta\chi_{(1)} = 0.020 \text{ с}^{-2}$ ;  $\Delta\chi_{(2)} = 0.051 \text{ с}^{-2}$ . В области отрицательных значений  $\chi$  для второго сигнала наблюдается незначительный максимум функции обнаружения, отвечающий интерференции невозмущенных и возмущенных волновых полей источника. Максимум в 4.14 раза меньше пика невозмущенного сигнала.

Интерферограмма суммарного поля (Рис. 7а) представляет собой совокупность фокальных пятен на фоне размытой интерференционной картины. На неочищенной голограмме (Рис. 7б), как и в случае отдельных сигналов источников (Рис. 5б, 6б), на оси частоты регистрируются фокальные пятна возмущенного поля, которые по интенсивности намного превышают интенсивность фокальных пятен невозмущенных сигналов.

На очищенной голограмме (Рис. 7в) координаты пиков первых фокальных пятен совпадают с координатами пиков фокальных пятен отдельных сигналов. Восстановленные параметры источников идентичны параметрам



**Рис. 6.** Нормированные интерферограмма (а), модуль неочищенной голограммы (б), модуль голограммы после очистки (в) и функция обнаружения очищенной голограммы (г) в присутствии ИВВ. Источник движется с радиальной скоростью  $w = -4$  м/с.



**Рис. 7.** Нормированные интерферограмма (а), модуль неочищенной голограммы (б), модуль голограммы после очистки (в) и функция обнаружения очищенной голограммы (г) в присутствии ИВВ, сформированные сигналами двух источников.

отдельных источников. Положения максимумов функции обнаружения сигналов:  $\epsilon_{(1)} = 0.015 \text{ с}^{-2}$ ,  $\epsilon_{(2)} = 0.063 \text{ с}^{-2}$  (Рис. 7г). Максимум первого сигнала в 1.81 раз превышает максимум второго сигнала. Максимум, обусловленный интерференцией невозмущенных и возмущенных полей источников, лежащий в области отрицательных значений  $\chi$ , в 2.91 раза меньше максимума второго сигнала. Сигналы двух источников разрешаются, восстанавливаемые параметры источников обнаруживают весьма слабую чувствительность к присутствию ИВВ при большом времени наблюдения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях пространственно-временной изменчивости океанической среды голограмма нескольких шумовых сигналов представляет собой сумму голограмм отдельных сигналов, формирующихся невозмущенным и возмущенным полями. Голограммы источников формируются невозмущенным и возмущенным полями с ярко выраженными фокусировками, расположенными в различных областях результирующей голограммы, а также полем, обусловленным интерференцией невозмущенного и возмущенного полей, интерферограмма которого имеет слабоконтрастный размазанный фон. На голограмме спектральная плотность сигналов, обусловленная возмущенным полем, концентрируется в узкой полосе вдоль оси частоты, ширина которой определяется частотным диапазоном. Спектральная плотность сигналов, вызванная невозмущенным полем, локализуется в узких полосах, ширина которых

определяется временем наблюдения, а их наклон — параметрами движения источников. Такая конфигурация спектральных плотностей позволяет с минимальными искажениями регистрировать голограммы отдельных сигналов и восстанавливать по ним радиальные скорости и удаленности разрешаемых источников. Наиболее существенным фактором, определяющим разрешение сигналов, является малость пика голограммы, обусловленной интерференцией невозмущенного и возмущенного полей отдельных сигналов. Установлены критерии разрешения сигналов двух источников, опирающиеся на представление о непересечении их спектральных плотностей на голограмме. Критерии определяют условия разрешения сигналов в зависимости от передаточной функции среды распространения, радиальных скоростей и удаленности источников. На основе численного моделирования продемонстрировано возможность устранения на голограммах спектральных плотностей, обусловленных низкочастотными компонентами возмущенного поля. Показано, что при определенных условиях голографический метод с применением одиночного приемника способен разрешать два шумовых сигнала и определять с малой погрешностью параметры движущихся источников на фоне ИВВ, вызывающих горизонтальную рефракцию мод звукового поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Переселков СА, Кузькин ВМ. Голографическая обработка широкополосных гидроакустических сигналов. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023, 183 с.

2. Pereselkov SA, Kuz'kin VM. Interferometric processing of hydroacoustic signals for the purpose of source localization. *Journal of Acoustical Society of America*, 2022, 151(2):666-676.
3. Ehrhardt M, Pereselkov S, Kuz'kin V, Kaznacheev I, Rybyanets P. Experimental observation and theoretical analysis of the low-frequency source interferogram and hologram in shallow water. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 544:117388.
4. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Zvyagin VG, Malykhin Yu, Prosovetskiy DYU. Intense internal waves and their manifestation in interference patterns of received signals on oceanic shelf. *Physics of Wave Phenomena*, 2018, 26(2):160-167.
5. Badiy M, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Tkachenko SA. Intense internal waves and their manifestation in the interference patterns of received signals on oceanic shelf. Part II. *Phys. Wave Phenom.*, 2019, 27(4):313-319.
6. Kaznacheeva ES, Kuz'kin VM, Pereselkov SA. Interferometric processing of hydroacoustic information in the presence of intense internal waves. *Physics of Wave Phenomena*, 2021, 29(3):278-284.
7. Pereselkov S, Kuz'kin V, Ehrhardt M, Tkachenko S, Rybyanets P, Ladykin N. Three-dimensional modeling of sound field holograms of a moving source in the presence of internal waves causing horizontal refraction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(10):1922.
8. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Badiy M, Ladykin NV, Malykhin AYU, Tkachenko SA. Robustness of holographic processing of hydroacoustic signals in the presence of intense internal waves. *Physics of Wave Phenomena*, 2023, 31(5):346-354.
9. Казначеев ИВ, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Переселков СА. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. *Акустический журнал*, 2018, 64(1):33-45.
10. Кузькин ВМ, Переселков СА, Матвиенко ЮВ, Ткаченко СА. Обнаружение источника в диспергирующих средах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(3):337-344.
11. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Tkachenko SA, Matvienko YuV, Khvorostov YuA. Range of detection of underwater sound source. *Physics of Wave Phenomena*, 2023, 31(5):339-345.
12. Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Переселков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
13. Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Kaznacheev IV, Grigor'ev VA. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver. *Phys. Wave Phenom.*, 2017, 25(4):299-306.
14. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Kuznetsov GN, Kaznacheev IV. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver. *Physics of Wave Phenomena*, 2018, 26(1):63-73.
15. Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU. Direction finding of a noise sound source. *Physics of Wave Phenomena*, 2019, 27(3):237-241.
16. Кузькин ВМ, Переселков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Голографическая обработка движущихся источников в мелком море при наличии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(2):197-204.
17. Кузькин ВМ, Переселков СА, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Ладыкин НВ, Куцов МВ. Голографический метод локализации движущегося источника звука в присутствии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(3):317-326.
18. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Kaznacheeva ES. Mode selection in oceanic waveguides. *Physics of Wave Phenomena*, 2022, 30(2):111-118.
19. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Kaznacheeva ES, Tkachenko SA. Holographic method for mode selection in a shallow sea in the presence of intense internal waves. *Physics of Wave Phenomena*, 2022, 30(5):314-320.
20. Кузькин ВМ, Переселков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Выделение мод шумового источника в мелком море методом голографической

- интерферометрии в присутствии  
интенсивных внутренних волн.  
*РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы.*  
*Информационные технологии,* 2022,  
14(3):279-286.
21. Kuz'kin VM, Kuznetsov GN, Pereselkov  
SA, Grigor'ev VA. Resolving power of the  
interferometric method of source localization.  
*Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(2):150-159.
22. Бреховских ЛМ, Лысанов ЮП. *Теоретические  
основы акустики океана.* Л., Гидрометеиздат,  
1982, 264 с.
23. Тыщенко АГ, Козицкий СБ, Казак МС,  
Петров ПС. Современные методы расчета  
акустических полей в океане, основанные на  
их представлении в виде суперпозиции мод.  
*Акуст. журн.*, 2023, 69(5):620-636.

**Кузькин Венедикт Михайлович**

*д.ф.-м.н.*

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия

E-mail: kumiov@yandex.ru

**Переселков Сергей Алексеевич**

*д.ф.-м.н.*

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, 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

**Ткаченко Сергей Александрович**

*инженер*

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

E-mail: tkachenko.edu@yandex.ru

**Рыбьянец Павел Викторович**

*аспирант*

Воронежский государственный университет

1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия

E-mail: rybyanets.edu@yandex.ru

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.407

## Обеспечение функционирования графических GLX приложений на промышленном оборудовании с использованием API EGL

Татарчук И.А., Мамросенко К.А., Гиацингов А.М.

НИИ системных исследований РАН, Центр визуализации и спутниковых информационных технологий, <https://niisi.ru/>

Москва 117218, Российская Федерация

E-mail: [tatarchuk\\_ia@niisi.ras.ru](mailto:tatarchuk_ia@niisi.ras.ru), [mamrosenko\\_k@niisi.ras.ru](mailto:mamrosenko_k@niisi.ras.ru), [algts@niisi.ras.ru](mailto:algts@niisi.ras.ru)

Поступила 12.03.2024, рецензирована 19.03.2024, принята 23.03.2024

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

**Аннотация:** В работе рассматриваются вопросы функционирования программного обеспечения для решения инженерных задач в условиях ограниченной поддержки драйверами графического адаптера отдельных подсистем графического стека OS Linux. Показано, что инженерное и управляющее промышленным оборудованием ПО, подсистема визуализации которого использует API GLX будет требовать доработки для переноса на встраиваемые системы, использующие графические ускорители с драйверами поддерживающими только API EGL. Целью исследования является разработка подходов для обеспечения функционирования программного обеспечения, применяющегося на промышленном оборудовании и использующего API GLX, через API EGL в графической подсистеме ОС Linux. Рассмотрен метод трансляции вызовов GLX API в EGL API, определена его применимость. Разработан новый алгоритм организации взаимодействия между пользовательскими программами и графической подсистемой ОС Linux, позволяющим запускать приложения, использующие GLX API в условиях отсутствия поддержки DRI драйвером графического ускорителя. Проведено тестирование корректности работы алгоритма и проведено сравнение с результатами тестирования открытых драйверов с поддержкой DRI2. Полученные результаты позволят сократить затраты ресурсов на поддержку отдельных подсистем графических драйверов и осуществить "бесшовный" переход на использование EGL API во встраиваемых системах.

**Ключевые слова:** GLX, EGL, Xorg, Linux

УДК 004.454

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003 "Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов".

**Для цитирования:** Татарчук И.А., Мамросенко К.А., Гиацингов А.М. Обеспечение функционирования графических GLX приложений на промышленном оборудовании с использованием API EGL. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):407-418. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.407.

## Graphical GLX-applications functioning ensuring on industrial equipment using the EGL API

Ivan A. Tatarchuk, Kirill A. Mamrosenko, Alexander M. Giatsintov

Scientific Research Institute of System Analysis of the RAS, Center of Visualization and Satellite Information Technologies, <https://niisi.ru/>

Moscow 117218, Russian Federation

E-mail: [tatarchuk\\_ia@niisi.ras.ru](mailto:tatarchuk_ia@niisi.ras.ru), [mamrosenko\\_k@niisi.ras.ru](mailto:mamrosenko_k@niisi.ras.ru), [algts@niisi.ras.ru](mailto:algts@niisi.ras.ru)

*Received March 12, 2023, peer-reviewed March 19, 2023, accepted March 23, 2023.*

**Abstract:** This paper discusses the operation of engineering software on systems with graphics adapter drivers that provide limited to no support for certain graphics subsystems of Linux OS. The paper demonstrates that software with GLX API-based visualization subsystem needs modification to be ported to the embedded systems using graphics accelerators with drivers that support only the EGL API. The purpose of the study is to develop approaches for enabling the operation of software on industrial equipment and utilizing the GLX API via the EGL API of the Linux-based graphics subsystem. The paper discussed the method for translating GLX API calls to the EGL API and its applicability. A new algorithm has been developed for organizing interaction between user applications and the Linux OS graphics subsystem, which allows running applications with the GLX API in the absence of DRI support by the graphics accelerator driver. The correctness of the algorithm's operation has been tested and compared with the results of the tests of open drivers with DRI2 support. The findings will make it possible to reduce the resources needed to support individual graphics driver subsystems and make a smooth transition to using the EGL API in the embedded systems.

**Keywords:** GLX, EGL, Xorg, Linux

**UDC 004.454**

**Acknowledgments:** The work was carried out as part of national assignment for SRISA RAS (on the topic No. FNEF-2024-0003).

**For citation:** Ivan A. Tatarchuk, Kirill A. Mamrosenko, Alexander M. Giatsintov. Graphical GLX-applications functioning ensuring on industrial equipment using the EGL API. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3):407-418e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.407.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (408)
  2. АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ (409)
  3. ГРАФИЧЕСКАЯ ПОДСИСТЕМА ОС LINUX И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С НЕЙ (410)
    - 3.1. СПИСОК ТЕРМИНОВ (410)
    - 3.2. АРХИТЕКТУРА ПОДСИСТЕМЫ DRI И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С НЕЙ (410)
    - 3.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ DRI И X SERVER И ДРАЙВЕРА ГРАФИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ (412)
  4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМОЙ ОС LINUX (414)
  5. ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (415)
  6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (417)
- ЛИТЕРАТУРА (417)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больше микропроцессоров для встраиваемых систем оснащаются графическим ускорителем. Благодаря

росту производительности, усложняются и задачи, решаемые на данных системах. Такие микропроцессоры применяются при разработке приборных панелей, планшетных компьютеров, элементов систем интерфейса оператора промышленного оборудования и т.д. Для визуализации, к примеру, деталей, чертежей, схем производственных процессов на устройствах отображения промышленного оборудования зачастую необходимо использовать динамическое трёхмерное окружение, с частотой обновления не менее 25 кадров в секунду. В этом случае графический ускоритель должен иметь функции аппаратного ускорения 3D графики. Чаще всего последнее подразумевает наличие поддержки API OpenGL и OpenGL ES.

Взаимодействие программ, использующих ускорение вывода трёхмерной графики и операционной системы происходит не напрямую, а через несколько слоев абстракции графической подсистемы, каждый из которых имеет свой программный интерфейс. По историческим причинам, в ОС Linux для этого используется GLX (OpenGL's X extension) – API,

позволяющий использовать команды OpenGL в приложениях для X Window System.

Графический ускоритель в микропроцессоре может представлять собой проприетарный готовый СФ блок, драйвер которого поставляется разработчиком. В ряде случаев разработчики ориентируются на то, что их графический ускоритель будет использоваться в устройствах с мобильной ОС Android, поэтому поставляемый драйвер имеет реализацию интерфейса EGL (который есть и в Linux). EGL является основным интерфейсом доступа к графической подсистеме ОС Android, поскольку эта ОС не использует X Window System и GLX соответственно.

Поскольку ряд программных продуктов для визуализации, применяемых в промышленном оборудовании, САД-систем (напр. kiCAD) используют GLX, то появляется необходимость доработки ПО под API EGL, для запуска с драйверами без поддержки GLX. Последнее потребует определенных трудозатрат и в ряде случаев повторной сертификации.

Исходя из вышеизложенного следует, что представляет интерес разработка таких методов организации взаимодействия между пользовательскими программами и графической подсистемой ОС Linux, которые позволят запускать приложения, использующие GLX, через подсистему EGL. В последнее время, в публикациях появились сведения о новых методах организации взаимодействия пользовательских программ и графической подсистемы Linux, позволяющих запускать GLX приложения посредством API EGL. При этом описание методов не детализированное и требуется практическая проработка по внедрению их в программное обеспечение, реализующее графическую подсистему Linux.

Научная новизна настоящей работы заключается в разработанном алгоритме организации взаимодействия между пользовательскими программами и графической подсистемой ОС Linux, позволяющем запускать приложения, использующие GLX API в условиях отсутствия поддержки DRI драйвером графического ускорителя.

Настоящее исследование – попытка ответить на вопрос, каким образом обеспечить работу

приложений, использующих API GLX, через API EGL в графической подсистеме ОС Linux.

В разделе 2 приводится обзор работ, посвященных принципам организации и работе графической подсистемы ОС Linux. В разделе 3 приводится описание существующей архитектуры графической подсистемы и особенности запуска приложений в ней. В разделе 4 описывается разработанный алгоритм взаимодействия. Результаты практической проверки работы алгоритма и сравнительный анализ функциональных возможностей по запуску графических приложений приведены в разделе 5. Выводы и предложения по дальнейшему развитию приведены в Заключение.

## 2. АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ

По вопросам модернизации, защищенности, и оптимизации таких составных частей графической подсистемы ОС Linux как DRI и GLX исследования проводятся на протяжении последних 20 лет. В работе [1] авторы исследуют возможность по виртуализации ресурсов аппаратного видеоускорителя в веб-браузерах, при этом реализуя API GLX и API EGL для клиентских приложений, предпочитая первый последнему. Проводятся исследования по вопросам переноса с API GLX на API EGL приложений визуализации молекулярных соединений на суперкомпьютерах [2], для сокращения накладных расходов на работу X сервера. Вопрос реализации API GLX и способов оптимизации взаимодействия его с X сервером рассмотрены в [3], где авторы задаются вопросом сохранения состояний GLX контекста для обеспечения отказоустойчивости пользовательских приложений. Использование API EGL для написания приложений для встраиваемых систем на основе Linux освещено в [4] и [5]. Особенности портирования приложений, написанных на EGL API под Android на Linux для встраиваемых систем, возникающие из-за отличий в графическом стеке, рассматриваются в [6]. В работе [7] авторы показывают особенности реализации EGL в мобильных встраиваемых системах.

### 3. ГРАФИЧЕСКАЯ ПОДСИСТЕМА ОС LINUX И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С НЕЙ

#### 3.1. СПИСОК ТЕРМИНОВ

Для удобства восприятия текста настоящей работы, мы предлагаем следующие понятия:

- GLX – спецификация, разработанная SGI, и описывающая расширение OpenGL для X Window System.
- X server – реализация X Window System от разработчиков проекта X.org
- GLX API – программный интерфейс приложений, позволяющий использовать GLX. Через GLX API приложения получают доступ к возможностям аппаратного ускорения трехмерной графики.
- EGL – Khronos Native Platform Graphics Interface (платформонезависимый графический интерфейс). Аббревиатура EGL не расшифровывается. EGL является программным интерфейсом для доступа к возможностям аппаратного ускорения трехмерной графики из операционной системы.

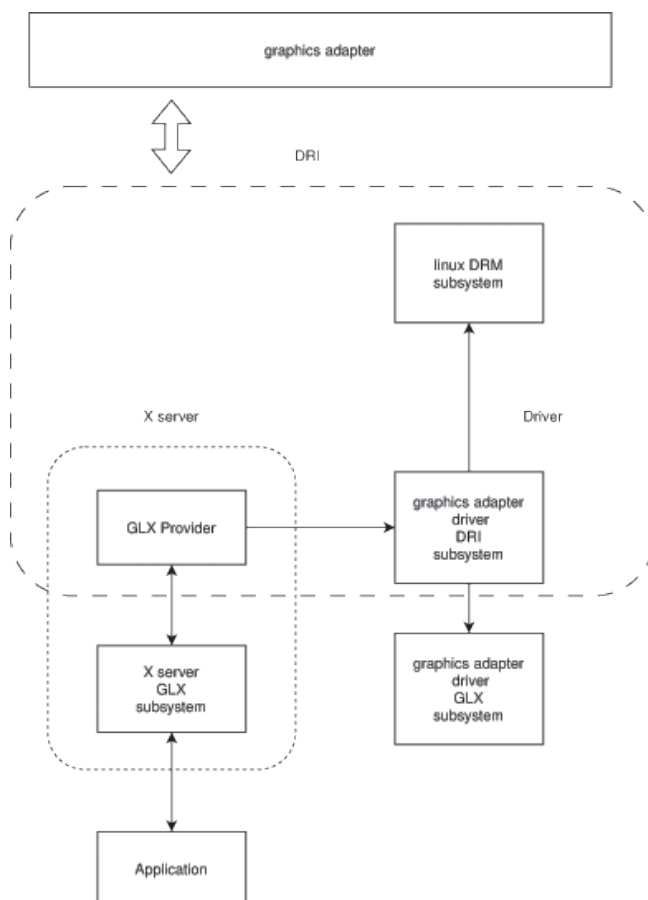
#### 3.2. АРХИТЕКТУРА ПОДСИСТЕМЫ DRI И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С НЕЙ

Подсистема DRI – не отдельная, в смысле группировки её исходного кода, подсистема Linux, как DRM (direct rendering manager), а совокупность интерфейсов между X server, драйвером графического ускорителя и самой DRM. Изначально подсистема DRI была разработана как часть проекта Xorg по созданию единого интерфейса доступа к ресурсам видеоускорителя, однако, впоследствии, DRI стала основой графической подсистемы Linux. Существует несколько версий подсистемы DRI – 1, 2 и 3. Первая версия считается устаревшей, поскольку в ней доступ к аппаратным ресурсам видеоускорителя предоставлялся одному приложению в исключительном порядке. Третья версия протокола значительно упростила многие операции, однако, подсистема GLX в X server по-прежнему использует протокол второй версии. Поэтому в настоящей работе мы будем исследовать именно DRI2. В качестве объекта для изучения непосредственно реализации

графического драйвера с DRI2 мы возьмем драйверы из проекта MESA.

Как видно из **Рис. 1** DRI включает в себя подсистему DRM [8], подсистему DRI графического драйвера и отдельную сущность под названием GLXProvider. GLX API реализуется двумя сущностями – подсистемой GLX в X server и подсистемой GLX драйвера. Подсистема GLX драйвера и подсистема GLX в X server не входят в DRI, но предоставляют интерфейс к ней. Каждая из представленных подсистем и сущностей, за исключением GLXProvider, представлена обособленной единицей трансляции, в виде разделяемой библиотеки. Взаимодействие между подсистемами GLX X server и подсистемой GLX драйвера происходит посредством протокола X11 и прямым вызовом функций из разделяемых библиотек драйвера [9]. Описание и особенности работы каждого из элементов архитектуры мы рассмотрим более подробно далее.

Для понимания принципов функционирования DRI2 следует вначале рассмотреть работу типового графического



**Рис. 1.** Архитектура подсистемы DRI и её компоненты.



приложения, использующего GLX API. Приложение использует GLX API следующим образом:

1. Подключается к дисплею (display) X server (функция XOpenDisplay из Xlib).
2. Запрашивает список поддерживаемых графическим драйвером расширений GLX (функция glXQueryExtensionsString).
3. Запрашиваются настройки отображения (функция XVisualInfo).
4. Создается буфер для вывода изображения (в спецификации такой объект называется GLXdrawable).
5. Создается GLX контекст, с полученными на этапе 3 настройками отображения.
6. Контекст привязывается к буферу для вывода изображения.
7. Выполняется формирование и вывод изображения в буфер.
8. Контекст "разрушается" в конце работы программы.

**Примечание:** Расширения GLX – это дополнения к спецификации GLX, которые реализуют различный функционал драйверов по формированию изображений. Возможность добавлять и использовать такие расширения в драйверах графических ускорителей была введена в спецификации GLX версии 1.1. Производители видеоускорителей изначально закладывали свои собственные (проприетарные) расширения в драйверы. Некоторые из них стали фактически стандартными и в настоящее время их поддержка является обязательной.

Для создания контекста используется функция из GLX API - glXCreateContext. По соглашению, предложенному разработчиками X.org, далее внутри glXCreateContext происходит вызов функции \_\_glXInitialize. Вызов \_\_glXInitialize позволяет драйверу выполнить следующие действия:

- Запросить список расширений GLX подсистемы X сервера, и запросить версию DRI от GLX подсистемы X сервера;
- загрузить DRI части драйвера графического ускорителя;
- инициализировать структуру, описывающую дисплей, и передать ее приложению.

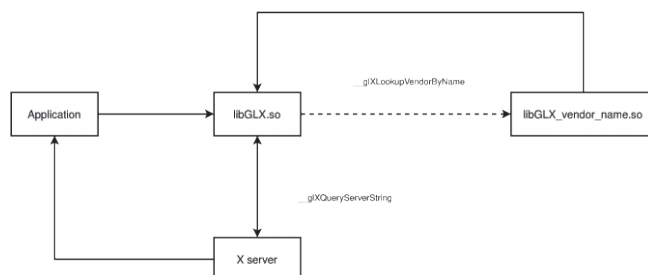
Имя разделяемой библиотеки, описывающей DRI подсистему драйвера обычно состоит из

идентификатора типа "vendor\_name" + "\_dri.so". По соглашению разработчиков, подсистема DRI драйвера обязана иметь функции с именами \_driCreateScreen и \_\_driCreateNewScreen. При загрузке библиотеки в структуре, описывающей дисплей, передаются указатели на функции создания и удаления буферов отрисовки (glXDrawables) и т.д., которые будут вызываться при работе приложения с конкретным экраном в режиме аппаратного ускорения.

Для понимания реализации подсистем в GLX драйвере и X server следует рассмотреть работу и использование самого GLX API. К настоящему моменту времени в Linux используется так называемый общий (shared) графический стек [10]. Общий стек – это такой стек, в котором для каждого экрана (screen) X server привязывается отдельный графический драйвер (в случае если их несколько). Такая возможность обеспечивается библиотекой libglvnd. Название libglvnd представляет собой акроним - "GL vendor neutral dispatch library", что можно перевести как "библиотека трансляции функций API OpenGL, независимая от драйвера". Библиотека libglvnd предоставляет пользовательским программам возможность использовать единый бинарный интерфейс функций OpenGL, GLX и OpenGL ES, путем составления таблицы трансляций вызовов функций из своих разделяемых библиотек в аналогичные функции, который предоставляют драйверы производителей видеоускорителей.

Схема взаимодействия приложения, libglvnd и разделяемых библиотек драйверов, показана на **Рис. 2**.

Когда приложение обращается к GLX API, оно обращается к функциям GLX API (описанных в glx.h) из разделяемой системной библиотеки libGLX.so, которая является частью libglvnd. После вызова функции из GLX API,



**Рис. 2.** Функциональная схема взаимодействия приложения с libglvnd.

внутри `libGLX.so` происходят следующие действия:

- При загрузке библиотеки, посредством расширения компилятора GCC "`__attribute__((constructor))`", проверяется наличие переменной окружения "`__GLX_VENDOR_LIBRARY_NAME`", которая определяет имя разделяемой библиотеки подсистемы GLX драйвера.
- Если такая переменная окружения не существует, то при вызове функции из GLX API происходит процедура определения значения переменной `glx-vendor`. Эта переменная хранит имя драйвера графического ускорителя, которое чаще всего совпадает с именем компании производителя. Процедура определения значения `glx-vendor` заключается в общем случае в следующем: получив от X server данные о дисплее и экране, `libglvnd` извлекает значение `glx-vendor` через вызов функции `__glXQueryServerString` с параметром `GLX_VENDOR_NAMES_EXT`.
- Определив значение `glx-vendor`, библиотека `libglvnd` осуществляет загрузку разделяемой библиотеки конкретного драйвера, которая определяет реализация подсистемы GLX драйвера. Через функцию `__glXLookupVendorByName` загружается конкретная разделяемая библиотека, после чего `libglvnd` и формирует таблицу с указателями на функции с реализацией GLX API в подсистеме GLX драйвера.

### 3.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ DRI И X SERVER И ДРАЙВЕРА ГРАФИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Как видно из Рис. 2 X server определяет какой графический драйвер привязан к конкретному экрану. Можно сделать вывод, что X server содержит в себе GLX сервер, а приложение, использующее GLX API, является клиентом. В этом случае для полного понимания работы GLX в DRI2 будет полезным описать, как X server привязывает конкретный графический драйвер к определенному экрану [11].

Известно, что архитектура X server является расширяемой. Расширяемость организуется за счет подгрузки разделяемых библиотек, реализующих ту или иную функциональность. Такие библиотеки называются модулями X server. Модуль GLX, представляющий собой подсистему

GLX сервера, реализован в разделяемой библиотеке `libglx.so`. Программный интерфейс библиотеки `libglx.so` представлен структурой `glxModuleData` типа "`XF86ModuleData`". Структура содержит указатель на функцию инициализации модуля – `glxsetup`. Функция `glxsetup` выполняет поиск экземпляра структуры `GLXprovider` с именем `__glXDRI2Provider`. Структура `GLX_provider` – это абстрактный класс данных, который предоставляет X серверу интерфейс для установления взаимодействия с подсистемой GLX конкретного драйвера. `__glXDRI2Provider` хранит указатель на функцию подключения экрана (в настоящей реализации она имеет имя `glxScreenProbe`). При обнаружении экземпляра структуры с обозначенным именем она добавляется в связный список через функцию `GlxPushProvider`, в котором хранятся ссылки на иные возможные экземпляры `GLXprovider`.

После нахождения экземпляра `GLXprovider`, вызывается функция `xorgGlxCreateVendor`, которая добавляет указатель на функцию `xorgGlxServerInit` в связный список функций, которые будут вызываться при загрузке подсистемы GLX X server. Можно считать что после этого происходит регистрация `GLXprovider` в качестве единственного интерфейса к подсистеме GLX. На этом этапе X server выводит сообщение о том, что расширение подключено, но еще не проинициализировано: "Extension "GLX" is enabled". *Примечание:* под подключением расширения, следует понимать, что X server осуществил успешную загрузку модуля, что означает, что функция инициализации модуля найдена, но её вызов пока отложен.

После подключения и инициализации всех оставшихся расширений, X server начинает инициализацию модуля GLX, и, соответственно, инициализацию подсистемы GLX посредством вызова функции `xorgGlxServerInit`. В этой функции происходит создание и привязка экрана к конкретному графическому драйверу. Перед этим происходит проверка на то, что инициализация хотя бы одного `GLXprovider` из списка уже произведена. Создание нового экрана происходит через вызов функции `glxScreenProbe` из структуры `__glXDRI2Provider`, и осуществляется следующим образом:

- Выделяется память под новый экземпляр абстрактного класса, описывающего экран, который создается через DRI;
- Для экрана, осуществляется привязка функций по созданию экрана, буферов и их удалению.
- Проверяется наличие возможности использования DRI2 для нового экрана, и имя драйвера графического ускорителя, поддерживающего работу по DRI2.
- Загружается расширяемая библиотека с подсистемой glx драйвера.
- Вызывается функция создания нового экрана из GLX подсистемы драйвера.

Если экран успешно создан, выводится сообщение "AIGLX: Loaded and initialized <driverName>". Разработчики X server ввели термин AIGLX (accelerated indirect) GLX, которым описывается способ организации взаимодействия GLX подсистемы X server и подсистемы DRI. К настоящему моменту времени AIGLX является единственным способом их взаимодействия. После создания экрана, X server выводит сообщение "GLX: Initialized DRI2 GL provider for screen 0", которое говорит, что для экрана с определенным номером осуществляется графическое ускорение посредством GLX Provider с именем "DRI2 GL". Аналогично для программного рендеринга GLX Provider имеет название IGLX (indirect GLX).

Так описывается взаимодействие приложения, использующего GLX API, подсистемы GLX X server и подсистемы GLX графического драйвера. Поскольку в настоящем описании не затронуты взаимодействия с DRI с DRM, то, для полноты понимания графического стека Linux, следует описать и этот аспект.

При загрузке модуля GLX сам X server уже имеет сведения об имени графического ускорителя, чей драйвер поддерживает работу с DRI. Эти сведения X server получает при загрузке модуля modesetting. При загрузке модуля modesetting происходит инициализация компонентов DRI2 в X server. В процессе загрузки модуля modesetting вызывается функция, чей адрес расположен в переменной pScrn->ScreenInit. В этой функции происходит инициализация подсистемы аппаратного ускорения glamor (при ее задействовании). Glamor дает X server возможность использовать

аппаратное ускорение вывода трехмерной графики при отображении элементов двумерного интерфейса. Glamor представляет собой отдельный модуль X server, и позволяет самому X server создавать буферы для вывода изображений окон и т.д. Glamor может работать как через API OpenGL, так и через API OpenGL ES[10].

После этого начинается инициализация подсистемы DRI2, которая проходит следующим образом:

- Если драйвер поддерживает EGL (что необходимо для запуска glamor), то имя драйвера запрашивается посредством расширения EGL\_MESA\_query\_driver.
- Если такого расширения нет, то X server определяет имя устройства видеоускорителя сам, посылая запрос в DRM (поиск идет по имени в дереве устройств /dev, которое прописывается в настроечный файл xorg.conf).
- Проверяется факт авторизации (проверка наличия уникального числа – ключа для доступа к аппаратным ресурсам устройства) драйвера в DRM согласно DRI2.
- Определяются допустимые параметры экрана.
- По завершении инициализации DRI2 выводится сообщение "[DRI2] Setup complete".

Исходя и вышеописанного можно сделать следующие выводы:

- В настоящее время X server по умолчанию использует EGL для запуска подсистемы аппаратного ускорения glamor.
- Подсистема DRI2 запускается уже после инициализации glamor и представляет собой слой абстракции для загрузки и привязки драйвера графического ускорителя к экрану.
- Пользовательские графические приложения, использующие GLX API, получают доступ к ресурсам графического ускорителя посредством X server.
- Драйверу графического ускорителя для обеспечения GLX API пользовательских приложений, необходимо иметь две расширяемые библиотеки с реализацией GLX и DRI подсистем.

Исходя из приведенного выше, можно формализовать алгоритм взаимодействия

между пользовательскими приложениями и графической подсистемой ОС Linux. Алгоритм который используется в настоящий момент времени выглядит так:

Шаг 1. Если во время запуска X server, при загрузке модуля GLX X server, представляющего собой разделяемую библиотеку, в нем обнаружена структура `__glXDRIPROVIDER`, то поместить указатель на неё в связный список, содержащий указатели на `GLXprovider`, иначе перейти на шаг 5.

Шаг 2. Произвести поиск драйвера графического ускорителя, поддерживающего DRI2, и загрузить разделяемую библиотеку, содержащую GLX подсистему драйвера.

Шаг 3. Создать экран (screen) с допустимыми параметрами посредством функции создания экрана из подсистемы GLX драйвера.

Шаг 4. Вывести сообщение об успешной загрузке подсистемы GLX драйвера посредством `AIGLX` и перейти к шагу 6.

Шаг 5. Осуществить загрузку структуры `__glXDRISWRastProvider`, которая предоставит возможность загрузить подсистему GLX драйвера, реализующего программный рендеринг.

Шаг 6. Запустить приложение, использующее GLX API

#### 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ И ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМОЙ ОС LINUX

Повсеместное распространение ОС Android послужило причиной того, что при разработке графических драйверов для видеоускорителей, производители не обеспечивают поддержку GLX и DRI, ограничиваясь реализацией поддержки EGL. В этом случае использование большей части графических приложений под X server становится затруднительным. При этом, сам X server использует EGL для ускорения отрисовки оконного интерфейса через `glamor`.

Для решения проблемы запуска Linux приложений, написанных с использованием GLX, с драйверами, в которых не реализована подсистема DRI, американский исследователь Адам Джексон (Adam Jackson) предложил использовать метод трансляции вызовов GLX API в EGL API, который имеет название

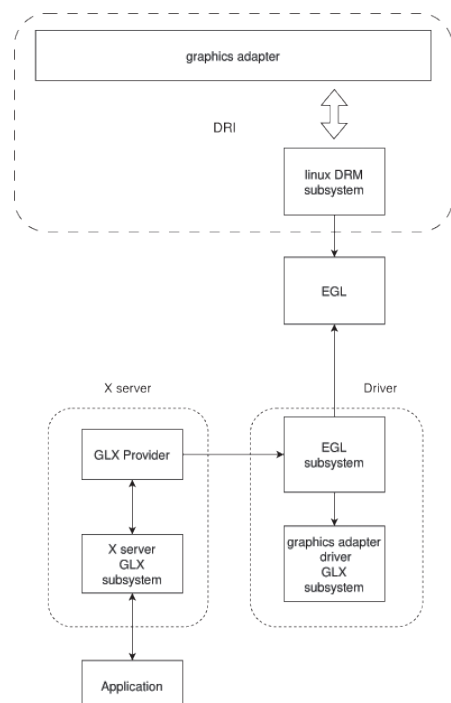
"GLX-EGL adapter". Такой метод Адам Джексон уже использовал в Xwayland, проекте по обеспечению совместимости X server и оконной системы Wayland.

Суть метода "GLX-EGL adapter" заключается в следующем: основная функция `glxScreenProbe` заменяется `egl_screen_probe`, в которой для создания экрана и буферов обращение идет не к подсистеме DRI драйвера, а к EGL. Таким образом, для работы GLX приложения необходима лишь GLX подсистема драйвера, а DRI подсистема не требуется – см. **Рис. 3.**

Создание нового экрана в функции `egl_screen_probe` осуществляется следующим образом:

- Выделяется память под новый экземпляр абстрактного класса, описывающего экран, которые создается через `glamor`.
- Для экрана, осуществляется привязка функций по созданию экрана, буферов и их удалению. Здесь следует отметить одну из главных особенностей решения, предлагаемого Джексонном: в функции для создания буфера вывода и т.п. осуществляется привязка к EGL API вместо GLX API.

Таким образом, благодаря методу "GLX-EGL adapter" отпадает необходимость в реализации DRI подсистемы драйвера.



**Рис. 3** Архитектура графического стека при использовании "GLX-EGL adapter".

Предложенный Джексонем метод описан как потенциально реализуемый, но не приводятся конкретные алгоритмы, способы их реализации в коде X server, результаты тестирования. Поэтому в настоящей работе приведен алгоритм организации взаимодействия между пользовательскими программами и графической подсистемой ОС Linux, позволяющий запускать приложения, использующие GLX API в условиях отсутствия поддержки DRI драйвером графического ускорителя.

В реализации метода "GLX-EGL adapter" создается еще один экземпляр структуры GLXprovider, под именем glamor\_provider. Для того, что бы X server смог загрузить нужный нам GLXprovider, необходимо добавить glamor\_provider в связанный список с помощью функции GlxPushProvider. Однако необходимо, чтобы glamor\_provider оказался в начале списка, и далее происходил вызов xorgGlxCreateVendor. Очевидно, что регистрация glamor\_provider должна происходить до регистрации \_\_glXDRI2Provider. Поэтому следует определить конкретное место в коде X server, где стоит непосредственно производить регистрацию glamor\_provider. Авторы считают, что регистрацию glamor\_provider следует проводить при инициализации подсистемы glamor, до загрузки самого модуля GLX. Такой подход позволит снизить связность между единицами трансляции, в частности, модулями GLX и glamor и осуществлять инициализацию glamor\_provider только тогда, когда используется сам glamor. Последнее актуально в том случае, если имеется необходимость отключать сам модуль glamor.

Исходя из вышеизложенных соображений по glamor\_provider, следует внести изменения в уже существующий и изложенный выше алгоритм взаимодействия между пользовательскими приложениями и графической подсистемой ОС Linux. Таким образом, обновленный алгоритм, который авторы предлагают, выглядит так:

Шаг 1. Во время загрузки модуля glamor, поместить указатель на glamor\_provider в связанный список, содержащий указатели на GLXprovider.

Шаг 2. Создать экран (screen) с допустимыми параметрами посредством функции создания экрана из glamor.

Шаг 3. Вывести сообщение об успешной загрузке подсистемы GLX драйвера посредством glamor\_provider.

Шаг 4. Запустить приложение, использующее GLX API.

Следует отметить, что предложенный алгоритм не нарушает функционирование предыдущего, в том смысле, что загрузка glamor\_provider осуществляется до \_\_glXDRI2Provider, и при отсутствии необходимости использовать glamor будет использоваться \_\_glXDRI2Provider.

## 5. ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки работоспособности метода, и соответственно, предложенного алгоритма, следует определить, что именно и как будет проверяться, а также как оценивать результаты. Процесс проверки работоспособности метода будет заключаться в проведении эксперимента по запуску GLX приложений. В такой тривиальной постановке эксперимента следует поднять вопрос – а успешный запуск какого приложения будет являться достаточным для подтверждения результата? Авторы предлагают рассматривать проверку работоспособности предложенного алгоритма как тестирование ПО. Таким образом, следует составить тест-план для проведения тестирования X server с нашими изменениями. В качестве рекомендаций по написанию плана тестирования мы будем использовать стандарт IEEE 829-1998.

Согласно стандарту следует определить сам объект тестирования и функции которые будут протестированы. В нашем случае объектом тестирования является графическая подсистема ОС Linux. Мы будем тестировать новую функцию графической подсистемы – запуск приложений, использующих API GLX посредством glamor\_provider. Последнее можно еще более конкретизировать – мы будем тестировать функцию взаимодействия подсистемы GLX X server и подсистемы GLX графического драйвера.

Далее стандарт предлагает выбрать подход к тестированию. Он заключается в выборе методики проведения тестирования и методики анализа результатов. Существует набор тестов

для GLX подсистемы драйвера – группа тестов категории GLX из набора тестов Piglit. Piglit – набор тестов для графических драйверов, написанных под ОС Linux, ранее входивший в состав проекта Mesa, а позже вынесенный из его кодовой базы. Каждый тест представляет собой приложение, использующее API GLX для проверки отдельных положений спецификации.

Методика анализа результатов будет заключаться в сравнительном анализе результатов тестирования драйвера графического ускорителя (драйвер 1), который не имеет поддержки DRI2, и драйвера с открытым исходным кодом из проекта Mesa, результаты тестирования которого мы будем считать эталонными (драйвер 2).

В драйвере 1 реализована подсистема GLX API, схожая с реализацией в MESA, но не идентичная ей. В качестве драйвера 2 будет использоваться драйвер Nouveau из Mesa. Версия X server - 1.20.13.

Результаты тестирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1

## Результаты тестирования

Имя теста	Драйвер 1, результаты	Драйвер 2, результаты
glx-buffer-age	–	+
glx-close-display	+	+
glx-context-flush-control	–	–
glx-copy-sub-buffer	–	+
glx-create-context-both-es-strings	+	+
glx-create-context-core-profile	+	+
glx-create-context-current-no-framebuffer	–	+
glx-create-context-default-major-version	+	+
glx-create-context-default-minor-version	+	+
glx-create-context-ext-no-config-context	–	–
glx-create-context-indirect-es2-profile	–	+
glx-create-context-invalid-attribute	–	+
glx-create-context-invalid-es-version	–	–
glx-create-context-invalid-flag	–	–
glx-create-context-invalid-flag-forward-compatible	–	+
glx-create-context-invalid-gl-version	–	+
glx-create-context-invalid-profile	–	+
glx-create-context-invalid-render-type	–	+
glx-create-context-invalid-render-type-color-index	–	+
glx-create-context-invalid-reset-strategy	*	–
glx-create-context-no-error	–	–
glx-create-context-pre-GL32-profile	+	+
glx-create-context-require-robustness	*	+

glx-create-context-valid-attribute-empty	–	+
glx-create-context-valid-attribute-null	–	+
glx-create-context-valid-flag-forward-compatible	+	+
glx-destroycontext-1	+	+
glx-destroycontext-2	+	+
glx-destroycontext-3	+	+
glx-dont-care-mask	+	+
glx-egl-switch-context	+	+
glx-fbconfig-bad	+	+
glx-fbconfig-compliance	+	+
glx-fbconfig-sanity	+	+
glx-fbo-binding	+	+
glx-free-context	–	–
glx-get-context-id	–	–
glx-get-current-display-ext	–	–
glx-import-context-has-same-context-id	–	–
glx-import-context-multi-process	–	–
glx-import-context-single-process	–	–
glx-make-current	–	–
glx-make-current-multi-process	–	–
glx-make-current-single-process	–	–
glx-make-glxdrawable-current	+	+
glx-multi-context-front	–	+
glx-multi-context-ib-1	–	+
glx-multi-context-single-window	–	+
glx-multithread	–	+
glx-multithread-buffer	–	+
glx-multithread-buffer-refcount-bug	–	+
glx-multithread-clearbuffer	–	–
glx-multithread-makecurrent-1	–	–
glx-multithread-makecurrent-2	–	–
glx-multithread-makecurrent-3	–	–
glx-multithread-makecurrent-4	–	–
glx-multithread-shader-compile	+	–
glx-multithread-texture	+	–
glx-multi-window-single-context	+	–
glx-oml-sync-control-getmscstate	–	+
glx-oml-sync-control-swapbuffersmsc-divisor-zero	–	+
glx-oml-sync-control-swapbuffersmsc-return	–	+
glx-oml-sync-control-timing	–	+
glx-oml-sync-control-waitformsc	–	+
glx-pixmap-13-life	–	+
glx-pixmap-crosscheck	–	+
glx-pixmap-life	+	+
glx-pixmap-multi	–	+
glx-query-context-info-ext	–	–
glx-query-drawable	+	+
glx-query-renderer-coverage	–	+
glx-shader-sharing	–	+

**Таблица 1, продолжение**  
Результаты тестирования

Имя теста	Драйвер 1, результаты	Драйвер 2, результаты
glx-string-sanity	+	+
glx-swap-copy	-	+
glx-swap-event	-	+
glx-swap-exchange	-	-
glx-swap-pixmap	+	+
glx-swap-pixmap-bad	+	+
glx-swap-singlebuffer	+	+
glx-ftp	+	+
glx-visuals-depth	+	+
glx-visuals-stencil	-	+
glx-window-life	-	+

Примечание: под результатом, помеченным "\*", понимается то, что конкретная версия X server не поддерживает GLX расширение, необходимое для работы теста, о чем было получено соответствующее сообщение. Последнее объясняется тем, что тестирование драйвера 1 и драйвера 2 происходило на одинаковых версиях X server, но собранных под разные архитектуры.

Те тесты, для которых результат помечен как "-", считаются завершившими свое выполнение с ошибкой. При этом мы не будем разделять, результаты типа "fail" и "skipped" или сообщение об ошибке драйвера.

Проведя анализ представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Существующая версия драйвера nouveau реализует не все возможности GLX API. Это свидетельствует о том, что полная поддержка всех возможностей GLX и граничных случаев при использовании API GLX пока не реализована даже в проекте Mesa.

2. Как видно, практически всегда (отдельные случаи мы рассмотрим ниже), когда тест завершается ошибкой при тестировании драйвера 1, точно такое же поведение демонстрирует и драйвер 2.

3. Группа тестов с префиксом "glx-oml-sync-" завершается с ошибкой на драйвере 1 по причине того, что все они требуют GLX расширение "GLX\_OML\_sync\_control", поддержка которого в настоящий момент времени отключена. Аналогичная причина ошибочного результата и по некоторым другим тестам.

Поскольку большая часть тестов GLX для драйвера 1 демонстрирует результат, совпадающий с результатами тестирования драйвера 2, можно считать, что в результате внедрения разработанного алгоритма взаимодействия между пользовательскими приложениями и графической подсистемой ОС Linux стало возможным запускать приложения, написанные с использованием GLX API в условиях отсутствия поддержки DRI драйвером графического ускорителя.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм может быть использован при проектировании драйверов новых графических ускорителей. Результаты исследования могут позволить разработчикам драйверов графических ускорителей сократить время разработки за счет отказа от реализации DRI2 подсистемы, поскольку разработанный алгоритм позволит запускать приложение, использующее GLX API через EGL.

Полученные результаты позволят сократить затраты ресурсов на поддержку отдельных подсистем графических драйверов и осуществить "бесшовный" переход на использование EGL API во встраиваемых системах.

Разработанный алгоритм обеспечит запуск приложений, написанных с использованием GLX API во встраиваемых системах на основе ОС Linux с драйверами без поддержки DRI2. Представлено формальное описание алгоритма и проведено тестирование его работы.

Дальнейшие исследования возможны в направлении улучшения работы метода в направлении обеспечения полного прохождения тестов piglit.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhihao Y, Zongheng M, Yingtong L, Ardan S, Chandramowlishwaran A. Sugar: Secure GPU Acceleration in Web Browsers. *ACM SIGPLAN Notices*, 2018, 53(2):519-534. <https://doi.org/10.1145/3296957.3173186>.
2. Stone JE, Messmer P, Sisneros R, Schulten K. High performance molecular visualization: In-situ and parallel rendering with EGL. *International Parallel and Distributed Processing Symposium workshops IEEE*, 2016. <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2016.127>.

3. Hou D, Gan J, Li Y, Yazami YE, Jain T. Transparent Checkpointing for OpenGL Applications on GPUs. *ArXiv*, 2021. abs/2103.04916.
4. Volk AO, Ivanova VA, Syschikov AYu, Sedov BN. The Indicators Framework for Developing Display Systems. *Proc. Conf. "Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems" (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131477.
5. Wang L, Jia H, Zhang Y, Li K, Wei C, EgpuIP: An Embedded GPU Accelerated Library for Image Processing. *IEEE 24th Int Conf on High Performance Computing & Communications; 8th Int Conf on Data Science & Systems; 20th Int Conf on Smart City; 8th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys)*, Hainan, China, 2022, pp. 914-921, doi: 10.1109/HPCC-DSS-SmartCity-DependSys57074.2022.00147.
6. Li Y, Zhang S, Li J, Xi H, Dong T, Du Z. Research on Operating System Migration Method Based on Domestic Embedded Devices. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2171(1):012067. DOI 10.1088/1742-6596/2171/1/012067
7. Gao D, Lin H, Li Z, Liu Y, Qian F. Trinity: high-performance and reliable mobile emulation through graphics projection. *16th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 22)*, 2022, pp. 285-301. <https://doi.org/10.1145/3643029>
8. Qin P, Xia Z, Guoxian G, Xiaofang T, Li G. GPU-Based In Situ Visualization for Large-Scale Discrete Element Simulations. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, Volume (2022). DOI: 10.1155/2022/3485505.
9. Nakhon B, Kwan-Hee Y. An accelerated rendering scheme for massively large point cloud data. *The Journal of Supercomputing*, 2020, 76:8313-8323. DOI: 10.1007/s11227-019-03114-y.
10. Путин KB, Гиацинтов AM, Мамросенко КА. Графический стек для Linux на базе OpenGL ES, glvnd и Glamor. *Вычислительные технологии*, 2023, 28(1):89-102; doi: 10.25743/ICT.2023.282.008'
11. Young KZ. Unicon's OpenGL 2D and Integrated 2D/3D Graphics Implementation, 2020. <http://unicon.org/reports/young.pdf>.

**Татарчук Иван Александрович**

младший научный сотрудник

НИИ Системных исследований РАН

**36/1, Нахимовский просп., Москва 117218, Россия**

**E-mail: rilian@niisi.ras.ru**

**Мамросенко Кирилл Анатольевич**

к.т.н., руководитель Центра

НИИ Системных исследований РАН

**36/1, Нахимовский просп., Москва 117218, Россия**

**E-mail: mamrosenko\_k@niisi.ras.ru**

**Гиацинтов Александр Михайлович**

к.т.н., старший научный сотрудник

НИИ Системных исследований РАН

**36/1, Нахимовский просп., Москва 117218, Россия**

**E-mail: algts@niisi.ras.ru**



DOI: 10.17725/rensit.2024.16.419

## Динамическое использование спектра в LTE и NR для развертывания 5G

Нидхи Шарма, Приянка Ахлават, Раджеш К. Аггарвал

Национальный технологический институт Курукшетра, <https://www.nitkkr.ac.in/>

Курукшетра-136119, Харьяна, Индия

E-mail: [scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com](mailto:scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com), [priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in](mailto:priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in), [rka15969@gmail.com](mailto:rka15969@gmail.com)

Поступила 14.08.2023, рецензирована 21.08.2023, принята 28.08.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

**Аннотация:** Как статическое распределение частотного спектра, развернутое в 4G-LTE, так и динамически настраиваемые каналы физического уровня 5G NR не удовлетворяют требованиям текущего экспоненциального роста числа пользователей беспроводной связи. Поскольку 5G NR будет работать лучше в сценариях прямой видимости (LOS), в то время как 4G-LTE обеспечивает замечательную производительность в сценариях отсутствия прямой видимости (NLOS). Динамическое совместное использование спектра (DSS) позволяет операторам одновременно запускать LTE и 5G NR в одном диапазоне. Эта статья иллюстрирует взаимосвязь и рабочую теорию динамического разделения спектра, чтобы понять, как последний стандарт 5G приведет к существенному улучшению средней пропускной способности пользователя и повышению эффективности сети. Это попытка предложить общую структуру для первоначального развертывания сети 5G.

**Ключевые слова:** динамическое совместное использование спектра, реформирование, орган по стандартизации, включение спектра, развертывание 5G, клубное лицензирование  
УДК 004.03

*Для цитирования:* Нидхи Шарма, Приянка Ахлават, Раджеш К. Аггарвал. Динамическое использование спектра LTE и NR для развертывания 5G. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):419-432. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.419.

## Dynamic Spectrum Sharing: A Quick fix to 5G deployment

Nidhi Sharma, Priyanka Ahlawat, Rajesh K. Aggarwal

National Institute of Technology Kurukshetra, Department of Computer Engineering, <https://www.nitkkr.ac.in/>

Kurukshetra-136119, Haryana, India

E-mail: [scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com](mailto:scholar.nidhisarmanidhi@gmail.com), [priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in](mailto:priyanka.ablawat@nitkkr.ac.in), [rka15969@gmail.com](mailto:rka15969@gmail.com)

Received August 14, 2023, peer-reviewed August 21, 2023, accepted August 28, 2023

**Abstract:** Both Static allocation of the frequency spectrum as deployed in 4G-LTE as well as dynamically configured 5G NR physical layer channels does not satisfy the demand of current exponential growth of wireless users. As 5G NR will perform better in Line of Sight (LOS) scenarios while 4G-LTE provides remarkable performance in non-Line of sight (NLOS) scenarios. Dynamic Spectrum Sharing (DSS) allows operators to run LTE and 5G NR on the same band simultaneously. This paper illustrates the relationship and working theory of Dynamic Spectrum Sharing to comprehend how the latest 5G standard will result in a substantial improvement in average user throughput and improved network efficiencies. This is an effort to propose a generic framework to initial Deployment of 5G network.

**Keywords:** Dynamic Spectrum Sharing, Reframing, Standardization Authority, Spectrum Actuation, 5G deployment, club licensing

UDC 004.03

*For citation:* Nidhi Sharma, Priyanka Ahlawat, Rajesh K. Aggarwal. Dynamic Spectrum Sharing: A quick fix to 5G deployment. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):419-432e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.419.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (420)
  2. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G (421)
  3. СПЕКТР ИЛИ КАНАЛ (421)
    - 3.1. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (422)
    - 3.2. ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРА (422)
    - 3.3. СПЕКТР АУКЦИОН (422)
    - 3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 5G, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К СПЕКТРУ И ИНФРАСТРУКТУРЕ (423)
    - 3.5. ВЕРОЯТНЫЙ ПОДХОД К СОВМЕСТНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПЕКТРА ДЛЯ 5G (423)
  4. СТАНДАРТИЗАЦИЯ 3GPP (424)
    - 4.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ 5G (424)
    - 4.2. ДИНАМИЧЕСКОЕ СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (DSS) КАК УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЕХА В РАЗВИТИИ 5G (424)
    - 4.3. ВОЗМОЖНОСТИ 5G ОТ DSS (424)
    - 4.4. ОБЫЧНО ОБСУЖДАЮТСЯ ТРИ СХЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G (425)
    - 4.5. ТРЕБОВАНИЯ К РАДИОЧАСТОТАМ DSS И ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕРКИ (425)
  5. ПРИНЦИП РАБОТЫ DSS (425)
    - 5.1. ТЕХНИКА MBSFN (МНОГОАДРЕСНАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ) (426)
    - 5.2. ТЕХНИКА НЕ-MBSFN (426)
  6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СОВМЕСТНОГО СПЕКТРА И СООБРАЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТИ (426)
  7. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ DSS (427)
    - 7.1. ВЛИЯНИЕ DSS НА LTE И 5G NR (428)
    - 7.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ 5G (429)
  8. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ (429)
    - 8.1. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОСТАВЩИКОВ (429)
    - 8.2. DSS – ЭТО РАННЯЯ ФУНКЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕТЕЙ 5G (429)
  9. БУДУЩИЕ ОБЪЕМЫ (430)
    - 9.1. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (430)
    - 9.2. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕГРАЦИИ BLOKCHAIN-5G (430)
- ЛИТЕРАТУРА (431)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

5G — это технология связи пятого поколения, способная обеспечить сверхвысокие скорости с улучшенной масштабируемостью, уменьшенной задержкой и более высокой надежностью. 5G-NR способен обрабатывать до одного миллиона устройств на км<sup>2</sup>, тогда как 4G-LTE может поддерживать только одну десятую пропускной способности 5G-NR. 5G-NR будет использоваться для промышленного интернета вещей (IoT) для обеспечения тактильных ощущений в обычных случаях использования в повседневных приложениях.

Основным преимуществом сетей 5G-NR является более высокая пропускная способность и более высокая скорость загрузки до 10 Гбит/с за счет использования спектра миллиметровых волн (30–300 ГГц). Ожидается, что из-за увеличения пропускной способности сети 5G-NR будут обслуживать не только сотовые телефоны, но также могут использоваться в качестве обычных интернет-провайдеров (ISP) на ноутбуках и настольных компьютерах.

Сети 5G в настоящее время работают в трех диапазонах частот — низком, среднем и высоком — для широкого спектра приложений. Сеть 5G будет включать в себя до трех различных типов сотовых сетей, каждая из которых требует определенной конструкции антенны, каждая из которых имеет свой компромисс между загрузкой, расстоянием и зоной обслуживания [3]. Самая высокоскоростная антенна в пределах диапазона текущей сети подключается к мобильным телефонам 5G и беспроводным устройствам.

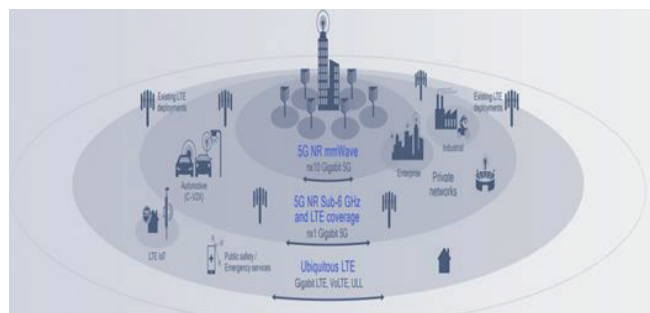
Начальные полосы частот для 5G во многих странах ниже 6 ГГц (часто в полосах 3.3–3.8 ГГц) и на частотах, аналогичных частотам современных мобильных сетей и сетей Wi-Fi. По сравнению с современными технологиями подвижной связи дополнительный мобильный спектр выше 6 ГГц, особенно диапазоны 26–28 ГГц, часто известные как миллиметровые (мм) волны, обеспечит гораздо большую пропускную способность. Будет возможно больше пользователей, больше данных и более быстрые соединения.

Раздел I этой статьи призван продемонстрировать необходимость и использование динамического совместного использования спектра (DSS) для начального развертывания сети связи 5G. В разделе II

объясняется принцип работы связи 5G при использовании существующей инфраструктуры 4G-LTE на основе аргументов, приведенных в разделе III (рассмотрение использования спектра) и разделе IV (стандартизация 3GPP). Затем в разделе VI проводится конструктивный сравнительный анализ всех перспектив динамического разделения спектра для соображений производительности сети. В разделе VII предлагается схема реализации DSS для будущей сети связи 5G. Наконец, в разделе VIII проводится анализ общих физических проблем для реализации подхода DSS, прежде чем перейти к заключению. Раздел IX дал представление о клубных методах искусственного интеллекта для повышения производительности, чтобы уменьшить задержку в будущих коммуникационных сетях.

## 2. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G

Сети связи 5G — это беспроводные сотовые сети, которые делят свою зону покрытия на небольшие региональные соты. В беспроводной ячейке беспроводные устройства 5G обмениваются данными с помощью радиоволн через назначения частотных приемопередатчиков через пул частот, которые будут повторно использоваться в другой ячейке. Локальные антенные решетки подключены к электронным передатчикам, подключенным к коммутации телефонной сети и высокоскоростным оптоволоконным или беспроводным транспортным соединениям с интернет-центрами и маршрутизаторами, как показано на **Рис. 1** [1]. Устройство, перемещающееся из ячеек в ячейки, автоматически передается в существующую ячейку, как и в других сотовых сетях.



**Рис. 1.** Плотность сети 5G-NR и разнообразие развертываний.

На Рис. 1 показано, как данные передаются по сети 4G при сохранении соединения в районах с неравномерным покрытием 5G. Беспроводные устройства 5G могут быть оснащены 4G-LTE, поскольку сети связи 5G-NR используют 4G-LTE для первоначального установления сотового соединения в тех регионах, где доступ 5G не существует.

Все беспроводные устройства 5G в сети подключаются по радиоволнам с помощью локальной антенны сотовой связи [2]. По сути, сеть 5G является дополнением к существующей сети 4G с описанной выше конструкцией, как показано на Рис. 1. Как показано на Рис. 1, в сетях 5G используются различные макросоты, минисоты и специализированные системы внутри зданий, чтобы они могли сосуществовать с сетями 4G:

Малые соты — это миниатюрные базовые станции, созданные для заполнения более крупной макросети с очень локальным покрытием, обычно от 10 до нескольких сотен метров. Из-за чрезвычайно ограниченного диапазона частот миллиметрового диапазона малые соты имеют решающее значение для сетей 5G.

Новые сети, для которых требуются беспроводные устройства с поддержкой 5G, не могут использоваться мобильными телефонами 4G. Радиологические волны более высокой частоты, чем в предыдущих сотовых сетях, частично используются для достижения повышенной скорости. Однако более высокочастотные радиоволны имеют более короткий физический диапазон, что требует меньших географических ячеек. Из-за ограниченного рабочего диапазона расширенный спектр миллиметрового диапазона обеспечивает только ограниченное покрытие. В будущем возможно развертывание миллиметровых частот в диапазонах до 86 ГГц.

## 3. СПЕКТР ИЛИ КАНАЛ

Спектр или канал — это невидимые радиочастоты, передаваемые беспроводными сигналами. Участки электромагнитного спектра сгруппированы в "полосы" в зависимости от длины волны — расстояния, на котором повторяется длина волны. Полный спектр составляет от 3 Гц (очень низкая частота) до 300 Гц. Полный спектр (гамма-лучи). Этот раздел для беспроводной связи находится в

диапазоне от 20 кГц до 300 ГГц и находится в этом пространстве. Для целей беспроводной связи спектр подразделяется на низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Все три категории используются в надежных сетях 5G [8]. Это связано с тем, что для различных типов связи и вариантов использования важна каждая полоса спектра:

1) Низкочастотный спектр (менее 3 ГГц) с низким уровнем прерывания сигнала распространяется на большие расстояния. Этот диапазон использовался рынком беспроводной связи для создания высокоскоростных беспроводных сетей.

2) Частота выше 24 ГГц классифицируется как высокочастотный спектр, который обеспечивает высокую пропускную способность и высокую скорость из-за низкого трафика в этом диапазоне.

3) В диапазоне от 3 до 24 ГГц смешиваются характеристики спектра низких и высоких частот, поэтому он называется спектром среднего диапазона.

Эта частота спектра передается между нашими мобильными устройствами и нашими сотовыми узлами. В настоящее время наиболее распространенными сотовыми площадками являются 150-футовые вышки сотовой связи, но в настоящее время быстро развертываются небольшие соты – небольшие антенны, чтобы уплотнить покрытие сети и часто обеспечивать соединения 5G в диапазоне средних и высоких частот [5].

### 3.1. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА

Функция Spectrum Sharing позволяет пользователям нескольких категорий безопасно использовать одни и те же полосы частот, чтобы оптимизировать использование каналов беспроводной связи. Из-за растущего спроса необходимо совместное использование спектра. Одни и те же диапазоны частот электромагнитного спектра используются для обмена данными, голосом и изображениями со смартфонов, Интернета вещей, общественных и военных радиоприемников, носимых устройств, беспилотных автомобилей и множества других устройств [6].

Совместное использование спектра в сельской местности может быть особенно полезным, поскольку операторы могут создавать более широкие каналы, основанные на отдельных узких блоках спектра в диапазонах «покрытия» ниже 1

ГГц. Этот подход также может поддерживать сверхбыстрые услуги 5G, работающие в миллиметровом диапазоне, поскольку покрытие часто невелико, поэтому операторы могут использовать спектр друг друга, когда другие операторы не используют этот подход. Это может включать концепцию «клубного лицензирования», согласно которой операторы покупают права доступа к части спектра, но также могут использовать спектр других операторов, если он не используется. Для целей связи спектр может быть выделен в миллиметрах (от 3 ГГц до 300 ГГц), в основном для "короткого" диапазона и, следовательно, лучше всего подходит как для внутренних приложений, так и для малых сот. Совместное использование спектра не должно подрывать долгосрочную эволюцию спектра [7].

### 3.2. ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРА [8,9,10,11]

1. Совместное использование спектра может привести к спорам о частоте как во времени, так и в пространстве.
2. Большинство новых полос частот, выделенных для 5G, относятся к среднему и верхнему диапазону. 5G также необходимо использовать в нижних диапазонах частот, чтобы обеспечить экономически эффективное покрытие 5G и увеличить использование спектра средних и высоких частот. Однако в этих нижних диапазонах у многих операторов теперь есть технология долгосрочного развития (LTE).
3. Полная переработка несущих LTE-NR в настоящее время недостижима из-за высокого проникновения и объема трафика, генерируемого существующими устройствами LTE.

### 3.3. СПЕКТР АУКЦИОН

Метод, с помощью которого спектр распределяется между коммерческими пользователями, которые, скорее всего, эффективно и результативно используют ограниченный ресурс. FCC уполномочена проводить аукцион по продаже лицензированного спектра с 1994 года [12,13].

Спектр может быть лицензирован, а может и не быть. Нелицензионные диапазоны используются для подключения устройств Bluetooth и Wi-Fi. Оба спектра были выделены Федеральной комиссией по связи (FCC). Однако спектр — это ресурс, и мы не можем сделать

больше. Совместное использование спектра все чаще рассматривается политиками как средство открытия дополнительных мобильных услуг для 4G и 5G. Глобальная гармонизация спектра для 5G является ключом к успеху новой технологии 5G для поставщиков сетевого оборудования и устройств [14,15]. В диапазонах частот мм-волн, где произошло значительное технологическое развитие, позволяющее использовать частоты 5G, гармонизация спектра особенно важна [16].

#### **3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 5G, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К СПЕКТРУ И ИНФРАСТРУКТУРЕ**

Основные методы и технологии, которые лягут в основу сетей 5G, соответствующие требованиям к спектру и инфраструктуре, включают [17,18,19,20]:

1) Новый радиointерфейс 5G NR, который можно использовать либо в качестве интерфейса, либо в качестве автономного развертывания с базовой сетью 4G. Использование существующей базовой сети 4-G LTE может ускорить первоначальное развертывание автономного режима (NSE).

2) Использование сред со смешанным спектром, включая лицензированные и нелицензированные приложения использования спектра. Нелицензируемый спектр миллиметровых волн в диапазоне от 60 до 70 ГГц для 5G принимается во внимание регулирующими органами на нескольких рынках.

3) Виртуализация сети, обеспечивающая гибкое предоставление и развертывание сетевых мощностей. Нарезка сети позволяет сети использовать ресурсы, необходимые для видеопотока с срезом более высокого разрешения, чем устройство IoT с низкой пропускной способностью.

В начале 2016 года MIMO использовался в 4G, обычно с использованием от 32 до 128 небольших антенн в каждой из ячеек (несколько входов и несколько выходов). Ожидается, что использование сложных технологий антенных решеток (например, Massive MIMO) в сочетании с базовой станцией в среднем диапазоне Massive (например, 3.5 ГГц) и в более высоком диапазоне станет ключевыми особенностями развертывания 5G NR (например, 26 ГГц) или 28 ГГц). В более высоких диапазонах из-за меньшего физического размера антенн возможно

большее количество комбинаций антенн. Комбинации MIMO 4x4 теперь доступны уже сегодня.

Малые соты могут сыграть важную роль в программе развития операторов 5G. Это уже расширяет сети 4G на нескольких рынках и использует малые соты самыми разными способами, в том числе для увеличения покрытия на открытых площадках и для покрытия внутренних помещений, а также для наложения сайтов макросот для увеличения пропускной способности, если это необходимо (например, внутри городская среда). В эпоху 5G можно будет снизить барьеры за счет возможности подключения к существующим структурам, модернизированного одобрения и разумной платы за использование сот.

#### **3.5. ВЕРОЯТНЫЙ ПОДХОД К СОВМЕСТНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПЕКТРА ДЛЯ 5G**

Чтобы изменить опыт конечных пользователей, необходимо предпринять следующие шаги для совместного использования спектра для развертывания 5G [21,22].

Первый шаг: открыть широкое покрытие 5G для расширенных вариантов использования 5G, чтобы предоставить конечным пользователям беспрецедентный доступ.

Второй шаг: включить программирование с задержкой 1 мс для обеспечения максимальной эффективности использования спектра и разрешить использование новых вариантов автономного использования 5G с низкой задержкой.

Последний шаг: разрешить более высокие максимальные тарифы на большей территории в сочетании с агрегацией операторов связи.

5G должен работать в низкочастотных диапазонах, где большинство операторов в настоящее время используют технологию LTE, чтобы обеспечить экономичное покрытие 5G на большой территории. Полностью перефармить операторов связи невозможно из-за высокого проникновения и большого объема трафика, генерируемого существующими пользователями LTE. Непрерывное покрытие необходимо для внедрения 5G, которое предлагает все преимущества разделения сети и меньшую задержку. Координация устройств с частотой

1 мс является ключевой функцией для поддержки случаев с низкой задержкой.

#### 4. СТАНДАРТИЗАЦИЯ 3GPP

Партнерский проект третьего поколения (3GPP) — это отраслевой консорциум по 5G. 3GPP — глобальный орган по стандартизации мобильных сетей 2G, 3G, 4G и 5G. В 2018 году любая система, использующая программное обеспечение 5G New Radio, определяется как "5G-NR". Международный союз электросвязи (МСЭ) устанавливает минимальные стандарты. Сети 5G — это системные сети, которые обеспечивают скорость загрузки 20 Гбит/с, как указано в документе ITU IMT-2020. Это позволяет провайдерам беспроводной связи использовать спектр, который в настоящее время используется 4G, для запуска национального покрытия 5G, просто обновляя сетевое программное обеспечение [23,24].

Совместимость с существующими устройствами LTE также гарантирует, что абоненты LTE будут поддерживать такое же качество обслуживания. Также продолжается развитие спецификаций 3GPP. Версия 3GPP 16 повысит эффективность ресурса DSS (динамическое совместное использование спектра). Для работы с разными стандартами мобильных телефонов требовалось как минимум две антенны. Теперь все, что нужно для работы 5G, — это модернизация антенны [25,26]. Эти преимущества слишком привлекательны для операторов мобильной связи. DSS ставит новые задачи перед сетевыми операторами при проектировании и тестировании, но предлагает мощную функцию, которая позволяет развертывать NR в уже доступном спектре.

##### 4.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ 5G

Чтобы совместно использовать управление и сигналы при работе в автономном режиме (NSA), первоначальным сетям 5G NR требуется привязка LTE. Сеть радиодоступа (RAN) должна быть настроена, расширена, модифицирована и доступна для подключения 5G NR. В этой топологии базовая станция LTE действует как основная группа ячеек, а базовая станция 5G выступает в качестве вторичных ячеек. Существующая базовая сеть LTE [27] соединяет обе сети RAN. На данный

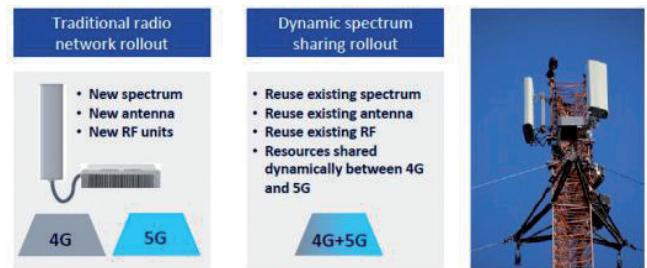


Рис. 2. Традиционная схема радиосвязи и схема на основе DSS.

момент установки 5G объединяют множество операторов LTE с оператором 5G NR [28,29].

Парный спектр, который составляет более 90% спектра ниже 8 ГГц и использует разные частоты для восходящей и нисходящей линии связи, станет основой для предстоящего этапа установки 5G NR [30].

##### 4.2. ДИНАМИЧЕСКОЕ СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА (DSS) КАК УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЕХА В РАЗВИТИИ 5G

С коммерческим переходом на 5G, а совместное использование спектра — заманчивой вариант для провайдеров, которые хотят быстро развернуть 5G в диапазонах дуплексной связи с частотным разделением без перераспределения спектра [31].

На Рис. 2 показана потребность и потребность в DSS в традиционных радиосетях. Новые технологии радиодоступа традиционно развертываются в сфере 2G, 3G и 4G, на отдельных блоках спектра. Таким образом, операторы будут покупать или перераспределять спектр у существующего поколения мобильной связи (4G), чтобы передать его новому будущему поколению (5G). Для этого потребуются операторы. Этот процесс очень медленный и дорогой. Перераспределение спектра может занять десять лет, но это можно сделать в одночасье с помощью совместного использования спектра [32]. Совместное использование динамического диапазона революционизирует внедрение и прорывную технологию, позволяя развертывать как 5G, так и 4G в одном диапазоне и динамически назначать диапазон ресурсам 5G/4G в зависимости от спроса пользователя.

##### 4.3. ВОЗМОЖНОСТИ 5G ОТ DSS (DYNAMIC SPECTRUM SHARING)

Операторы могут развернуть 4G и 5G в одном блоке спектра с динамическим разделением спектра в 5G и динамически распределять нужный объем между различными типами пользователей по мере необходимости. Это позволяет им

уйти от перехода LTE на 5G до того, как в этом появится острая необходимость. Вместо этого вы можете измерить свои возможности 5G, увеличив число последователей [33].

Динамическое совместное использование спектра позволяет текущему оператору LTE одновременно использовать 5G New Radio (NR) и LTE – с помощью простого обновления программного обеспечения. Это решение основано на использовании алгоритмов интеллектуального планирования, которые обеспечивают оптимальную производительность при смене/переключении устройств 4G и 5G в сети связи [34]. Именно так новая технология DSS улучшит способ использования одного из наиболее ограниченных ресурсов (т.е. спектра) в сетях мобильной связи.

Динамическое совместное использование спектра ускоряет работу приложений 5G за счет устранения необходимости повторного фарминга. В настоящее время при развертывании 5G по всему миру используется оператор связи 5G, дополняющий ядро LTE и сеть радиодоступа. Первым шагом на пути к полноценному автономному 5G с выделенным ядром и RAN является отказ от сценария автономного 5G. В то же время операторы могут использовать программное обеспечение 5G для работы 5G при динамическом совместном использовании спектра высокого уровня в одном и том же диапазоне в зависимости от потребностей конечного пользователя [35].

#### 4.4. ОБЫЧНО ОБСУЖДАЮТСЯ ТРИ СХЕМЫ РАЗВЕРТЫВАНИЯ 5G

1) Подходы для граждан типа службы широкополосной радиосвязи (CBRS): В США планируемый подход CBRS направлен на поддержку использования динамического совместного использования на трех уровнях. Верхний уровень состоит из тех, кто имеет наибольшую защиту (например, радары, поставщики услуг спутникового и беспроводного Интернета (ISP)). Второй уровень состоит из держателей лицензий приоритетного доступа (PAL), которые платят за права покупки в случае отсутствия возможности использования части доступного спектра на высшем уровне. Третий уровень включает в себя общий доступ (GAA) и открыт для всех, но имеет наименьшую защиту.

2) Лицензионный общий доступ: Лицензиаты имеют контроль над кругом дополнительных пользователей. Традиционная концепция диапазона 2.3 ГГц была создана в Европе. Он

разделен на два уровня: первичные пользователи (например, операторы мобильной связи), которым разрешено использовать спектр на открытых территориях, и вторичные пользователи (например, действующие пользователи).

3) Параллельный общий доступ. В отличие от описанных выше подходов, только один класс пользователей может совместно использовать спектр скоординированным образом. Это помогает повысить скорость передачи данных и эффективность использования спектра между операторами мобильной связи, например, при лицензировании клубов.

#### 4.5. ТРЕБОВАНИЯ К РАДИОЧАСТОТАМ DSS И ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕРКИ

Синхронизация систем 4G и 5G — один из ключевых элементов, который следует учитывать при измерении DSS. Чтобы предотвратить рассогласование блоков ресурсов, их необходимо синхронизировать по полям времени и частоты. Еще одним ключевым аспектом, который следует учитывать здесь, является быстрая скоординированная скорость между программистами пакетов LTE и NR, что важно для динамического распределения ресурсов. Декодирование пользовательского оборудования завершится неудачей, если будут выделены одни и те же ресурсы.

Синхронизация систем LTE и NR важна с точки зрения измерений. Параллельные измерения LTE и NR являются ключевым моментом для проверки работоспособности в лабораторных условиях перед тестированием оборудования на земле. Важно, чтобы сигналы LTE и NR были отделены от объединенного сигнала при тестировании передатчика DSS. При высокой корреляции синхронизации можно добиться успешной синхронизации. Также важно проверить функциональность существующих устройств LTE, поскольку на них это не должно повлиять. Для реализаций физических уровней необходимо выполнить проверку прохождения/отказа, чтобы контролировать величину вектора ошибок (EVM) и циклическую избыточность.

#### 5. ПРИНЦИП РАБОТЫ DSS

Формы радиоволн LTE и 5G имеют много общего, что позволяет сосуществовать один и тот же спектр обеих форм сигналов. Однако существует множество отличий, которые делают 5G более эффективным, чем LTE. Пилот-сигналы и сигналы синхронизации работают с

LTE и 5G. Единственное отличие заключается в том, как они работают. Мобильный телефон использует пилот-сигналы для создания общего эталона для синхронизации сети. Для доступа к сети и связи решающее значение имеют пилот-сигналы и сигналы синхронизации.

Пилотные сигналы LTE и 5G различаются. Конкретные места в частотно-временном континууме занимают пилот-сигналы LTE. С другой стороны, 5G обладает большей гибкостью в распределении пилот-сигналов. Комбинация сигналов LTE и 5G приводит к конфликту сигналов синхронизации 5G с сигналами LTE. Стандарт 5G определил различные методы предотвращения конфликтов пилот-сигналов, чтобы решить эту проблему. Двумя из них являются [42, 43] следующие техники.

### 5.1. Техника MBSFN (МНОГОАДРЕСНАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ ОДНОЧАСТОТНОЙ СЕТИ)

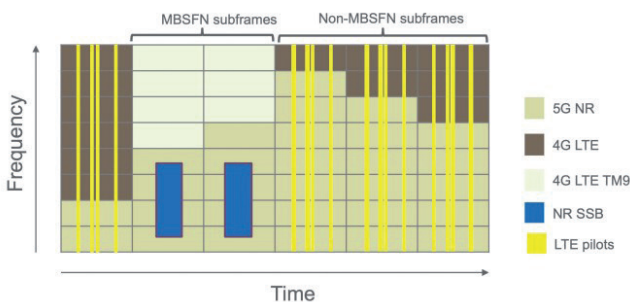
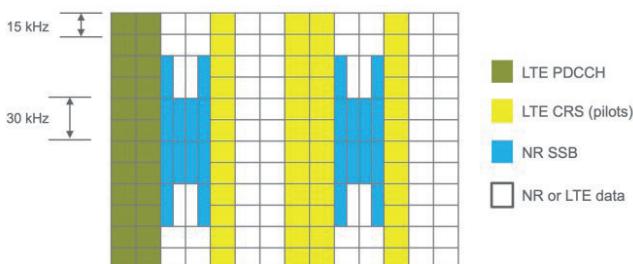


Рис. 3. Методика MBSFN для DSS2.

### 5.2. ТЕХНИКА НЕ-MBSFN

Как показано на Рис. 4, эта Система использует два символа LTE в кадре и сжимает 4 символа SSB (сжимает их), чтобы уменьшить продолжительность этих символов.



Множество факторов, включая рабочий диапазон частот, будут определять выбор того или иного метода. Это важно, поскольку некоторые полосы, такие как N5 (850 МГц) и N66, лучше определены для DSS. Определение DSS в режиме TDD не было завершено 3GPP.

Как показано на Рис. 3, решение иногда блокирует пилот-сигналы 4G и заменяет заблокированную передачу ресурса MBSFN, в которую вставляются сигналы синхронизации 5G.

## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СОВМЕСТНОГО СПЕКТРА И СООБРАЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТИ

DSS нацелен на диапазоны, в которых уже работает LTE, в основном в диапазоне 700–2700 МГц. Поскольку DSS снижает пропускную способность, хорошей идеей является использование больших каналов LTE, таких как 20 и 10 МГц. Некоторые из перспектив DSS и соображения производительности сети:

1) В DSS один и тот же частотный спектр может использоваться LTE и 5G. Базовая станция назначает динамические ресурсы телефонам на базе LTE или 5G. С помощью DSS операторы могут активировать 5G без расширения для включения нового спектра, что полезно для провайдеров с ограниченным спектром. Это также понравится поставщикам услуг, которые хотят быстро получить статус 5G, используя существующую инфраструктуру и частотный спектр.

2) В LTE DSS полезен на ранних стадиях развертывания 5G, если проникновение устройств 5G невелико и реформирование LTE недоступно. Развертывание сетей 5G будет сосредоточено в первую очередь на использовании спектра средней полосы частот в городах. Таким образом, DSS можно использовать в районах с низкой плотностью населения для обеспечения покрытия 5G

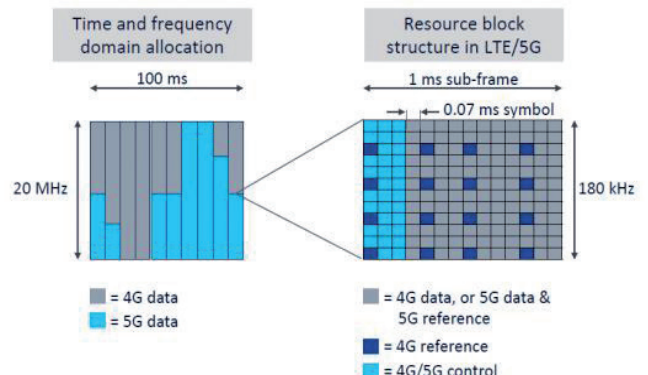


Рис. 5. Изменение традиционной структуры блоков ресурсов с использованием подхода DSS.



всего рынка поставщиков услуг. В этом случае поставщик услуг должен взвесить преимущества и стоимость перехода на оборудование 5G (Fig. 5).

3) Использование DSS для утверждения возможностей 5G будет интересно операторам с большими объемами частотного спектра. Это особенно актуально в США, где ранее был доступ к среднему спектру, в основном 290 МГц в спектре С-диапазона, который будет продан позже на аукционе. Эти две категории — AT&T и Verizon. Помимо учета 5G на частоте 600 МГц, T-Mobile/Sprint уже внедряет 5G на 2.5 ГГц, так что смысла в DSS у них нет. Некоторые операторы утверждают, что DSS будет предоставлять абонентам услуги 5G в более широком масштабе в низкочастотных диапазонах. Но существенной разницы в производительности в низкочастотных диапазонах между LTE и 5G нет.

4) Оператор небольшого спектра не может позволить себе потерять пропускную способность и предпочтет подождать, пока не будет приобретен средний диапазон частот. Некоторые поставщики услуг выиграют от DSS, если мы посмотрим на карту мира для распределения спектра средней полосы. В качестве основной части стратегии 5G поставщиков мобильных услуг становится динамическое разделение спектра (DSS). При использовании базовых станций сотовой связи DSS общая стоимость владения (ТОВ) для запуска 5G в диапазонах, используемых в настоящее время для 4G, обеспечивает самую низкую совокупную стоимость владения.

5) DSS — это элегантный способ, позволяющий операторам постепенно привлекать новых пользователей 5G, одновременно поддерживая традиционных клиентов 4G. Если в прошлом операторы хотели перейти на новую технологию, им нужно было оживить спектр, то есть удалить старых пользователей из части диапазона и зарезервировать блок для новых пользователей.

6) С точки зрения совместного использования статического спектра, когда LTE и 5G используются отдельно для определенного объема полосы пропускания и некоторого количества радиооборудования.

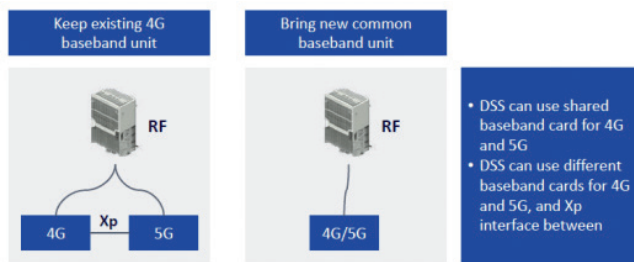
Если обеспечить статическое совместное использование и пропускную способность и удалить высоконагруженный диапазон LTE, это не только приведет к удалению пропускной способности определенных пользователей LTE, но также увеличит нагрузку и увеличит помехи в сети LTE, что снизит производительность пользователя.

## 7. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ DSS

Физический уровень 5G может быть настолько похож на 4G в 3GPP, что DSS возможен с тем же интервалом поднесущей и той же структурой во временной области. DSS может быть обратно совместим со всеми уже используемыми устройствами LTE. Следовательно, поставщикам услуг связи (CSP) необходимо поддерживать передачу опорного сигнала соты LTE (CRS). Передача 5G спроектирована так, чтобы скорость CRS соответствовала скорости LTE CRS.

DSS с агрегацией несущих (CA) 5G, особенно в сочетании с автономной архитектурой (SA), иллюстрирует все возможности этой технологии. SA максимизирует покрытие низкочастотной сети и услуги доступа 5G, в то время как CA предлагает самые высокие скорости передачи данных. В течение 2022 года будет обеспечена широкая поддержка устройств с DSS, SA и CA за счет увеличения количества устройств 5G. Таким образом, внедрение функции DSS соответствует повышению доступности устройств. Для DSS доступна одна общая плата основной полосы частот для 4G и 5G, что явно исключает решение 4G и 5G с участием нескольких поставщиков. Другая возможность — сохранить существующую полосу частот 4G и добавить новую полосу частот 5G. График основан на быстром Xr-интерфейсе между 4G и 5G между двумя базовыми функциями. Этот интерфейс не открыт и работает только для одного поставщика, поэтому поставщики услуг связи должны использовать одного и того же поставщика 4G и 5G при использовании DSS.

DSS — отличное решение для гибкого изменения структуры спектра 5G. Сегодня операторы могут построить сеть 4G с поддержкой 5G и частично или полностью перейти на 5G в любой момент в будущем, не теряя при этом обратной совместимости для пользователей устройств 4G.



**Рис. 6.** Переключение ч/б неавтономного (NSA) режима в автономный (SA) режим.

Беспроводная мобильная связь приведет к увеличению скорости передачи данных, снижению задержек и увеличению пропускной способности системы в 5G NR (Новое радио). Как показано на **Рис. 6**, первая реализация 5G NR использует существующую инфраструктуру 4G LTE в автономном режиме (NSA), а позже за ней последует полностью независимый автономный режим (SA), который не зависит от LTE. Внедрение DSS позволит сосуществовать 5G NR и 4G LTE, а также обеспечит плавный переход между сетевыми операторами.

Не каждый поставщик услуг имеет лицензию на использование радиоволн TDD. Чтобы получить выгоду от оптимизированного качества обслуживания 5G и продолжить работу на новых вертикальных рынках, сетевой оператор должен перейти в автономный режим (SA), в котором 5G RAN подключается к базовой сети 5G (например, автомобильной и промышленной). Автономное развертывание достигается после ряда промежуточных шагов, и каждый оператор может выбрать свой собственный план 5G. Поставщики услуг должны выбирать между двумя дорогостоящими вариантами из-за использования их активов спектра в зависимости от FDD, т.е. покупки нового спектра и изменения структуры существующего спектра.

Однако стандарт 5G NR дает возможность адаптироваться к текущим приложениям LTE и использовать тот спектр, который в настоящее время используется исключительно LTE. Этот механизм позволяет DSS сосуществовать с одним и тем же спектром, позволяя использовать 5G NR и 4G LTE. В долгосрочной перспективе DSS позволит сетевым операторам обеспечивать 5G нижними частотными диапазонами с покрытием. Некоторые сетевые операторы уже используют DSS, и ожидается, что масштабное развертывание будет реализовано к концу 2021– началу 2022 года.

## 7.1. Влияние DSS на LTE и 5G NR

Влияние DSS на LTE незначительно, поскольку успешную технологию трудно изменить ее преемнику. Для доступа к сети устройство 5G NR должно обнаружить блоки синхронизации сигналов (SSB). SSB должны время от времени отправляться сетью с определенным интервалом для перевода SSB на уже занятый канал частот, используемых LTE, чтобы поддерживать синхронизацию по времени и частоте. В идеале использование одночастотных мультимедийных подкадров (MBSFN) позволяет сделать этот разрыв в непрерывной передаче LTE возможным [38].

Обычно только три из 40 подкадров устанавливаются как подкадры MBSFN, чтобы минимизировать их влияние на производительность LTE. Применяемая конфигурация передается через сеть LTE с информацией о блоках системного типа 2 (SIB2). Тот же SIB сообщает, что терминал с поддержкой 5G может подключить телефон к 5G RAN из обслуживающей соты LTE. Конфигурация MBSFN стандартного терминала LTE будет читать и игнорировать широкоэвещательные подкадры.

Таким образом, телефон 5G будет иметь два активных радиомодуля: LTE и NR 5G. Первоначально DSS будет проводить тестирование в режиме АНБ. Часть LTE основана на тех же принципах, что и само устройство LTE. Часть 5G NR обнаружит передаваемый SSB в открытом подкадре LTE на желаемом частотном канале, когда целевая полоса частот проверяется на возможность совместного использования. Технология работает в рамках своего потенциала: для 5G NR доступны только три подкадра. DSS также позволяет использовать выделенные ненастроенные подкадры LTE для MBSFN посредством двух отдельных функций [39,40,41]:

1. Стандартные подкадры LTE, в зависимости от режима MIMO, включают CRS (специфичный для соты опорный сигнал), сопоставленный с определенными элементами ресурса частотно-временной сетки. Терминал LTE использует CRS для оценки канала и поддержания полной временной и частотной синхронизации. Соответствие скоростей вокруг LTE CRS было принято, чтобы позволить NR использовать эти подкадры.
2. Поддерживается альтернативный дополнительный пост для отображения опорного сигнала демодуляции (DMRS) на общий канал физических данных (PDSCH),

опять же для предотвращения коллизии с LTE CRS. Это возможность устройства; во время процесса первоначальной регистрации устройство сигнализирует о поддержке этой функции в сети.

Обсуждение сосредоточено на полустатической конфигурации, которая позволяет использовать определенные подкадры NR, если LTE отсутствует или когда NR передает компоненты основных сигналов LTE в подкадрах, не относящихся к LTE. Отображение карты определяется относительно начала PDSCH в слоте, и LTE и NR могут совместно использовать подкадр и передавать управление и детали.

## 7.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ 5G

Для внедрения DSS требуется обширное тестирование. Это включает в себя тестирование лабораторного пользовательского оборудования LTE, 5G и производительности сети с использованием сканеров и устройств для оценки покрытия и сквозной (E2E) производительности.

Активация DSS не должна создавать помех для текущего развертывания LTE в сети. Конфигурация подструктур MBSFN не должна влиять на устройства, поддерживающие только LTE. Прохождение E2E-тестов необходимо для минимального влияния на производительность LTE с активным MBSFN. Хотя подкадры MBSFN содержат 5G NR, включая SSB, следует отдавать предпочтение тестам чувствительности приема для устройств LTE, чтобы гарантировать соответствие требованиям. При передаче SSB в подкадрах, настроенных MBSFN, устройство с поддержкой 5G NR должно иметь возможность синхронизироваться с 5G RAN по времени и частоте. Когда шаблон LTE CRS для NR PDSCH используется для отправки 5G NR в подкадры, не относящиеся к MBSFN, достаточно проверить правильную реализацию функций стекирования с помощью теста пропускной способности данных. Расширенное тестирование устройств включает процессы динамического планирования, которые имитируют процесс NR для координации ресурсов.

## 8. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Технически 5G не является независимой сетью, но добавляется к дополнительной емкости соты 4G. Помимо частоты 2,1 ГГц, 5G работает и на частоте 3,6 ГГц. Частота 2,1 ГГц обеспечивает высокоскоростную связь на больших расстояниях.

Это делает его идеальным для расширения сети 5G в этом районе. Частота 3,6 ГГц очень высока в более коротком диапазоне. Помимо спектра, прежде чем переходить к выводу, необходимо учитывать следующие моменты:

### 8.1. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОСТАВЩИКОВ

DSS — относительно сложная функция, поскольку она предполагает планирование двух сетей. Расписание — это мозг базовой станции. Очень важно, как поставщики используют планировщик для определения приоритетов доступа к трафику 4G и 5G для оптимизации производительности. Поэтому тестирование DSS в действующих сетях важно в различных условиях. Другим аспектом дифференциации является степень детализации, над которой работает DSS. Значения находятся в диапазоне от 1 до 100 мс. Низкая степень детализации обеспечивает более быструю реакцию, чем высокая степень детализации, на изменение требований к трафику и повышает производительность.

DSS приводит к потере 10–20 процентов пропускной способности LTE и 5G [44]. Потеря емкости зависит от метода и способа реализации поставщика. Поэтому разница между поставщиками должна быть сосредоточена на сокращении потерь мощности. Накладные расходы в LTE потребляют около 20–25% пропускной способности канала, чтобы можно было учитывать потерю пропускной способности. 5G более эффективен и снижает нагрузку на канал примерно до 14 процентов. В контексте своего владения спектром и стратегии развития технологий поставщики услуг, стремящиеся максимизировать пропускную способность, должны рассмотреть DSS. Положительным моментом является то, что DSS позволяет сети динамически удовлетворять запросы пользователей LTE и 5G. Принимая решение о развертывании, операторам необходимо будет сопоставить эту выгоду с потенциальной потерей пропускной способности. В процессе принятия решений ключевое значение будет иметь владение спектром.

### 8.2. DSS – ЭТО РАННЯЯ ФУНКЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЕТЕЙ 5G

На более поздних стадиях это принесет мало пользы. С ростом проникновения 5G операторы LTE преобразуют 5G в 5G. Ожидается, что LTE достигнет своего пика через два года. Динамическое расширение спектра (DSS),

позволяющее операторам мобильной связи (MNO) расширять покрытие 5G без постоянной необходимости переосмысления спектра долгосрочного развития (LTE) или приобретения спектра 5G, может принести значительные преимущества. Обновление программного обеспечения существующих базовых станций позволяет развернуть DSS.

## 9. БУДУЩИЕ ОБЪЕМЫ

Развитие 5G, Интернета вещей и промышленной цифровизации обусловлено сетевым интеллектом и автоматизацией. Операторам придется увеличивать пропускную способность своей сети по мере развития технологий с поддержкой 5G. Однако существует дополнительная сложность с дополнительной емкостью.

### 9.1. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Скорость передачи данных резко возрастет с появлением 5G, поскольку он в 10 раз быстрее, чем нынешние сети LTE. Коммуникации, Интернет вещей и приложения искусственного интеллекта претерпят радикальные изменения в результате этих непостижимых скоростей передачи данных. Существование передовых и устаревших технологий, гибридных сетей, широкого диапазона частотных диапазонов и спектров, а также распространение подключенных устройств — все это усложняет сетевые операции. Кроме того, сеть нуждается в дальнейшей оптимизации и оптимизации производительности из-за растущих требований со стороны Интернета вещей и промышленного использования. Ниже приведены некоторые из них:

#### 1) *Управление трафиком с помощью 5G*

Направляя устройства с поддержкой 5G в оптимальные соты 5G с помощью искусственного интеллекта, включенного в программное обеспечение RAN Compute, пользователи телефонов 5G могут оставаться в зоне покрытия 5G. Ячейки ранжируются на основе моделей искусственного интеллекта и возможности двойного подключения.

#### 2) *Улучшенный режим сна MIMO*

В радиосистеме алгоритмы искусственного интеллекта основной полосы используются для прогнозирования характера трафика и автоматического отключения антенн при необходимости для экономии энергии. Для еще большей экономии средств его также можно

объединить с решениями Cell Sleep и Low Energy Scheduler.

#### 3) *Автономные сети*

Масштабируемая оптимизация кластера ячеек с использованием процедур упреждающей и реактивной оптимизации с поддержкой искусственного интеллекта. Для определения топологии сети используются методы неконтролируемой кластеризации, основанные на машинном обучении.

ИИ предлагает сектору мобильной связи потрясающие возможности, поскольку его можно использовать для создания более персонализированного подхода к клиенту, помогая при этом управлять сетевыми расходами. Экономия эксплуатационных расходов и обеспечение рентабельности сети являются основными приоритетами, которых должны достичь поставщики услуг с помощью искусственного интеллекта. 70 процентов считают, что их сетевое планирование принесет наибольшую потенциальную отдачу от внедрения ИИ, тогда как 64 процента хотят сосредоточить усилия ИИ на управлении производительностью сети. Сетевые провайдеры ищут эффективные механизмы, необходимые для сбора, структурирования и анализа огромных объемов данных, которые может собрать ИИ.

### 9.2. СЕТЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕГРАЦИИ BLOKCHAIN-5G

Интеграция блокчейна с 5G может дать новое определение развивающемуся обществу. Чтобы оправдать всеобъемлющие ожидания 5G, необходимо изучить множество структурных и технических аспектов. Для реализации различных соглашений, таких как смарт-контракты, необходимо определить и обнаружить четкую нормативную базу. Самое главное — необходимо улучшить масштабируемость блокчейна для адресации большого количества устройств, поскольку каждому устройству нужны свои адреса.

Вредоносные устройства также могут нарушить работу сети и затруднить распространение вирусов. Благодаря глобальному внедрению 5G все машины и гаджеты, независимо от их разнородности, будут подключены. Мир сходит с ума от высоких скоростей, низкой задержки и улучшенной пропускной способности сети, и ему не терпится воспользоваться такой фантастической возможностью подключения. Но есть некоторые трудности, которые

необходимо решить, и их нельзя игнорировать. Перегруженность и перегрузка могут быть вызваны слишком большим количеством людей. Низкая пропускная способность может потребовать устранения в зависимости от количества имеющихся точек доступа.

Контролируемый рынок не будет реальным решением, поскольку в телекоммуникационном секторе существует ожесточенная конкуренция. На централизованном рынке надежная третья сторона отвечает за принятие окончательных решений о распределении ресурсов и запрашиваемой цене. Телекоммуникационный сектор может извлечь выгоду из концепции децентрализованного рынка, созданного с использованием смарт-контрактов и частного блокчейна.

Поскольку блокчейн необратим и использует децентрализованные реестры транзакций, он может обеспечить обширную коммуникацию без ущерба для безопасности, поддерживая доверие между предприятиями и организациями. По оценкам, комбинация блокчейна и 5G к 2030 году будет творить чудеса, соединяя около 500 миллионов мобильных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Frecassetti MG, Mazzanti A, Sevellano JF, Del Rio D, Ermolov V. D-band transport solution to 5G and beyond 5G cellular networks. *Proc. European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2019, pp. 214-218.
2. Ratasuk R, Mangalvedhe N, Bhatoolaul D, Ghosh A. LTE-M evolution towards 5G massive MTC. *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2017. pp. 1-6.
3. Kim S, Visotsky E, Moorut P, Bechta K, Ghosh A, Dietrich C. Coexistence of 5G with the incumbents in the 28 and 70 GHz bands. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2017, 35(6):1254-1268.
4. Violette EJ, Espeland RH, DeBOLT RO, Schwering FK. Millimeter-wave propagation at street level in an urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 26(3):368-380.
5. Salcedo A, Martinez E. Analysis of the electromagnetic spectrum under the Extremely Low Frequency band: frequency sub-bands classification. *Proc. International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 2017, pp. 157-162.
6. Zhang L, Liang YC, Xiao M. Spectrum sharing for Internet of Things: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 26(3):132-139.
7. Carciofi C, Faccioli M, Grazioso P, Petrini V. Analysis of 5G Outdoor and Indoor Coexistence Scenarios for Spectrum Sharing with Active Antenna System. *Proc. International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2020, pp. 1-6.
8. Manganelli A, Nicita A. The Evolution of Mobile Communications and Spectrum Policy. In: *The Governance of Telecom Markets*, 2020, pp. 137-154. DOI: 10.1007/978-3-030-58160-2\_7.
9. Wang H, Wang J, Ding G, Xue Z, Zhang L, Xu Y. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3):148-155.
10. Attiah ML, Isa AAM, Zakaria Z, Abdulhameed MK, Mohsen MK, Ali I. A survey of mm Wave user association mechanisms and spectrum sharing approaches: an overview, open issues and challenges, future research trends. *Wireless Networks*, 2020, 26(4):2487-2514.
11. Bhattarai S, Park JM, Gao B, Bian K, Lehr W. An overview of dynamic spectrum sharing: Ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2016, 2(2):110-128.
12. McMillan J. Why auctions the spectrum?, *Telecommunications policy*, 1995, 19(3):191-199.
13. Bichler M, Goeree JK (eds.). *Handbook of spectrum auction design*. Cambridge University Press, 2017. DOI: 10.1017/9781316471609.
14. Wang T, Li G, Huang B, Miao Q, Fang J, Li P, Wang Y. Spectrum analysis and regulations for 5G. In: *Xiang, W., Zheng, K., Shen, X. (eds) 5G Mobile Communications*. Springer, Cham., doi: 10.1007/978-3-319-34208-5\_2.
15. Ali F, Yigang H, Shi G, Sui Y, Yuang H. Future generation spectrum standardization for 5G and Internet of Things. *Journal of Communications*, 2020, 15(3):276-282.
16. Wu T, Rappaport TS, Collins CM. Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications. *IEEE microwave magazine*, 2015, 16(2):65-84.
17. Oughton EJ, Frias Z, van der Gaast S, van der Berg S. Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands. *Telematics and Informatics*, 2019, 37:50-69.
18. Alnoman A, Anpalagan A. Towards the fulfillment of 5G network requirements: technologies and challenges. *Telecommunication Systems*, 2017, 65(1):101-116.
19. Oughton EJ, Frias Z. The cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain. *Telecommunications Policy*, 2018, 42(8):636-652.
20. Tullberg H, Popovski P, Li Z, Uusitalo MA, Høglund A, Bulakci O, Monserrat JF. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements. *IEEE Communications magazine*, 2016, 54(12):132-139.
21. Liu G, Huang Y, Chen Z, Liu L, Wang Q, Li N. 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(11):83-89. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000230.
22. Teral S. *5G best choice architecture: White Paper*. IHS Markit Technology, London, UK, 2019.
23. Høglund A, Bergman J, Lin X, Liberg O, Ratilainen A, Razaghi HS, Yavuz EA. Overview of 3GPP release 14 further enhanced MTC. *IEEE Communications*

- Standards Magazine*, 2018, 2(2):84-89. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.
24. Sengupta A, Alvarino AR, Catovic A, Casaccia L. Cellular terrestrial broadcast—Physical layer evolution from 3GPP release 9 to release 16. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2020, 66(2):459-470.
  25. Hoglund A, Medina-Acosta GA, Veedu SNK, Liberg O, Tirronen T, Yavuz EA, Bergman J. 3GPP Release-16 Preconfigured Uplink Resources for LTE-M and NB-IoT. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020, 4(2):50-56.
  26. Siddiqi MA, Yu H, Joung J. 5G ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices. *Electronics*, 2019, 8(9):981.
  27. Liu G, Huang Y, Chen Z, Liu L, Wang Q, Li N. 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(11):83-89.
  28. Xu Z, Zhang Y, Shen A, Guo B, Han Y, Liu Y. Initial Analysis of the Cell Selection Progress in SA of 5G NR. *Proc. International Conference On Signal And Information Processing, Networking And Computers*, 2018, pp. 495-504.
  29. Giordani M, Mezzavilla M, Barati CN, Rangan S, Zorzi M. Comparative analysis of initial access techniques in 5G mm Wave cellular networks. *Proc. Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, 2016, pp. 268-273.
  30. Ganame H, Yingzhuang L, Ghazzai H, Kamissoko D. 5G base station deployment perspectives in millimeter wave frequencies using meta-heuristic algorithms. *Electronics*, 2019, 8(11):1318.
  31. Budić D, Skračić K, Bodrušić I. Optimizing Mobile Radio Access Network Spectrum Refarming Using Community Detection Algorithms. *Proc. 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 475-479.
  32. Lee H, Vahid S, Moessner K. A survey of radio resource management for spectrum aggregation in LTE-advanced. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 16(2):745-760.
  33. Jeon J, Ford RD, Ratnam VV, Cho J, Zhang J. Coordinated dynamic spectrum sharing for 5G and beyond cellular networks. *IEEE Access*, 2019, 7:111592-111604. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934385.
  34. Papageorgiou GK, Voulgaris K, Ntougias K, Ntaikos DK, Butt MM, Galiotto C, Papadias CB. Advanced dynamic spectrum 5G mobile networks employing licensed shared access. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(7):21-27.
  35. Jacob S, Menon VG, Joseph S, Vinoj PG, Jolfaei A, Lukose J, Raja G. A novel spectrum sharing scheme using dynamic long short-term memory with CP-OFDMA in 5G networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3):926-934.
  36. Botterman M, Cave J. Opening Towards a New Reality, together. In: *ICT Policy, Research, and Innovation: Perspectives and Prospects for EU-US Collaboration*, 2020, pp. 365-438. Piscataway, NJ 08854, IEEE Press. DOI: 10.1002/9781119632481.
  37. Sokullu R, Akkaş MA. Unmanned Aerial Vehicle and IoT as Enabling Technologies for 5G: Frameworks, Applications and Challenges. In: *Internet of Things, Smart Computing and Technology: A Roadmap Ahead*, 2020, pp. 217-239.
  38. Tullberg H, Popovski P, Li Z, Uusitalo MA, Hoglund A, Bulakci O, Monserrat JF. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements. *IEEE Communications magazine*, 2016, 54(12):132-139.
  39. Barb G, Otesteanu M, Roman M. Dynamic Spectrum Sharing for LTE-NR Downlink MIMO Systems. *Proc. International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2020, pp. 1-4.
  40. Tikhvinskiy V, Deviatkin E, Aitmagambetov A, Kulakaeva A. Provision of IoT Services for CO-Located 4G/5G Networks Utilisation with Dynamic Frequency Sharing. *Proc. International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, 2020, pp. 1-4.
  41. Mihovska A, Prasad R. Overview of 5G New Radio and Carrier Aggregation: 5G and Beyond Networks. *Proc. 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2020, pp. 1-6.
  42. Wibowo FA, Bangun AA, Kurniawan A. Multimedia broadcast multicast service over single frequency network (MBSFN) in LTE based femtocell. *Proc. International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2011, pp. 1-5.
  43. Jotten CA, Sgraja C, Blanz JJ. On the Impact of Coarse Synchronization on the Performance of Broadcast/Multicast Single Frequency Network Operation in WCDMA, *Proc. IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008, pp. 1-6.
  44. Holma H, Kalyanasundaram S, Venkatesan V. 5G Performance, 5G Technology: 3GPP New Radio, John Wiley & Sons Ltd. Publ., 2020, pp. 239-303; doi:10.1002/9781119236306.ch10.

**Шарма Нидхи***PhD*

Нац. технологический институт Курукшетра  
**Курукшетра-136119, Харьяна, Индия**  
**E-mail: scholar.nidhisharmanidhi@gmail.com**

**Ахлават Приянка***PhD*

Нац. технологический институт Курукшетра  
**Курукшетра-136119, Харьяна, Индия**  
**E-mail: priyanka.ahlawat@nitkkr.ac.in**

**Аггарвал Раджеш К.***PhD*

Нац. технологический институт Курукшетра  
**Курукшетра-136119, Харьяна, Индия**  
**E-mail: rka15969@gmail.com.**

Сдано в набор 24.05.2024. Подписано в печать 26.05.2024. 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.