

**ИНФ ОКОММУНИКАЦИОН НЫЕ
И
РАДИОЭЛЕКТРОННЫ Е
ТЕХНОЛОГИИ**

**Infocommunications
and
Radio Technologies**

**Том 8
№ 3**

**Vol. 8
No. 3**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2025

Том 8

№ 3

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

Гуляев Юрий Васильевич — научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, академик, член Президиума РАН (Москва, Россия)

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Крымской астрофизической обсерватории РАН (Крым, Россия)

Заместитель главного редактора

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

Абрамов Игорь Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Белкин Михаил Евсеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий научно-технологической лабораторией и профессор МИРЭА — Российского технологического университета (Москва, Россия)

Бичурин Мирза Имамович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры Новгородского государственного университета (Великий Новгород, Россия)

Богатырёв Юрий Владимирович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению (Минск, Беларусь)

Борисова Нина Александровна — доктор исторических наук, доцент, заместитель директора по науке и технике Центрального музея связи им. А. С. Попова, профессор кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, Россия)

Громов Дмитрий Викторович — доктор технических наук, профессор отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, главный научный сотрудник центра экстремальной прикладной электроники института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия)

Гудков Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

Запарий Владимир Васильевич — доктор исторических наук, профессор Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

Запевалов Владимир Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией гиротронов для управляемого термоядерного синтеза Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия)

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Ipeev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ипатов Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Касьянов Александр Олегович — доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (Таганрог, Россия)

Колосов Станислав Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Криворучко Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (Санкт-Петербург, Россия)

Ларионов Михаил Григорьевич — доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева (Москва, Россия)

Малютин Николай Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, директор НИИ систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия)

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Обухов Илья Андреевич — доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе НПП «Радиотехника» (Москва, Россия)

Овчинникова Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор кафедры 406 Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт» (Москва, Россия)

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (Санкт-Петербург, Россия)

Пестряков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» Московского технического университета связи и информатики (Москва, Россия)

Руденко Константин Васильевич — доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории физики и технологий приборов наноэлектроники НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева, профессор НИУ МФТИ (Москва, Россия)

Совлуков Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

Старостенко Владимир Викторович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Чаусов Денис Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией фотоники и органической электроники Центра биофотоники Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Богущ Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Евстигнеев Максим Павлович — доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной деятельности Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Nemai Chandra Karmakar — associate professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей Черноморского высшего военно-морского ордена Красной Звезды училища им. П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Физические науки (1.3)

Обухов И. А.

Гипотетический сценарий нарушения симметрии
между электронами и позитронами во Вселенной 351

Богатов Н. А.

СВЧ излучение коронного разряда 376

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А.

Особенности исследования антенных систем крайне высокочастотного
диапазона по измерениям на компактных полигонах 398

Тучков А. А., Горбатенко Н. Н., Нестеров В. Ю., Углов А. С., Чиков Н. И.

Искусственная нейронная сеть для коррекции амплитудно-фазового
распределения антенной решетки с учетом отказов антенных элементов 418

Присекин Р. В., Доценко О. А., Ткачѳв Д. А., Артищев С. А.,

Труфанова Н. С., Верхошанский Я. Ю., Темиргалиев А. И.

Разработка микрополоскового резонатора аддитивными методами
SLA-печати и экструзии паст 432

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

Метод повышения частотной эффективности многоканальной системы
передачи информации с частотным разделением абонентов 443

История науки и техники (5.6.6)

Проценко М. Б., Громоздин В. В.

Научно-практическая деятельность в филиале Национального
исследовательского центра телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева
в г. Севастополе (ИЦ «Омега») при создании и развитии новых компетенций
(к 10-летию филиала) 454

Ермолов П. П.

История развития средств связи, радиоуправления
и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002) 474

Пестриков В. М.

Функциональные особенности газонаполненных
ламповых триодов 20-х годов XX века 495

Афонин И. Л., Пестриков В. М.

Организатор Крымских микроволновых конференций
и историк науки и техники (к 75-летию П. П. Ермолова) 512

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2025

Vol. 8

No. 3

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yuri Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Editor-in-Chief

Volvach Alexander Evgenyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (Crimea, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Radio electronics and telecommunications” of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Editorial Board

Abramov Igor Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Research Laboratory “Physics of Micro- and Nanoelectronics Devices” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the “Radio electronics and telecommunications” Department of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of the Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Belkin Mikhail Yevseyevych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Scientific and Technological Laboratory and Professor of MIREA — Russian Technological University (Moscow, Russia)

Bichurin Mirza Imamovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Radio-Electronic Equipment of Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Bogatyryov Yuri Vladimirovych – Doctor of Technical Sciences, Chief researcher of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (Minsk, Belarus)

Borisova Nina Aleksandrovna – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor, Deputy director for science and technology of the Central Museum of Communications n. a. A. S. Popov, Professor of the department of information communication systems of the St. Petersburg University of Telecommunications n. a. Professor M. A. Bonch-Bruевич (St. Petersburg, Russia)

Gromov Dmitry Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the Office of Educational Programs, Chief Researcher of the Center for Extreme Applied Electronics Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russia)

Gudkov Aleksandr Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Technology of Instrumentation” of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Zaparyi Vladimir Vasilyevich – Doctor of Historical Sciences, Professor of the Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Zapevalov Vladimir Yevgenyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Gyrotrons for Controlled Thermonuclear Fusion at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod, Russia)

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Ilcev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ipatov Aleksandr Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

Kasyanov Aleksandr Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University (Taganrog, Russia)

Koloso Stanislav Vasilyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computing Methods and Programming of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Krivoruchko Yuri Timofeyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio-Electronic Systems of the St. Petersburg State University of Civil Aviation (St. Petersburg, Russia)

Larionov Mikhail Grigoryevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Astrocosmic Center of the Physical Institute n. a. P. N. Lebedev (Moscow, Russia)

Malyutin Nikolay Dmitriyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Designing Components and Parts of Radioelectronic Equipment, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

Noskov Vladislav Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Obukhov Ilya Andreyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

Ovchinnikova Yelena Viktorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 406 of the National Research University “Moscow Aviation Institute” (Moscow, Russia)

Pestrikov Victor Mikhaylovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of St. Petersburg State Institute of Film and Television (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexandr Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of Moscow Technical University of Communications and Informatics (Moscow, Russia)

Rudenko Konstantin Vasilyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Physics and Technologies of Nanoelectronics Devices of the National Research Center “Kurchatov Institute – K. A. Valiev Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, Professor of the National Research University Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexandr Sergeyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems n. a. V. A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky (Simferopol, Russia)

Chausov Denis Nikolayevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Photonics and Organic Electronics of the Biophotonics Center of the Institute of General Physics named after. A. M. Prokhorov Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Radio electronics and telecommunications” of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Bogush Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Evstigneyev Maksim Pavlovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Nemai Chandra Karmakar – Associate Professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Novikov Vladimir Vitalyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov (Sevastopol, Russia)

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@mail.ru
Website: <https://www.sevsu.ru/icrt>

Contents

Physical sciences

I. A. Obukhov

- Hypothetical Scenario of the Symmetry Between Electrons
and Positrons in the Universe Destroy351

N. A. Bogatov

- Microwave Radiation of Corona Discharge376

Electronics, photonics, instrumentation and communications

A. V. Kirpanev and N. A. Kirpanev

- Features of Research on Extremely High Frequency Range Antenna Systems
Using Compact Test Ranges398

A. A. Tuchkov, N. N. Gorbatenko, V. Yu. Nesterov, A. S. Uglov, and N. I. Chikov

- Artificial Neural Network for Correcting Amplitude-Phase Distribution
of an Antenna Array with Faulty Antenna Elements418

R. V. Prisekin, O. A. Dotsenko, D. A. Tkachev, S. A. Artishchev,

N. S. Trufanova, Ya. Yu. Verkhoshansky, and A. I. Temirgaliev

- Development of a Microstrip Resonator Using Additive Methods
of SLA Printing and Extrusion of Pastes432

A. N. Degtyaryov, I. L. Afonin, and A. L. Polyakov

- The Method for Increasing the Frequency Efficiency of a Multichannel
Information Transmission System with Frequency Division of Subscribers443

History of science and technology

M. B. Protsenko and V. V. Gromozdin

- Scientific and Practical Activities in Branch of the M. I. Krivosheev National
Research Centre for Telecommunication in Sevastopol (TC “Omega”) for Creation
and Development of New Competencies (for the 10th anniversary of the branch)454

P. P. Yermolov

- History of the Development of Communications, Radio Control
and Radio Direction Finding in the Black Sea Fleet (1826–2002)474

V. M. Pestrikov

- Functional Features of Gas-Filled Tube Triodes of the 20s of the XX Century495

I. L. Afonin and V. M. Pestrikov

- Organizer of the Crimean Microwave Conferences and Historian of Science
and Technology (on the 75th Anniversary of P. P. Yermolov)512

Гипотетический сценарий нарушения симметрии между электронами и позитронами во Вселенной

Обухов И. А.

Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

*5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, г. Москва, 115419, Российская Федерация
iao001@mail.ru*

Получено: 16 января 2025 г.

Отрецензировано: 4 апреля 2025 г.

Принято к публикации: 7 апреля 2025 г.

Аннотация: Предложена модель, в которой существует механизм нарушения симметрии между количеством спинорных заряженных частиц и античастиц. В рамках модели рассмотрен сценарий, при котором малые термодинамические флуктуации на ранней стадии эволюции Вселенной могут приводить к практически полному отсутствию античастиц в настоящее время.

Ключевые слова: частица, античастица, квазичастица, асимметрия, электро-нейтральность, флуктуация, химический потенциал, равновесие.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А. Гипотетический сценарий нарушения симметрии между электронами и позитронами во Вселенной // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 351—375.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Гипотетический сценарий нарушения симметрии между электронами и позитронами во Вселенной / И. А. Обухов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 351—375.

1. Введение

Проблема асимметрии между наблюдаемым количеством вещества и антивещества во Вселенной уже не одно десятилетие привлекает внимание исследователей [1, 2]. Однако до сих пор она не имеет однозначного решения.

Начало систематическому исследованию такого рода асимметрий положила широко известная статья академика А. Д. Сахарова [3], опубликованная в 1967 г. В ней были сформулированы три условия, при которых

возможно нарушение барионной симметрии: несохранение барионного числа; нарушение C - и CP -симметрий и нарушение термодинамического равновесия. Дальнейшие работы в этом направлении в основном были направлены на поиск механизмов, способных реализовать эти условия на ранних стадиях развития Вселенной [4—13]. В Стандартной модели физики элементарных частиц они отсутствуют [2]. Однако в различных расширениях Стандартной модели, теориях Большого объединения и суперсимметричных теориях возможен асимметричный бариогенезис.

В большинстве исследований процессами, нарушающими барионную симметрию, являются распады различных тяжелых бозонов. На определенной стадии расширения Вселенной при нарушении термодинамического равновесия они приводят к переходу плазмы частиц и античастиц из начального состояния с нулевым барионным числом в конечное равновесное состояние с отличным от нуля барионным числом [2, 8]. Среди множества такого рода вариантов выделяется электрослабый бариогенезис, который, как считает ряд авторов [2, 13], может быть подтвержден или опровергнут экспериментами в земных условиях на ускорителях элементарных частиц.

Интересным направлением в исследовании проблемы асимметрии окружающего нас мира является концепция генерации вещества из энтропии, предложенная А. Д. Сахаровым [14]. Она может реализовываться в различных инфляционных сценариях или в моделях осциллирующей Вселенной. При этом необходимо предполагать наличие отрицательной космологической постоянной в уравнениях Эйнштейна. Согласно имеющимся в настоящее время результатам астрономических наблюдений, плотность темной энергии и, следовательно, космологическая постоянная, положительны [15].

Исследуются также сценарии бариогенезиса, для которых нет необходимости в выполнении одного, двух или всех трех условий Сахарова (см. диссертацию [16] и цитируемую в ней литературу). К ним относятся, например, спонтанный и гравитационный бариосинтезы. Для реализации последнего необходима модификация уравнений Эйнштейна, приводящая к возникновению неустойчивостей.

Согласно современным представлениям, антивещество состоит из античастиц. Хронологически первым примером является античастица электрона — позитрон, существование которого предсказывало уравнение Дирака [17, 18]. Экспериментально он был открыт К. Д. Андерсоном в 1932 г. в опытах с космическими лучами [19].

Электроны и позитроны, взаимодействующие с электромагнитным полем, описываются спинорным полем $\Psi(x)$, которое является решением самосогласованной системы уравнений Дирака и Максвелла [17, 20, 21]

$$(i\hbar c\gamma^\mu \partial_\mu - e\gamma^\mu A_\mu(x) - mc^2)\Psi(x) = 0, \quad (1)$$

$$\partial^\mu F_\mu{}^\nu(x) = (4\pi e/c)[i^\nu(\Psi(x)) - J^\nu(x)], \quad (2)$$

где: $\hbar$ — приведенная постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, γ^μ — γ -матрицы Дирака, e — элементарный заряд, $A_\mu(x)$ — вектор-потенциал электромагнитного поля, m — масса электрона,

$$F_{\mu\nu}(x) = \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x) \quad (3)$$

— тензор электромагнитного поля,

$$i^\mu(\Psi(x)) = c\bar{\Psi}(x)\gamma^\mu\Psi(x) \quad (4)$$

— плотность потока спинорного поля $\Psi(x)$,

$$\bar{\Psi}(x) = \Psi^+(x)\gamma^0 \quad (5)$$

— дираковски сопряженное спинорное поле $\Psi(x)$, $\Psi^+(x)$ — транспонированное и комплексно сопряженное спинорное поле $\Psi(x)$, $J^\nu(x)$ — плотность внешнего потока. Отметим, что компонента $i^0(\Psi(x))$ положительно определена.

В этой статье используется метрика Минковского с сигнатурой $(1, -1, -1, -1)$, индексы у тензоров изменяются в пределах от 0 до 3, по повторяющимся сверху и снизу индексам подразумевается суммирование, для компонент четырехмерных координат справедливо: $x^\mu = (ct, \mathbf{r})$, где: t — время, $\mathbf{r}$ — трехмерный вектор пространственных координат, аргумент x означает набор всех четырех пространственно-временных координат.

Поскольку из уравнения (1) следует закон сохранения плотности потока спинорного поля

$$\partial_\nu i^\nu(\Psi(x)) = 0, \quad (6)$$

то уравнения (1) и (2) совместны, если и для плотности внешнего потока справедливо аналогичное соотношение

$$\partial_\nu J^\nu(x) = 0. \quad (7)$$

Решения системы уравнений (1) и (2) содержат состояния с положительными и отрицательными энергиями $E(x, \lambda)$ [17, 18, 20, 21]. Обобщенный индекс λ нумерует решения и представляет собой набор характеризующих их квантовых чисел. Переход спинорного поля из состояния с положительной энергией в состояние с отрицательной энергией, сопровождающийся излучением двух [22] и более фотонов [23], имеет ненулевую вероятность. Поэтому, с учетом принципа запрета Паули, с течением времени все состояния с отрицательной энергией должны быть заполнены. Интерпретация античастиц как вакансий или дырок в заполненных части-

цами состояниях спинорного поля с отрицательной энергией была предложена П. А. М. Дираком в работах [18, 23].

Процессы излучения и поглощения фотонов характеризуются вероятностями, то есть являются случайными. Положим, что средняя по этим случайным процессам плотность потока частиц в каждом состоянии с заданной энергией $E(x, \lambda)$ определяется формулой

$$\langle i^\mu(\Psi(x, \lambda)) \rangle = i^\mu(\Psi(x, \lambda))f(s(x, \lambda)), \quad (8)$$

где

$$f(s(x, \lambda)) = (\exp\{s(x, \lambda)\} + 1)^{-1} \quad (9)$$

— функция распределения Ферми — Дирака, а

$$s(x, \lambda) = (E(x, \lambda) - F(x, \lambda))/k_B T, \quad (10)$$

$F(x, \lambda)$ — химический потенциал, k_B — постоянная Больцмана, $T \geq 0$ — температура окружающей среды. Тогда, учитывая, что

$$\Psi(x) = \sum_\lambda \Psi(x, \lambda), \quad (11)$$

и предполагая

$$\langle \bar{\Psi}(x, \lambda) \gamma^\mu \Psi(x, \lambda') \rangle = \delta_{\lambda\lambda'}, \quad (12)$$

получим

$$\begin{aligned} \langle i^\mu(\Psi(x)) \rangle &= \sum_{\lambda_e} \langle i^\mu(\Psi(x, \lambda_e)) \rangle + \sum_{\lambda_p} \langle i^\mu(\Psi(x, \lambda_p)) \rangle = \\ &= \sum_{\lambda_e} i^\mu(\Psi(x, \lambda_e))f(s(x, \lambda_e)) + \sum_{\lambda_p} i^\mu(\Psi(x, \lambda_p))f(s(x, \lambda_p)). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь индексы λ_e и λ_p относятся к состояниям с положительными и отрицательными энергиями соответственно.

Соотношения (8) и (12) означают переход от описания в терминах состояний спинорного поля $\Psi(x)$ к описанию в терминах спинорных частиц. Они предполагают заполнение состояний в соответствии со статистикой Ферми — Дирака, то есть с учетом принципа запрета Паули, и отсутствие превращений частиц друг в друга без участия «третьих тел».

Функция распределения $f(s(x, \lambda_p))$ стремится к единице при $E(x, \lambda_p) \rightarrow -\infty$. Поэтому последнее слагаемое в выражении (13) может стать бесконечным. Это имеет место, например, для свободных спинорных полей, значения энергии которых ничем не ограничены.

Частицы в состояниях с отрицательной энергией образуют так называемое «море Дирака», плотности заряда и энергии которого могут быть бесконечными. Чтобы перейти от этих частиц к античастицам или дыркам в «море Дирака» введем новые функции распределения

$$f(x, E_e(x, \lambda_e)) = f(s(x, \lambda_e)), f(x, E_p(x, \lambda_p)) = 1 - f(s(x, \lambda_p)), \quad (14)$$

где

$$E_e(x, \lambda_e) = E(x, \lambda_e) \geq 0, E_p(x, \lambda_p) = -E(x, \lambda_p) \geq 0. \quad (15)$$

Из выражения (13) найдем

$$< i^\mu(\Psi(x)) > = i^{(e)\mu}(x) - i^{(p)\mu}(x) + I^{(s)\mu}(x). \quad (16)$$

Здесь:

$$i^{(e,p)\mu}(x) = \sum_{\lambda_{e,p}} i^\mu(\Psi(x, \lambda_{e,p})) f(x, E_{e,p}(x, \lambda_{e,p})), \quad (17)$$

$$I^{(s)\mu}(x) = \sum_{\lambda_p} i^\mu(\Psi(x, \lambda_p)). \quad (18)$$

В формуле (16) первые два слагаемых описывают конечные плотности потоков частиц, электронов, и квазичастиц, дырок в «море Дирака», имеющих положительные энергии. Поскольку вектор $< i^\nu(\Psi(x)) >$ входит в правую часть усредненного уравнения Максвелла (2)

$$\begin{aligned} \partial^\mu F_\mu^\nu(x) &= (4\pi e/c) [< i^\nu(\Psi(x)) > - < J^\nu(x) >] = \\ &= (4\pi e/c) [i^{(e)\nu}(x) - i^{(p)\nu}(x) + I^{(s)\nu}(x) - J^\nu(x)], \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} F_\mu^\nu(x) &= < F_\mu^\nu(x) > = \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x), A_\mu(x) = < A_\mu(x) >, \\ J^\nu(x) &= < J^\nu(x) >, \end{aligned} \quad (20)$$

то электронам и дыркам можно приписать различные знаки заряда, и интерпретировать квазичастицы дырки как позитроны — античастицы электронов. Последнее слагаемое $I^{(s)\mu}(x)$ представляет собой плотность потока самого «моря Дирака» и может быть неограниченно большим.

Основной современной гипотезой, описывающей возникновение и эволюцию нашей Вселенной, является теория Большого взрыва [1, 2]. Согласно этой теории на ранних стадиях эволюции Вселенная была однородной и изотропной. Также считается, что она была еще и электронейтральной, хотя абсолютно убедительных аргументов для такого предположения нет.

В момент Большого взрыва и после него электрически заряженные частицы и античастицы во Вселенной рождались и аннигилировали парами и их заряды компенсировали друг друга, сохраняя исходную электронейтральность. Согласно имеющимся данным астрономических наблюдений, такой же однородной и изотропной, но уже на больших масштабах (размеры 100 Мпк и более), а также электронейтральной Вселенная остается и сегодня [1, 2]. Однако количества наблюдаемых частиц и антича-

стиц кардинально различны, что вступает в противоречие с описанной картиной.

В силу однородности и изотропности пространственные компоненты всех векторов, входящих в правую часть уравнений Максвелла (19), должны быть равны нулю. Плотность потока $J^v(x)$ в этом случае не зависит от пространственных координат и имеет только одну ненулевую компоненту $J^0(t)$. Остальные плотности потоков представляют собой суммы (17) и (18). В этих суммах для каждой пространственной компоненты плотности потока найдется равная по абсолютной величине компонента плотности потока, движущегося в противоположном направлении. В результате для обеспечения электронейтральности необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$i^{(e)0}(t) - i^{(p)0}(t) = P^0(t), \quad (21)$$

где

$$P^v(x) = J^v(x) - I^{(s)v}(x). \quad (22)$$

Плотности $i^{(e)0}(t)$ и $i^{(p)0}(t)$ положительно определены, знак величины $P^0(t)$ может быть любым. При неравных нулю значениях $P^0(t)$ концентрации, а, следовательно, и количества электронов и позитронов, обеспечивающих выполнение требования электронейтральности (21), будут различны. Они равны друг другу только в частном случае

$$P^0(t) = 0. \quad (23)$$

Однако если предполагать, что в некоторый момент времени t_0 Вселенная была электронейтральной, а после него при $t \geq t_0$ электроны и позитроны рождались и уничтожались парами, этот частный случай становится единственно возможным начальным условием. Может ли оно нарушаться со временем? Поиску ответа на этот вопрос посвящена настоящая статья.

2. Модель

Кроме требования электронейтральности есть еще одно, более надежное соотношение, определяющее баланс между количеством частиц и античастиц. Из уравнения Дирака (1) следует закон сохранения плотности потока спинорного поля (6). Усредняя его по случайным процессам излучения и поглощения фотонов, получим

$$\partial_\mu \left(i^{(e)\mu}(x) - i^{(p)\mu}(x) + I^{(s)\mu}(x) \right) = 0. \quad (24)$$

В однородном и изотропном случае из этого соотношения следует

$$d \left(i^{(e)0}(t) - i^{(p)0}(t) + I^{(s)0}(t) \right) / dt = 0, \quad (25)$$

откуда с учетом равенства плотностей $i^{(e)0}$ и $i^{(p)0}$ в начальный момент времени t_0 при $t \geq t_0$ имеем

$$i^{(e)0}(t) - i^{(p)0}(t) = [I^{(s)0}(t_0) - I^{(s)0}(t)]. \quad (26)$$

Это выражение совпадает с условием электронейтральности (21), если $I^{(s)0}(t_0) = J^0(t_0)$ и $J^0(t) = J^0(t_0) = const$.

Согласно формуле (26) нарушение равенства концентраций электронов и позитронов может произойти только в случае, когда $I^{(s)0}$ зависит от времени. По определению (18) эта величина положительна и может зависеть от времени, только если нулевые компоненты плотностей потоков спинорных полей для состояний с отрицательной энергией зависят от времени.

В исходной электронейтральной Вселенной решениями уравнения Дирака являются плоские волны. Компоненты плотностей потоков для таких решений не зависят от времени и пространственных координат [20, 21]. Но такая зависимость может появиться как следствие влияния коллективных (термодинамических) процессов в электронно-позитронной плазме на микроскопические величины, описывающие ее компоненты. Последовательное описание такого влияния может быть дано в рамках стохастической электродинамики спинорных полей [24]. Здесь будут кратко изложены те ее положения, которые необходимы для получения ответа на поставленный во введении вопрос.

Предположим, что спинорные поля $\Psi(x, \lambda)$, входящие в сумму (11), удовлетворяют неоднородным уравнениям Дирака

$$\begin{aligned} & (i\hbar c \gamma^\mu \partial_\mu - e \gamma^\mu A_\mu^{(d)}(x) - mc^2) \Psi(x, \lambda) \\ & = (e/K) A_\mu^{(s)}(x) \sum_{\lambda'} (1 - \delta_{\lambda\lambda'}) \gamma^\mu \Psi(x, \lambda'), \end{aligned} \quad (27)$$

где $K = N - 1$, а N — количество возможных значений λ .

Для электромагнитных полей, описываемых векторами-потенциалами $A_\mu^{(d)}(x)$ и $A_\mu^{(s)}(x)$, потребуем выполнения уравнений Максвелла

$$\partial^\mu F_\mu^{(d)\nu}(x) = (4\pi e/c) [i^{(d)\nu}(\Psi(x)) - J^\nu(\Phi(x))], \quad (28)$$

$$\partial^\mu F_\mu^{(s)\nu}(x) = (4\pi e/c) i^{(s)\nu}(\Psi(x)), \quad (29)$$

где

$$F_{\mu\nu}^{(d,s)}(x) = \partial_\mu A_\nu^{(d,s)}(x) - \partial_\nu A_\mu^{(d,s)}(x), \quad (30)$$

$$A_\mu(x) = A_\mu^{(d)}(x) + A_\mu^{(s)}(x), \quad (31)$$

$$F_{\mu\nu}(x) = F_{\mu\nu}^{(d)}(x) + F_{\mu\nu}^{(s)}(x). \quad (32)$$

Плотности потоков $i^{(d)\mu}(\Psi(x))$ и $i^{(s)\mu}(\Psi(x))$ определены следующим образом

$$i^{(d)\mu}(\Psi(x)) = \sum_{\lambda} i^{(d)\mu}(\Psi(x, \lambda)), \quad (33)$$

$$i^{(s)\mu}(\Psi(x)) = \sum_{\lambda} i^{(s)\mu}(\Psi(x, \lambda)). \quad (34)$$

Здесь

$$i^{(d)\mu}(\Psi(x, \lambda)) = \sum_{\lambda'} i^{(d)\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')), \quad (35)$$

$$i^{(d)\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')) = \delta_{\lambda\lambda'} i^{\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')), \quad (36)$$

$$i^{(s)\mu}(\Psi(x, \lambda)) = \sum_{\lambda'} i^{(s)\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')), \quad (37)$$

$$i^{(s)\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')) = (1 - \delta_{\lambda\lambda'}) i^{\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')), \quad (38)$$

$$i^{\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')) = c \bar{\Psi}(x, \lambda) \gamma^{\mu} \Psi(x, \lambda'). \quad (39)$$

Легко видеть, что справедливо соотношение

$$i^{\mu}(\Psi(x)) = i^{(d)\mu}(\Psi(x)) + i^{(s)\mu}(\Psi(x)). \quad (40)$$

Просуммировав уравнения (27) по λ , получим уравнения Дирака (1) для спинорного поля $\Psi(x)$. Сложив уравнения (28) и (29), с учетом данных определений получим уравнения Максвелла (2) для электромагнитного поля, определяемого тензором $F_{\mu\nu}(x)$.

Из (27) следуют уравнения баланса плотностей потоков полей $\Psi(x, \lambda)$

$$\begin{aligned} \partial_{\mu} i^{(d)\mu}(\Psi(x, \lambda)) &= -(ie/c\hbar K) A_{\mu}^{(s)}(x) \\ \sum_{\lambda'} (i^{\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')) - i^{\mu}(\Psi(x, \lambda'), \Psi(x, \lambda))) &= 0. \end{aligned} \quad (41)$$

Правые части в (41) описывают переходы между спинорными полями с различными индексами λ , обусловленные их взаимодействием с электромагнитным полем $A_{\mu}^{(s)}(x)$. В отсутствии этого поля плотности потоков каждого из спинорных полей $\Psi(x, \lambda)$ сохраняются по отдельности, а уравнения (27) переходят в обычные однородные уравнения Дирака.

В стохастической электродинамике электромагнитные поля, описываемые вектором-потенциалом $A_{\mu}^{(s)}(x)$, считаются случайными и соответствуют фотонам. Усреднение соотношений (41) по случайным процессам излучения и поглощения фотонов приводит к уравнениям баланса средних плотностей потоков электронов и позитронов

$$\partial_{\mu} i^{(e)\mu}(x, \lambda_e) = \sum_{\lambda'_e} R(x; \lambda_e, \lambda'_e) + \sum_{\lambda_p} R(x; \lambda_e, \lambda_p), \quad (42)$$

$$\partial_{\mu} i^{(p)\mu}(x, \lambda_p) = -\sum_{\lambda'_p} R(x; \lambda_p, \lambda'_p) - \sum_{\lambda_e} R(x; \lambda_p, \lambda_e) + \partial_{\mu} i^{\mu}(x, \lambda_p), \quad (43)$$

где

$$i^{(e,p)\mu}(x, \lambda_{e,p}) = i^{\mu}(\Psi(x, \lambda_{e,p})) f(x, E_{e,p}(x, \lambda_{e,p})), \quad (44)$$

$$\begin{aligned} R(x; \lambda, \lambda') &= -\langle (ie/c\hbar K) A_{\mu}^{(s)}(x) \\ \sum_{\lambda'} (i^{\mu}(\Psi(x, \lambda), \Psi(x, \lambda')) - i^{\mu}(\Psi(x, \lambda'), \Psi(x, \lambda))) &> \end{aligned} \quad (45)$$

— скорости изменения средних плотностей потоков спинорных частиц.

Величины $R(x; \lambda, \lambda')$ выражаются через произведения квантовомеханических вероятностей процессов излучения и поглощения реальных и виртуальных фотонов в плазме и статистического фактора, связывающего полную вероятность реализации процесса с функциями распределения спинорных частиц и фотонов [24]

$$\begin{aligned} Q(x; k, \lambda, \lambda') = & \theta(z(x, k))[(1 - f(s(x, \lambda)))f(s(x, \lambda'))(1 + \rho(z(x, k))) - \\ & - (1 - f(s(x, \lambda'))f(s(x, \lambda))\rho(z(x, k)))] - \\ & - \theta(-z(x, k))[(1 - f(s(x, \lambda'))f(s(x, \lambda))(1 + \rho(-z(x, k))) - \\ & - (1 - f(s(x, \lambda))f(s(x, \lambda'))\rho(-z(x, k)))] \end{aligned} \quad (46)$$

Здесь

$$\rho(z) = 1/(\exp\{z\} - 1) \quad (47)$$

— функция распределения фотонов (распределение Бозе — Эйнштейна),

$$z(x, k) = \hbar ck^0 / k_B T \quad (48)$$

k^0 — нулевая компонента волнового вектора фотона (реального или виртуального).

Статистический множитель $Q(x; k, \lambda, \lambda')$ обращается в нуль, когда выполнено условие детального равновесия

$$s(x, \lambda') - s(x, \lambda) - z(x, k) = 0. \quad (49)$$

В процессах, идущих с сохранением энергии, и при температурном равновесии, то есть при одинаковой температуре всех спинорных частиц, античастиц и фотонов, как мы здесь и предполагаем согласно (10) и (48), условие (49) превращается в условие локального химического равновесия

$$F(x, \lambda) = F(x, \lambda'). \quad (50)$$

При детальном равновесии скорости $R(x; \lambda, \lambda')$ равны нулю. То есть в этом случае даже при ненулевых квантовомеханических вероятностях переходов между спинорными полями в среднем эти переходы не происходят. Просматривается прямая аналогия с процессами генерации и рекомбинации носителей заряда в полупроводниках [25].

В выражении (46) учтены как спонтанные, так и вынужденные переходы. В результате уравнения (42) и (43) позволяют рассчитывать средние плотности потоков $i^{(e)\mu}(x, \lambda_e)$ и $i^{(p)\mu}(x, \lambda_p)$ для каждой частицы и античастицы с учетом скоростей переходов: электрон — электрон $R(x; \lambda_e, \lambda'_e)$, позитрон — позитрон $R(x; \lambda_p, \lambda'_p)$ и электрон — позитрон $R(x; \lambda_p, \lambda_e)$.

Просуммировав уравнения (42) по всем λ_e , а уравнения (43) по всем λ_p , получим

$$\partial_\mu i^{(e)\mu}(x) = R^{(e,p)}(x), \quad (51)$$

$$\partial_\mu i^{(p)\mu}(x) = R^{(e,p)}(x) + \partial_\mu I^{(s)\mu}(x), \quad (52)$$

где

$$R^{(e,p)}(x) = \sum_{\lambda_e} \sum_{\lambda_p} R(x; \lambda_e, \lambda_p) = -\sum_{\lambda_p} \sum_{\lambda_e} R(x; \lambda_p, \lambda_e). \quad (53)$$

Система уравнений (51), (52) уже менее содержательна, по сравнению с системой (42), (43). Из нее можно найти только суммарные средние плотности потоков электронов $i^{(e)\mu}(x)$ и позитронов $i^{(p)\mu}(x)$ с учетом только суммарных скоростей переходов электрон — позитрон $R^{(e,p)}(x)$.

Вычитая уравнение (52) из (51), приходим к уже знакомому закону сохранения (24). Из него можно определить только разность суммарных средних потоков частиц и античастиц.

Уравнения (42), (43) и (51), (52) позволяют учесть влияние квантовых процессов на коллективное поведение частиц и античастиц. Исходные уравнения (27) предоставляют возможность рассчитать и обратное влияние, которое выражается соотношением

$$\Psi(x, \lambda) = \Psi_0(x, \lambda) \exp\{-iS^{(ret)}(x, \lambda)\}. \quad (54)$$

Здесь $\Psi_0(x, \lambda)$ — спинорное поле в некоторый начальный момент времени, а $\Psi(x, \lambda)$ — спинорное поле во все последующие времена. Функция $S^{(ret)}(x, \lambda)$ описывает поправки к $\Psi_0(x, \lambda)$ от всех возможных квантовых процессов, которые могут произойти после начального момента с учетом статистического фактора.

Она может быть вычислена по теории возмущений [24]. Для однородной, изотропной и электронейтральной плазмы электронов, позитронов и фотонов основной вклад в $S^{(ret)}(x, \lambda)$ дает взаимодействие спинорной частицы или античастицы в состоянии с индексом λ со всеми остальными частицами и античастицами, которое иллюстрируют диаграммы на рис. 1.

Разность концентраций электронов $n^{(e)}(t)$ и позитронов $n^{(p)}(t)$ согласно (26) и (54) определяется формулой

$$n^{(e)}(t) - n^{(p)}(t) = N(t), \quad (55)$$

где

$$n^{(e,p)}(t) = c^{-1} i^{(e,p)0}(t), \quad (56)$$

$$N(t) = c^{-1} [I^{(s)0}(t_0) - I^{(s)0}(t)] = c^{-1} \sum_{\lambda_p} i^0(\Psi_0(x, \lambda_p)) [\exp\{2ImS^{(ret)}(t_0, \lambda_p)\} - \exp\{2ImS^{(ret)}(t, \lambda_p)\}]. \quad (57)$$

Таким образом, нарушение баланса между концентрациями электронов и позитронов, существовавшего в начальный момент времени t_0 , возможно, только если

$$ImS^{(ret)}(t, \lambda_p) \neq ImS^{(ret)}(t_0, \lambda_p).$$

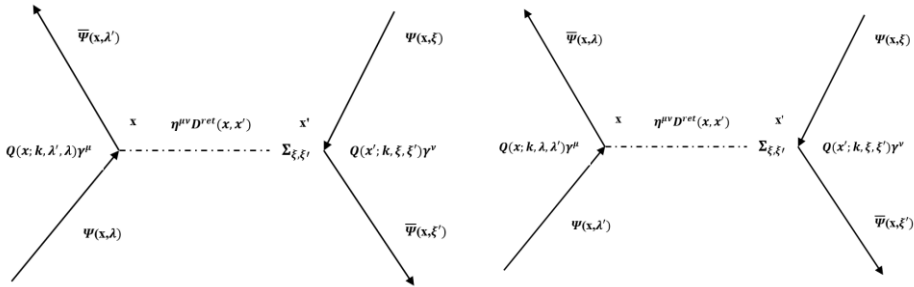


Рис. 1. Взаимодействие спинорного поля со всеми остальными спинорными полями в плазме. $\eta^{\mu\nu}$ — тензор Минковского, $D^{ret}(x, x')$ — запаздывающая функция Грина фотона.

Fig. 1. Interaction of spinor field with all another spinor fields in plasma.
 $\eta^{\mu\nu}$ – Minkovsky tensor, $D^{ret}(x, x')$ – retarded Green function of photon

3. Малая флуктуация химических потенциалов и ее последствия

Предположим, что до момента времени t_0 существовала однородная, изотропная, электронейтральная и равновесная смесь невырожденных газов электронов и позитронов с нулевыми химическими потенциалами

$$F(\lambda_e)|_{t < t_0} = 0, F(\lambda_p)|_{t < t_0} = 0, \text{ для всех } \lambda_e \text{ и } \lambda_p \quad (58)$$

и температурами, равными средней температуре Вселенной $T(t)$. В момент времени t_0 , когда выполнялось условие

$$k_B T(t_0) < mc^2, \quad (59)$$

произошла малая флуктуация химических потенциалов спинорных Ψ полей, такая, что

$$F(\lambda_e)|_{t=t_0} = F, F(\lambda_p)|_{t=t_0} = -F, F = const, \text{ для всех } \lambda_e \text{ и } \lambda_p, \quad (60)$$

$$0 < F/k_B T(t_0) \ll 1, \quad (61)$$

а температура частиц и античастиц при этом оставалась равной $T(t)$.

В момент t_0 химическое равновесие между газами электронов и позитронов нарушилось. При этом и до флуктуации, и в момент флуктуации концентрации электронов и позитронов равны друг другу.

Складывая уравнения (51) и (52), получим уравнение

$$d[n^{(e)}(t) + n^{(p)}(t)]/dt = 2R^{(e,p)}(t) + dI^{(s)0}(t)/dt. \quad (62)$$

Предполагая дополнительно, что компоненты каждого из рассматриваемых газов находятся в химическом равновесии друг с другом, для концентраций электронов и позитронов запишем

$$\begin{aligned} n^{(e)}(t) &= n_0(t) \exp\{F^{(e)}(t)/k_B T(t)\}, \\ n^{(p)}(t) &= n_0(t) \exp\{-F^{(p)}(t)/k_B T(t)\}, \end{aligned} \quad (63)$$

где

$$n_0(t) = 2(mk_B T(t)/2\pi\hbar^2)^{3/2} \exp\{-mc^2/k_B T(t)\}, \quad (64)$$

а $F^{(e,p)}(t)$ — химические потенциалы электронов и позитронов. В работе [26] показано, что $R^{(e,p)}(t)$ можно представить в виде

$$R^{(e,p)}(t) = -c\pi(r_0/3)^2 n^{(e)}(t) n^{(p)}(t) [1 - \exp\{F^{(-)}(t)/2k_B T(t)\}]. \quad (65)$$

Здесь

$$r_0 = e^2/mc^2 \quad (66)$$

— классический радиус электрона,

$$F^{(-)}(t) = F^{(e)}(t) - F^{(p)}(t). \quad (67)$$

В рассматриваемом случае решениями уравнений Дирака $\Psi_0(x, \lambda)$ являются плоские волны, и все плотности потоков в нулевом приближении сохраняются. Поэтому последним слагаемым в правой части уравнения (62) можно пренебречь. В результате получим приближенное уравнение для разности химических потенциалов электронов и позитронов

$$d(F^{(-)}(t)/k_B T(t))/dt = -(F^{(-)}(t)/k_B T(t))/\tau_{rel}(t), \quad (68)$$

где

$$\tau_{rel}(t) = (18/c\pi r_0^2)(2\pi\hbar^2/mk_B T(t))^{3/2} \exp\{mc^2/k_B T(t)\}. \quad (69)$$

Его приближенное решение при начальных условиях (60) имеет вид

$$F^{(-)}(t) \approx 2F(T(t)/T(t_0)) \exp\{-(t - t_0)/\tau_{rel}(t_0)\}. \quad (70)$$

Согласно современным представлениям о ранних стадиях развития Вселенной [1, 2, 27] в период времени от момента Большого взрыва ($t = 0$) до 200-й секунды ее температура менялась в пределах от $10^{32}^\circ K$ до $10^9 K$. Соответствующее время релаксации τ_{rel} изменяется при этом в пределах от 10^{-49} с до 10^{-12} с. При таких значениях τ_{rel} малые отклонения от химического равновесия газов электронов и позитронов практически мгновенно экспоненциально затухают и газы становятся равновесными.

Однако, как только температура становится меньше, чем

$$T_e = mc^2/k_B \approx 5,94 \cdot 10^9 K,$$

время релаксации τ_{rel} начинает быстро возрастать с уменьшением температуры Вселенной, которая изменяется по приближенному закону

$$T \sim 10^{10} K \cdot \text{сек}^{1/2} / t^{1/2}.$$

Из уравнения

$$\tau_{rel}(t_H) = 1/H$$

где H — постоянная Хаббла в настоящее время, нетрудно оценить время t_H и температуру T_H , при которых τ_{rel} становится равным возрасту Вселенной:

$$t_H \sim 1,4 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 4 \text{ часа}, T_H \approx 8,55 \cdot 10^7 \text{ K}.$$

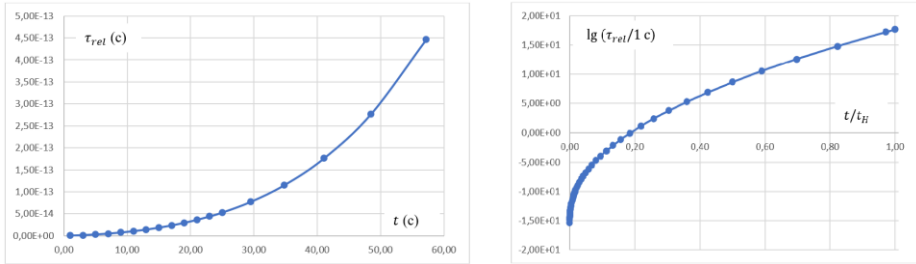


Рис. 2. Поведение τ_{rel} в первую минуту после Большого взрыва (слева) и на интервале от 1 с до t_H (справа).

Fig. 2. Behavior of τ_{rel} in the first minute after the Big bang (left curve) and in the range from 1 s to t_H (right curve)

Таким образом, малые флуктуации химических потенциалов или, что то же самое, концентраций электронов и позитронов, возникшие при $t > t_H$, не затухнут до настоящего времени. Графики зависимости τ_{rel} от времени представлены на рис. 2.

Как показано в [24], при сделанных предположениях в главном приближении справедливо соотношение

$$S^{(ret)}(t, p) \approx -(F/k_B T(t_0))(f(t_0, E_p(p)))^{1/2} \\ (4\pi\alpha)c\hbar^{-1}(mc)^{-5}(2\pi\hbar)^{-3} \int d^3p' \int d^3q \int d^3q' \delta^3((\mathbf{q} + \mathbf{q}')/\hbar - (\mathbf{p}' + \mathbf{p})/\hbar) \\ [f(t_0, E_e(p'))f(t_0, E_p(q'))f(t_0, E_e(q'))]^{1/2} I(t, t_0, \varepsilon), \quad (71)$$

где: $\alpha = e^2/\hbar c$ — постоянная тонкой структуры; p^μ — 4-импульс позитрона, к волновой функции которого ищется поправка; p'^μ, q^μ, q'^μ — 4-импульсы электронных и позитронных состояний, дающих вклад в искомую поправку;

$$I(t, t_0, \varepsilon) = \int_{t_0}^t dt' \exp\{-(t' - t_0)/\tau_{rel}(t_0) - i\varepsilon t' / \hbar\}, \quad (72)$$

$$\varepsilon = c(p_0 + p'_0 - q_0 - q'_0). \quad (73)$$

Интеграл (72) легко вычисляется

$$I(t, t_0, \varepsilon) = -\hbar\tau_{rel}(t_0)(\hbar - i\varepsilon\tau_{rel}(t_0))/[\hbar^2 + (\varepsilon\tau_{rel}(t_0))^2] \\ [\exp\{-(t - t_0)/\tau_{rel}(t_0) - i\varepsilon t / \hbar\} - \exp\{-i\varepsilon t_0/\hbar\}]. \quad (74)$$

Очевидно, что

$$I(t_0, t_0, \varepsilon) = 0, S^{(ret)}(t_0, p) = 0.$$

Если справедливо неравенство

$$t - t_0 \gg \tau_{rel}(t_0), \quad (75)$$

то

$$I(t, t_0, \varepsilon) \approx I(t_0, \varepsilon) = \\ = \tau_{rel}(t_0) \hbar (\hbar - i\varepsilon \tau_{rel}(t_0)) / [\hbar^2 + (\varepsilon \tau_{rel}(t_0))^2] \exp\{-i\varepsilon t_0 / \hbar\}. \quad (76)$$

Величина $I(t_0, \varepsilon)$ уже не зависит от текущего времени t , а зависит только от момента времени t_0 , когда произошла флуктуация. Это справедливо для настоящего времени, если

$$t_H - t_0 \gg \tau_{rel}(t_0). \quad (77)$$

Дополнительно будем считать, что неопределенность в разности энергий квазичастиц порядка энергии тепловых флуктуаций в момент времени t_0

$$\varepsilon \approx k_B T(t_0) \quad (78)$$

и

$$\tau_{rel}(t_0) \gg \hbar / k_B T(t_0). \quad (79)$$

Неравенство (79) выполняется при всех временах t_0 , больших одной секунды.

Из сделанных предположений следует, что

$$N \approx -(8\pi\alpha)(F/k_B T(t_0))(mc^2/k_B T(t_0))(\hbar/mc)^3(n_0(t_0))^2 \cos\varphi. \quad (80)$$

где

$$\varphi = k_B T(t_0) t_0 / \hbar. \quad (81)$$

Таким образом, если флуктуация химических потенциалов электронов и позитронов произошла намного раньше, чем t_H , то при временах, удовлетворяющих условию (75), концентрация N , представляющая собой разницу концентраций спинорных полей в «море Дирака» до и после флуктуации, не зависит от текущего времени и является функцией от момента флуктуации t_0 , отсчитываемого от Большого взрыва, и ее амплитуды F . Последнюю можно оценить, полагая [28]

$$\delta N_0 \approx N_0^{1/2}, \quad (82)$$

где

$$N_0 = (8\pi/3)n_0(t_0)(ct_0)^3, \quad (83)$$

число электронов и позитронов во Вселенной в момент времени t_0 . Откуда следует, что

$$F/k_B T(t_0) \approx [8\pi n_0(t_0)(ct_0)^3/3]^{-1/2}. \quad (84)$$

В результате получим

$$N \approx -N_{max} \cos \varphi, \quad (85)$$

$$N_{max} = 2\alpha(6\pi)^{1/2}(mc^2/k_B T(t_0))(n_0(t_0)/ct_0)^{3/2}(\hbar/mc)^3. \quad (86)$$

На рис. 3 представлена зависимость плотности N_{max} от времени флуктуации t_0 . Когда t_0 около одной секунды, N_{max} порядка 10^{-3} см^{-3} , а затем быстро убывает со временем. Если флуктуация произошла через час после Большого взрыва, то N_{max} уже порядка 10^{-33} см^{-3} .

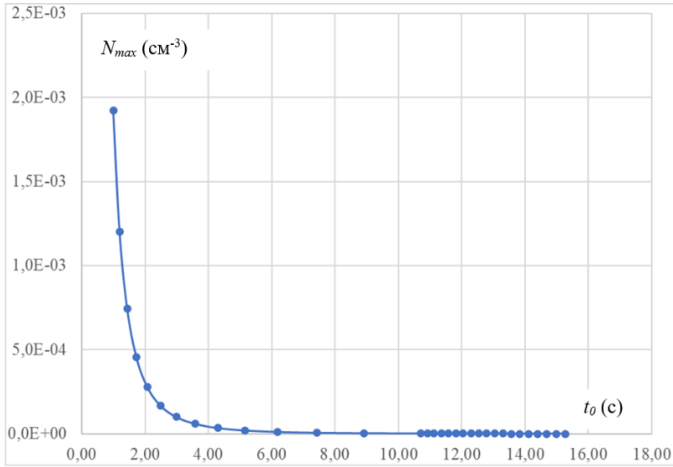


Рис. 3. Зависимость плотности N_{max} от времени флуктуации t_0 .

Fig. 3. Dependence of density N_{max} of the time t_0

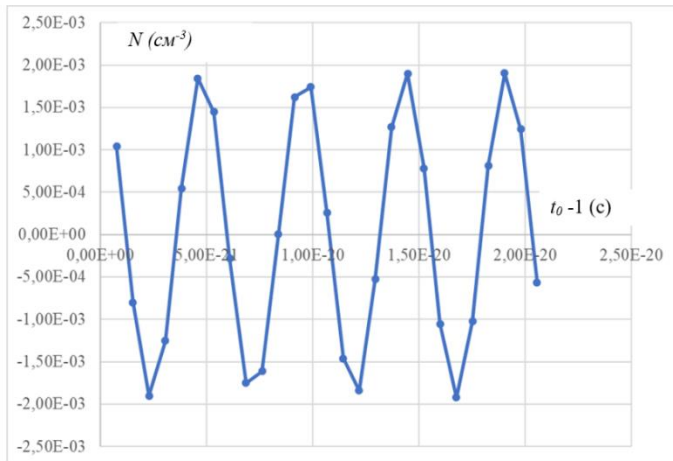


Рис. 4. Поведение N как функции $t_0 - 1$.

Fig. 4. Behavior of N as a function of $t_0 - 1$

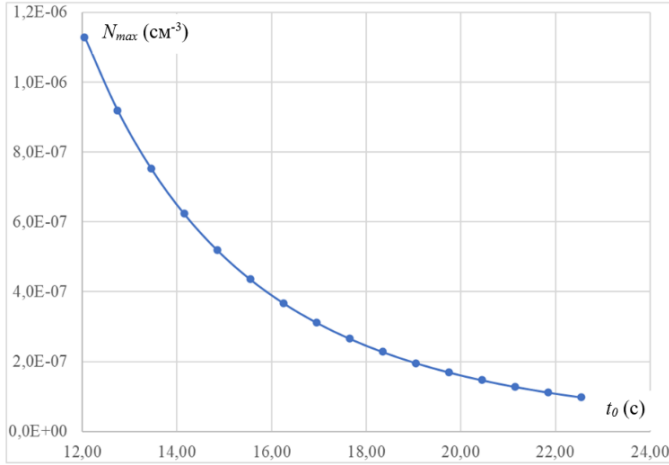


Рис. 5. Зависимость плотности N_{max} от времени флуктуации t_0 в интервале от 12 с до 22,5 с.

Fig. 5. Dependence of density N_{max} of fluctuation time t_0 in the interval from 12 s to 22,5 s

Сама концентрация N в зависимости от времени возникновения флуктуации t_0 может быть положительной, отрицательной или равняться нулю. Она очень быстро осциллирует, как функция t_0 (см. рис. 4), поскольку угол φ возрастает с ростом t_0 как $A \cdot t_0^{1/2}$, где $A \sim 10^{21} \text{ с}^{-1/2}$.

Если флуктуация произошла между двенадцатой и двадцать третьей секундами, то $\tau_{rel} \sim 10^{-14} \text{ с}$, а концентрация N_{max} изменяется от 10^{-6} см^{-3} до 10^{-7} см^{-3} , как показано на рис. 5. Эти значения соответствуют современным представлениям о плотности барионной материи во Вселенной [2, 3, 15], а t_0 удовлетворяет условию (77).

Через небольшой промежуток времени после флуктуации, удовлетворяющий неравенству (75), газы электронов и позитронов приходят в состояние химического равновесия, характеризуемое равновесным химическим потенциалом $F^{eq}(t)$, и для их концентраций справедливы выражения

$$\begin{aligned} n^{(e)}(t) &= n_0(t) \exp\{F^{eq}(t)/k_B T(t)\}, \\ n^{(p)}(t) &= n_0(t) \exp\{-F^{eq}(t)/k_B T(t)\}, \end{aligned} \quad (87)$$

Из соотношений (55) и (87) получим

$$n^{(e)}(t) = N/2 + (N^2/4 + n_0^2(t))^{1/2}, \quad (88)$$

$$n^{(p)}(t) = -N/2 + (N^2/4 + n_0^2(t))^{1/2}, \quad (89)$$

$$F^{eq}(t) = (k_B T(t)/2) \ln\{[(N^2/4 + n_0^2(t))^{1/2} + N/2] / [(N^2/4 + n_0^2(t))^{1/2} - N/2]\}. \quad (90)$$

Для настоящего времени t_{now} справедлива оценка

$$n_0(t_{now}) \sim 10^{17} \exp\{-3,91 \cdot 10^8\} \text{ см}^{-3}.$$

Если

$$|N| \sim 10^{-7} \text{ см}^{-3},$$

то, очевидно

$$n_0 \ll |N|.$$

Положим, что $N > 0$, тогда для настоящего времени получим

$$n^{(e)} \approx N, n^{(p)} \approx n_0^2/N \ll n^{(e)}. \quad (91)$$

Таким образом, концентрация позитронов в современной Вселенной оказывается ничтожно малой.

Для химического потенциала в настоящее время найдем

$$\begin{aligned} F^{eq}(t_{now}) &\approx k_B T(t_{now}) \ln[n^{(e)}(t_{now})/n_0(t_{now})] \approx \\ &\approx mc^2 \{1 - (k_B T(t_{now})/mc^2) \ln[2(mk_B T(t_{now})/2\pi\hbar^2)^{3/2}/N]\} \approx \\ &\approx mc^2 (1 - 2,7 \cdot 10^{-7}). \end{aligned} \quad (92)$$

Для получения численной оценки в выражении (92) выбрано значение $N = 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6 показана зависимость химического потенциала электронов $F^{(e)}$ от времени. Практически также ведет себя и потенциал F^{eq} , поскольку он отличается от $F^{(e)}$ только на малом интервале времени порядка $\tau_{rel} \sim 10^{-14} \text{ с}$. Через время τ_{rel} после флуктуации химический потенциал

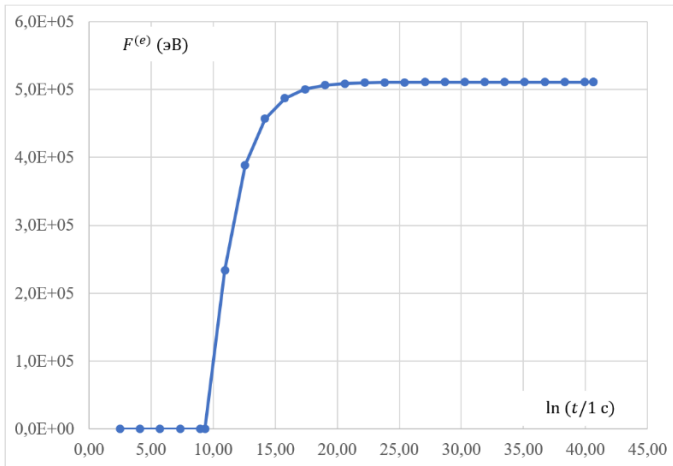


Рис. 6. Зависимость химического потенциала электронов от времени.

Fig. 6. Time dependence of chemical potential of electrons

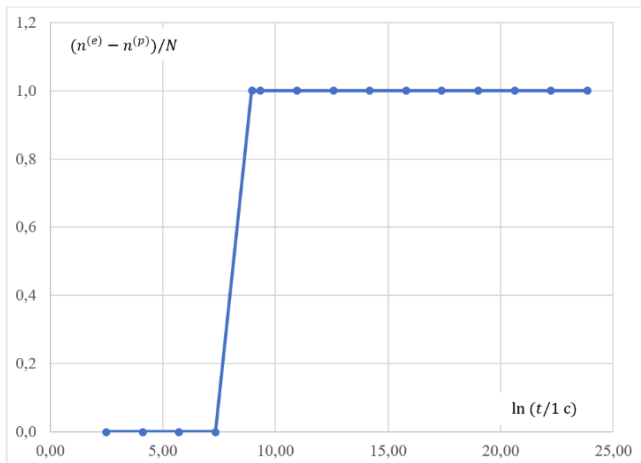


Рис. 7. Нормированная разность концентраций электронов и позитронов как функция времени.

Fig. 7. Normed difference between electron and positron concentrations as a function of time

$F^{(e)}$ был порядка 10^{-27} эВ, что составляет 10^{-32} от mc^2 . При этом начальные концентрации электронов и позитронов были от 10^{29} см^{-3} до 10^{28} см^{-3} и на этом фоне концентрация $|N| \sim 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ вносила очень малую асимметрию между частицами и античастицами.

Заметный рост химического потенциала электронов начинается при временах близких к $t_H \sim 10^4$ с. При временах $t \sim 10^{10}$ с ~ 300 лет величина $F(t)$ становится практически равной mc^2 .

Аналогичное поведение демонстрирует нормированная разность концентраций электронов и позитронов, показанная на рис. 7. Видно, что существенная асимметрия между концентрациями частиц и античастиц проявляется уже при временах порядка 10^4 с.

4. Возможность экспериментальной проверки сценария

Для экспериментальной проверки описанного сценария необходимо в некотором объеме создать условия, близкие по ряду параметров к существовавшим во Вселенной между двенадцатой и двадцать третьей секундами после Большого взрыва. Во-первых, колоссальную температуру от двух до трех миллиардов градусов Кельвина. Речь идет не об эффективной температуре, рассчитанной из энергии сталкивающихся на ускорителе объектов, а о температуре, понимаемой, как средняя энергия неупорядоченного движения частиц.

Во-вторых, в этом объеме необходимо создать огромную концентрацию (порядка 10^{29} см^{-3}) гамма-фотонов с энергией вблизи 511 кэВ (с частотой приблизительно $1,24 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$). На рис. 8 показаны распределения спектральной плотности мощности тепловых фотонов на 12-й, 15-й, 20-й и 23-й секундах. Видно, что максимумы распределений находятся при энергиях, близких к пороговому для рождения электронно-позитронных пар в процессе Брейта — Уилера [21, 29] и их двухфотонной аннигиляции значению 511 кэВ, что повышает вероятность этих процессов [21, 22].

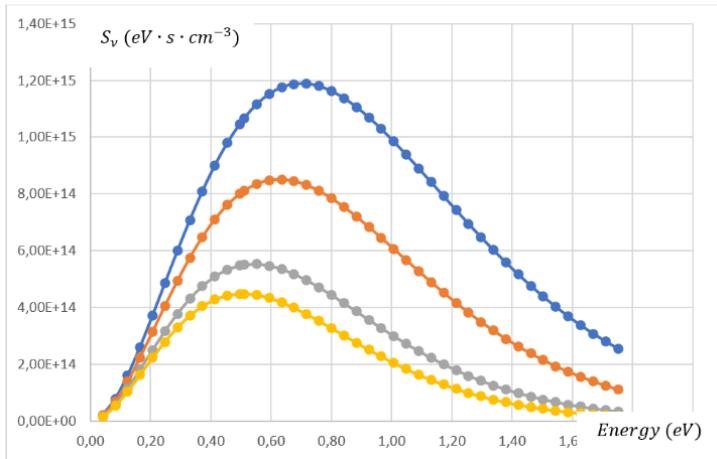


Рис. 8. Спектральная плотность мощности тепловых фотонов на 12-й ($T = 2,89 \cdot 10^9 \text{ K}$), 15-й ($T = 2,58 \cdot 10^9 \text{ K}$), 20-й ($T = 2,24 \cdot 10^9 \text{ K}$) и 23-й ($T = 2,09 \cdot 10^9 \text{ K}$) секундах (кривые сверху вниз).

Fig. 8. Spectral power density of thermal photons at the 12th ($T = 2,89 \cdot 10^9 \text{ K}$), 15th ($T = 2,58 \cdot 10^9 \text{ K}$), 20th ($T = 2,24 \cdot 10^9 \text{ K}$) and 23rd ($T = 2,09 \cdot 10^9 \text{ K}$) seconds (curves from top to bottom)

Вероятность исследуемой флуктуации обратно пропорциональна квадратному корню из среднего числа частиц (электронов и позитронов) [28]. В ранней Вселенной в рассматриваемый промежуток времени она была очень мала, порядка 10^{-33} . Сохраняя концентрацию частиц, определяемую только температурой, вероятность можно увеличить за счет многократного уменьшения объема. Для объема в 1 см^{-3} она составит уже 10^{-16} . Тем не менее, экспериментальная проверка описанного сценария в земных условиях представляется маловероятной до тех пор, пока не будут созданы достаточно мощные источники рентгеновских фотонов, обеспечивающих необходимые для флуктуации условия.

Также правомерным является вопрос о наличии признаков исследуемой флуктуации в спектре реликтового излучения. Однако рассматривае-

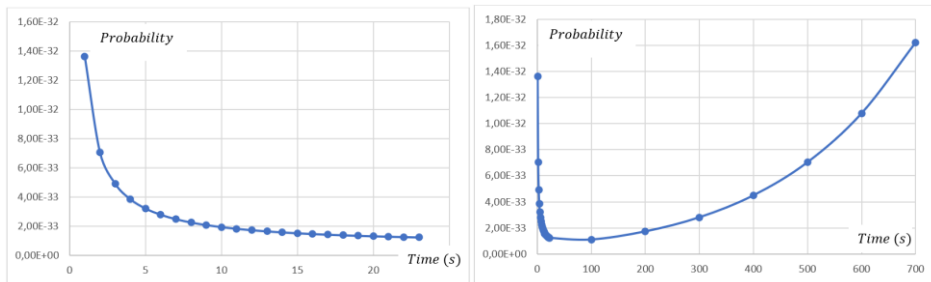


Рис. 9. Вероятность флуктуации числа электронов и позитронов в ранней Вселенной.

Fig. 9. Probability of the electron and positron numbers fluctuation in the early Universe

мое событие произошло задолго до эры рекомбинации и, как показано в [1], его следы не могут быть обнаружены сегодня в характеристиках реликтового излучения из-за большого количества избыточных электронов и позитронов, участвующих на границе лептонной стадии и эры фотонной плазмы в «замывании» его спектра.

5. Заключение

Мы рассмотрели модель, которая на примере электронов и позитронов позволяет объяснить практически полное отсутствие античастиц в окружающем нас мире. В основе модели лежат:

- представление об античастицах, как о дырках в «море Дирака»;
- описание спинорных полей при помощи системы неоднородных уравнений Дирака;
- интерпретация процессов излучения и поглощения фотонов как случайных.

В рамках модели возможна реализация следующего сценария.

В первые секунды после Большого взрыва концентрации электронов и позитронов во Вселенной были одинаковыми. Они находились в температурном и химическом равновесии с равными нулю химическими потенциалами. В промежутке между двенадцатой и двадцать третьей секундами произошла малая флуктуация химических потенциалов электронов и позитронов, которая сделала их газы химически неравновесными.

Флуктуация быстро затухла и за время порядка 10^{-14} с система вернулась к состоянию химического равновесия, но уже с ненулевым химическим потенциалом. Этот потенциал возрастал со временем пока примерно через четыре часа не достиг значения, близкого к энергии покоя электрона mc^2 .

Аналогичным образом вела себя и разность концентраций электронов и позитронов, которая за такой же промежуток времени изменилась от

нуля до величины N порядка 10^{-7} см^{-3} , соответствующей наблюдаемой в настоящее время средней концентрации электронов во Вселенной. Эта разница была мала на фоне изначальных концентраций электронов и позитронов порядка 10^{29} см^{-3} . С остыванием Вселенной концентрации частиц и античастиц уменьшались, а их разность оставалась неизменной. В результате в настоящее время наблюдается практически полное отсутствие позитронов и средняя концентрация электронов, равная N .

Появление разности концентраций N является следствием влияния термодинамической флуктуации, вызвавшей нарушение химического равновесия между электронами и позитронами, на волновые функции частиц, заполняющих «море Дирака». Под действием флуктуации произошел конечный сдвиг в бесконечной концентрации частиц в этом «море», что привело к изменению баланса между электронами и позитронами.

Величина N определяется только моментом времени, когда произошла флуктуация. Последующие процессы аннигиляции и рождения электронно-позитронных пар никак ее не изменяют, они приводят только к уменьшению концентрации этих пар со временем.

В рассматриваемый промежуток времени вероятность флуктуации была крайне мала (порядка 10^{-33}). При этом максимальное количество равновесных тепловых фотонов имело энергии вблизи порогов двухфотонной аннигиляции и рождения пар электронов и позитронов (511 кэВ). Их концентрация была порядка 10^{29} см^{-3} , а общее количество порядка 10^{65} , что в несколько раз превышало количество электронов и позитронов. Это обстоятельство никак здесь не учитывалось. Для оценки времени флуктуации принималось во внимание только отношение концентрации барионов к концентрации реликтовых фотонов $\sim 10^{-9}$, характерное для настоящего времени. Однако тот факт, что правильное значение для современной концентрации электронов выделяет для флуктуации промежуток времени, соответствующий указанным параметрам теплового излучения, вряд ли является просто совпадением и требует дополнительного исследования.

В зависимости от момента времени, когда произошла флуктуация, величина N могла бы быть положительной, отрицательной или равняться нулю. Это означает, что преобладание электронов над позитронами является случайным. Вполне могло бы быть и наоборот. Нулевое значение N является существенно менее вероятным, чем положительное или отрицательное. При $N = 0$ средние концентрации электронов и позитронов во Вселенной в настоящее время были бы одинаковыми и очень малыми в связи с остыванием и процессами аннигиляции.

Описанный сценарий отличается от механизмов спонтанного нарушения симметрии в физике элементарных частиц [2, 12, 27] и в теории

конденсированных сред [30]. Конечная концентрация электронов и позитронов зависит от момента времени t_0 , когда произошла флуктуация. Однако, как и при спонтанном нарушении симметрии, флуктуация в рассмотренной модели приводит к перестройке вакуумного состояния частиц, роль которого здесь играет «море Дирака».

Благодарности

Автор благодарен рецензенту за глубокий и всесторонний анализ статьи, конструктивные замечания и предложения, учтенные при доработке.

Список литературы

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М. : Наука, 1975. 736 с.
2. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М. : ЛЕНАНД, 2016. 616 с.
3. Сахаров А. Д. Нарушение СР-инвариантности. С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5, вып. 1. С. 32—35.
4. Кузьмин В. А. СР-неинвариантность и барионная асимметрия Вселенной // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12, вып. 6. С. 335—337.
5. 't Hooft G. Symmetry breaking through Bell-Jackiw anomalies // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol. 37, no 1. P. 8—11.
6. Linde A. D. On the vacuum instability and the Higgs meson mass // Phys. Lett. B. 1977. Vol. 70, no 3. P. 306—308.
7. Dimopoulos S., Susskind L. On the baryon number of the Universe // Phys. Rev. D. 1978. Vol. 18, no 12. P. 4500—4509.
8. Kuzmin V. A., Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E. On the anomalous electroweak baryon number nonconservation in the early Universe // Phys. Lett. B. 1985. Vol. 155B, no 1, 2. P. 36—42.
9. Игнатьев А. Ю., Кузьмин В. А., Шапошников М. Е. О происхождении барионной асимметрии Вселенной // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30, вып. 11. С. 726—730.
10. Шапошников М. Е. О возможности возникновения барионной асимметрии Вселенной в электрослабой теории // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44, вып. 8. С. 364—366.
11. Матвеев В. А., Рубаков В. А., Тавхелидзе А. Н., Шапошников М. Е. Несохранение барионного числа в экстремальных условиях // УФН. 1988. Т. 156, вып. 2. С. 253—295.
12. Рубаков В. А., Шапошников М. Е. Электрослабое несохранение барионного числа в ранней Вселенной и в столкновениях частиц при высоких энергиях // УФН. 1996. Т. 166, № 5. С. 493—537.
13. Klavic J., Shaposhnikov M., Timiryasov I. Reconciling resonant leptogenesis and baryogenesis via neutrino oscillations // Physical Review D. 2021. Vol. 104, no. 5. Art. 055010.
14. Сахаров А. Д. Барионная асимметрия Вселенной // УФН. 1991. Т. 161, № 5. С. 110—120.
15. Hinshaw G., Larson D., Komatsu E. [et al.]. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations : Cosmological Parameter Results. In : arXiv:1212.5226v3 [astro-ph.CO]. 2013. P. 1—32.
16. Арбузова Е. В. Эффекты неустойчивости при модификации гравитации : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.02. Дубна, 2019. 229 с.
17. Dirac P. A. M. The Quantum Theory of the Electron // Proceeding of the Royal Society A. 1928. Vol. 117. P. 610—624.

18. Dirac P. A. M. A Theory of Electron and Proton // Proceeding of the Royal Society A. 1930. Vol. 126. P. 360–365.
19. Anderson C. D. The Positive Electron // Phys. Rev. 1933. Vol. 43. P. 491–498.
20. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М. : Наука, 1976. 480 с.
21. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. М. : Наука, 1980. 704 с.
22. Dirac P. A. M. On the Annihilation of Electron and Proton // Proceeding of the Cambridge Philosophical Society. 1930. Vol. XXVI, part III. P. 361–375.
23. Dirac P. A. M. Discussion of the Infinite Distribution of Electrons in the Theory of the Positron // Proceeding of the Cambridge Philosophical Society. 1934. Vol. 30. P. 150–163.
24. Обухов И. А. Стохастическая электродинамика спинорных полей. [Б. м.] : Издательские решения, 2020. 168 с.
25. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М. : Наука, 1990. 688 с.
26. Obukhov I. A. Density of Vacuum-Like Plasma and Hubble Constant // Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology. 2017. Vol. 3. P. 572–587.
27. Линде А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М. : Наука, 1990. 280 с.
28. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 1. М. : Наука, 1976. 584 с.
29. Adam J., Adamczyk L., Adams J. R., Adkins J. K., [et. al.]. Measurement of $e+e-$ Momentum and Angular Distributions from Linearly Polarized Photon Collisions // Phys. Rev. Lett. 2021. Vol. 127. P 052302-1–P 052302-30.
30. Умэдзава Х., Мацумото Х., Татики М. Термополевая динамика и конденсированные состояния. М. : Мир, 1985. 504 с.

Информация об авторе

Обухов Илья Андреевич, доктор физико-математических наук, технический директор АО НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Hypothetical Scenario of the Symmetry Between Electrons and Positrons in the Universe Destroy

I. A. Obukhov

Scientific-Industrial Company "Radiotechnika"
15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: January 16, 2025

Peer-reviewed: April 4, 2025

Accepted: April 7, 2025

Abstract: A model in which a mechanism of symmetry breaking between the number of charged particles and antiparticles exist is proposed. Within the framework of the model a scenario, in which small thermodynamic fluctuations at an early stage of the Universe evolution can lead to the almost complete absence of antiparticles at the present time is considered.

Keywords: particle, antiparticle, quasi-particle, asymmetry, electroneutrality, fluctuation, chemical potential, equilibrium.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov, "Hypothetical Scenario of the Symmetry Between Electrons and Positrons in the Universe Destroy," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 351–375, 2025. doi: 10.21227/74vz-ce63. (In Russ.).

References

- [1] Ya. B. Zel'dovich and I. D. Novikov, *The Structure and Evolution of the Universe*, Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.).
- [2] D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to Early Universe Theory. Hot Big Bang Theory*. Moscow: LENAND, 2016. (In Russ.).
- [3] A. D. Sakharov, "Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe," *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters.*, vol. 5, pp. 24–27, 1967.
- [4] V. A. Kuzmin, "CP invariance and baryon asymmetry of universe", *Pisma v JETP*, vol. 12, pp. 335–337, 1970. (In Russ.).
- [5] G. t' Hooft, "Symmetry breaking through Bell-Jackiw anomalies", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 37, no 1, pp. 8–11, 1976.
- [6] A. D. Linde, "On the vacuum instability and the Higgs meson mass," *Phys. Lett. B*, vol. 70, no. 3, pp. 306–308, 1977.
- [7] S. Dimopoulos and L. Susskind, "On the baryon number of the Universe", *Phys. Rev. D*, vol. 18, no 12, pp. 4500–4509, 1978.
- [8] V. A. Kuzmin, V. A. Rubakov, and M. E. Shaposhnikov, "On the anomalous electroweak baryon number nonconservation in the early Universe," *Phys. Lett. B*, vol. 155B, no 1, 2, pp. 36–42, 1985.
- [9] A. Yu. Ignatev, V. A. Kuzmin, and M. E. Shaposhnikov, "On the origin of the baryon asymmetry of the Universe," *Pisma v JETP*, vol. 30, no. 11, pp. 726–730, 1979. (In Russ.).
- [10] M. E. Shaposhnikov, "On the possibility of the baryon asymmetry of the universe in the electroweak theory," *Pisma v JETP*, vol. 44, no. 8, pp. 364–366, 1986. (In Russ.).

- [11] V. A. Matveev, V. A. Rubakov, A. N. Tavkhelidze, and M. E. Shaposhnikov, "Nonconservation of the baryon number under extreme conditions", *Phys. Usp.*, vol. 156, no. 2, pp. 253–295, 1988. (In Russ.).
- [12] V. A. Rubakov and M. E. Shaposhnikov, "Electroweak nonconservation of the baryon number in the early Universe and in high-energy particle collisions," *Phys. Usp.*, vol. 166, no. 5, pp. 493–537, 1996. (In Russ.).
- [13] J. Klaric, M. Shaposhnikov, and I. Timiryasovz, "Reconciling resonant leptogenesis and baryogenesis via neutrino oscillations," *Physical Review D*, vol. 104, no. 5, art. 055010, 2021.
- [14] A. D. Sakharov, "Baryon asymmetry of the universe," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 34, no. 5, pp. 417–421, 1991.
- [15] G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu [et al.], "Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results," in *arXiv:1212.5226v3 [astro-ph.CO]*, pp. 1–32, 2013.
- [16] E. V. Arbuzova, *Effects of instability in gravity modification*, dis. of the Doctor of Physics and mathematical Sciences, Dubna: 2019. (In Russ.).
- [17] P. A. M. Dirac, "The Quantum Theory of the Electron", *Proceeding of the Royal Society A*, vol. 117, pp. 610–624, 1928.
- [18] P. A. M. Dirac, "A Theory of Electron and Proton", *Proceeding of the Royal Society A*, vol. 126, pp. 360–365, 1930.
- [19] C. D. Anderson, "The Positive Electron," *Phys. Rev.*, vol. 43, pp. 491–498, 1933.
- [20] N. N. Bogolubov and D. V. Shirkov, *Introduction to Theory of quantum fields*, Moscow: Nauka, 1976. (In Russ.).
- [21] V. B. Berestetskii, E. M. Lifshits and L. P. Pitaevskii, *Quantum Electrodynamics*, Moscow: Nauka, 1980. (In Russ.).
- [22] P. A. M. Dirac, "On the Annihilation of Electron and Proton," *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society*, vol. XXVI, part III, pp. 361–375, 1930.
- [23] P. A. M. Dirac, "Discussion of the Infinite Distribution of Electrons in the Theory of the Positron," *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 30, pp. 150–163, 1934.
- [24] I. A. Obukhov, *Stochastic Electrodynamics of Spinor Fields*, Izdatelskiye resheniya, 2020. (In Russ.).
- [25] V. L. Bonch-Bruевич and S. G. Kalashnikov, *Physics of Semiconductors*, Moscow: Nauka, 1990. (In Russ.).
- [26] I. A. Obukhov, "Density of Vacuum-Like Plasma and Hubble Constant", *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, vol. 3, pp. 572–587, 2017.
- [27] A. D. Linde, *Elementary Particle Physics and Inflationary Cosmology*, Moscow: Nauka, 1990. (In Russ.).
- [28] L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Statistical Physics. Part 1*, Moscow: Nauka, 1976. (In Russ.).
- [29] J. Adam, L. Adamczyk., J. R. Adams, J. R. Adkins, [et. al.], "Measurement of $e+e-$ Momentum and Angular Distributions from Linearly Polarized Photon Collisions", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 127, pp. 052302-1–052302-30, 2021.
- [30] H. Umezawa, H. Matsumoto, M. Tachiki, *Thermo Field Dynamics and Condensed States*, Amsterdam–New York–Oxford: North-Holland Publishing Company, 1982.

Information about the author

Ilya A. Obukhov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 8, no. 3, pp. 376–397, 2025.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 376—397.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.21227/c9n6-3x86

УДК 537.523.3, 537.862

СВЧ излучение коронного разряда

Богатов Н. А.

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН
ул. Ульянова 46, бокс-120, г. Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация
bogatov@ipfran.ru

Получено: 29 апреля 2025 г.

Отрецензировано: 6 мая 2025 г.

Принято к публикации: 6 мая 2025 г.

Аннотация: Построена аналитическая модель механизма сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения бесстримерного стационарного коронного разряда, обусловленного дискретной структурой разрядного тока, состоящего из совокупности электронных лавин. Определены форма, амплитуда и диаграмма направленности электромагнитных импульсов, излучаемых электронными лавинами положительного и отрицательного коронных разрядов на электроде с полусферическим концом. Рассчитана спектральная интенсивность электромагнитного излучения положительного и отрицательного коронных разрядов на сферическом электроде в зависимости от радиуса электрода и тока разряда. Обнаружена тенденция увеличения частоты и интенсивности рассмотренного излучения коронного разряда с заданным током при уменьшении радиуса кривизны коронирующего электрода. Предложены объекты натурального и лабораторного происхождения, в которых лавинный механизм генерации СВЧ излучения может проявляться с достаточной для его регистрации интенсивностью.

Ключевые слова: коронный разряд, электронная лавина, СВЧ излучение.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Богатов Н. А. СВЧ излучение коронного разряда // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 376—397.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Богатов, Н. А. СВЧ излучение коронного разряда / Н. А. Богатов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 376—397.

1. Введение

Любой электрический разряд в газе — в природных явлениях, технологических процессах и лабораторных экспериментах — является источником электромагнитного излучения. Часто получение электромагнитного

излучения, которое далее используется в научных или прикладных целях, является задачей реализации разрядного процесса, но еще чаще электромагнитное излучение из разряда используется исследователями для диагностики разряда. В некоторых случаях, как, например, в исследованиях молнии, электромагнитное излучение является практически единственным источником информации о разряде. Излучение разрядов в газе в радиодиапазоне, как правило, связано с их нестационарностью. В частности, коронный разряд является источником сравнительно интенсивного радиоизлучения в диапазоне 0,15—150 МГц вследствие нестационарного характера тока разряда, обусловленного либо импульсным напряжением на разряде, либо импульсной природой стримеров, если коронный разряд является стримерным (см., например, [1, 2]). Измерения излучения коронного разряда в диапазоне 300—1000 МГц [3] не обнаружили отличия от фоновой уровня. Казалось бы, что бесстримерный стационарный коронный разряд, как положительный, так и отрицательный, совсем не должен излучать электромагнитные волны, поскольку ток разряда постоянен, а амплитуда излучаемых электромагнитных волн пропорциональна производной тока по времени. Но постоянным ток разряда будет только в представлении электронной компоненты разряда заряженной жидкостью, то есть при усреднении по объему, размер которого много больше всех микронеоднородностей электронного тока. Дискретность электронов и токов, обусловленных их движением, приводит к появлению тормозного излучения, спектр которого у неравновесных разрядов в плотном газе, каким является и коронный разряд, лежит в ИК области. Но у коронного разряда, в отличие от разрядов в однородном (и слабо неоднородном) поле, есть еще один источник дискретности тока. В коронном разряде электронный ток состоит из совокупности электронных лавин. Каждая лавина — это ярко нестационарный процесс. Время жизни лавины много меньше времени жизни стримера, поэтому частотный диапазон электромагнитного излучения, генерируемого флуктуациями тока, связанными с токами лавин, должен лежать выше частотного диапазона излучения, вызванного токами стримеров. Как будет видно из результатов данной работы, максимум спектра излучения положительного коронного разряда лежит в СВЧ диапазоне. Подчеркнем, что излучение лавин присутствует как в стримерном, так и бесстримерном (безимпульсном) коронном разряде.

СВЧ излучение лавин коронных разрядов может быть использовано для диагностики разрядных процессов в электризованных аэрозолях и грозовых облаках.

Задачей настоящей работы являлся расчет спектра и интенсивности электромагнитного излучения коронного разряда, обусловленного токами электронных лавин, составляющих ток разряда.

2. Электромагнитное излучение электронной лавины

Электронная лавина в газе — это «неуклонно нарастающий процесс размножения электронов в результате ионизации атомов и молекул, как правило, электронным ударом» [4]. В постоянном электрическом поле и холодном и невозбужденном газе, как это имеет место в коронном разряде, размножение электронов может происходить только при условии превышения величины напряженности электрического поля E пороговой величины E_{br} (пробойное поле), когда частота ионизации электронным ударом превышает частоту прилипания электронов к молекулам. Область сильного, сверхпробойного поля, в котором электроны могут размножаться, в коронном разряде находится вблизи коронирующего электрода и имеет характерный размер порядка радиуса кривизны электрода. Электронное облако размножающихся электронов (головка электронной лавины) расплывается в результате диффузии и дрейфует под действием электрического поля к электроду или от него в зависимости от полярности потенциала коронирующего электрода, оставляя за собой «хвост» из положительных ионов. Подвижность ионов более чем на два порядка меньше, чем у электронов, поэтому дрейф ионов не оказывает заметного влияния на динамику электронной лавины. Мы в дальнейшем анализе будем считать ионы неподвижными. При количестве электронов в головке электронной лавины порядка 10^6 диффузионное расплывание электронного облака сменяется расталкиванием электронов под действием собственного поля [7]. Как будет видно из результатов расчета в данной работе, количество электронов в лавинах коронного разряда всегда много меньше 10^6 , поэтому учитывать собственное поле электронной лавины нет необходимости.

Поскольку количество электронов и ионов, образующихся в результате ионизации молекул, одинаково, количество электронов в головке лавины будет равно количеству ионов в «хвосте» лавины. Таким образом, лавина образует электрический диполь, величина которого меняется во времени. Размер этого диполя много меньше длины электромагнитной волны в воздухе на частоте порядка обратного времени развития лавины. Поэтому в отношении излучения электромагнитных волн лавина является точечным диполем. Амплитуда излучаемой точечным диполем волны пропорциональна второй производной дипольного момента по времени [5].

В отрицательном коронном разряде лавины, дающие основной вклад в ток разряда, начинаются в непосредственной близости к коронирующему электроду и движутся от электрода. По мере развития лавины и диффузионного увеличения размера ее головки она перемещается в область со все большим масштабом неоднородности, всегда оставаясь много меньше это-

го масштаба, пока не выйдет из области сверхпробойного поля. При вычислении дипольного момента лавины в отрицательном коронном разряде головку лавины можно заменить отрицательным точечным зарядом, расположенным в центре головки, с величиной, равной заряду головки лавины, а ионный «хвост» лавины — положительным линейным зарядом, расположенным на линии движения лавины. В положительном коронном разряде лавины, дающие основной вклад в ток разряда, начинаются от границы зоны ионизации, на которой $E = E_{br}$, и движутся к коронирующему электроду. Вторая производная дипольного момента по времени при приближении развитой лавины к электроду самым существенным образом зависит от распределения электронов в головке лавины, поэтому при вычислении дипольного момента лавины головка лавины в положительном коронном разряде не может быть заменена точечным зарядом. Рассмотрим отдельно излучение лавины в отрицательном и положительном коронном разряде.

2.1. Электромагнитное излучение электронной лавины в отрицательном коронном разряде

2.1.1. Модель лавины. Рассмотрим осесимметричный коронирующий электрод, у которого поле на оси симметрии будет направлено строго вдоль оси симметрии. Ось x совместим с осью симметрии электрода и направим ее в сторону от электрода, начало координат поместим на поверхность электрода. Начальный электрон также поместим на ось x в начало координат. Тогда электронная лавина будет двигаться вдоль оси x . Размером головки лавины будем пренебрегать, считая ее точечной. Количество электронов N_e в лавине будет подчиняться уравнению:

$$\frac{dN_e(x)}{dx} = \lambda_1(x)N_e(x) \quad (1)$$

где λ_1 — первый ионизационный коэффициент Таундсенда, равный количеству электронов, производимых каждым электроном лавины на единичном отрезке пути лавины. В уравнении (1) переменная x — это координата головки лавины. Величина λ_1/N , где N — концентрация молекул, является функцией параметра приведенного поля E/N или E/δ , где $\delta = N/N_0$ — отношение плотности газа к плотности нормальной атмосферы N_0 (относительная плотность газа). Обозначим $\gamma = E/\delta$, $\sigma_i(\gamma) = \lambda_1/N$. Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{dN_e(x)}{dx} = \sigma_i(\gamma(x))N_eN_0\delta \quad (2)$$

Поле $E(x)$ и плотность газа δ считаем заданными, тогда и $\gamma(x)$ — заданная функция. Для слабого коронного тока поле $E(x)$ совпадает с полем в газоразрядном промежутке в отсутствие разряда. Для сильного коронного тока на

поле $E(x)$ будет влиять пространственный заряд коронного разряда, но для электронной лавины это поле все равно будет заданным. Погонная плотность n_{il} положительных ионов, которые мы считаем неподвижными, равна:

$$n_{il}(x) = \frac{dN_e(x)}{dx} = \sigma_i(\gamma)N_eN_0\delta \quad (3)$$

Движение электронной лавины подчиняется уравнению:

$$\frac{dx}{dt} = v(x) \quad (4)$$

где $v(x)$ — абсолютная величина дрейфовой скорости электронов. Дрейфовая скорость является функцией параметра приведенного поля γ , поэтому запишем уравнение (4) в виде:

$$\frac{dx}{dt} = v(\gamma(x)) \quad (5)$$

Электрический дипольный момент лавины будет направлен вдоль оси лавины и будет равен:

$$D_p(x) = q_e[-xN_e(x) + \int_0^x x' n_{il}(x') dx'] \quad (6)$$

где q_e — заряд электрона. Помимо зарядов лавины, в излучении электромагнитных волн будут принимать участие и заряды, наведенные зарядами лавины в электроде. Если электрод имеет на конце сферическое закругление радиусом r_0 , то наведенные в электроде заряды будут близки к тем, что наводились бы в сферическом электроде [5]:

$$p = D_p \frac{r_0^3}{l^3} \quad q = D_p \frac{r_0}{l^2} \quad (7)$$

где p — дипольный момент, наводимый в электроде, q — нескомпенсированный заряд, наводимый в электроде, l — расстояние от диполя D_p до центра кривизны конца электрода. Поскольку основной заряд лавины формируется ближе к краю зоны ионизации, то $l \gtrsim 2r_0$ и $p \ll D_p$, то есть дипольным моментом отраженных зарядов можно пренебречь. Наведенный заряд q , изменяясь во времени, вызовет импульс тока в электроде и подводящих проводниках, который может генерировать излучение даже более интенсивное, чем собственно лавина. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения, и в данной статье мы ограничимся только расчетом излучения диполя D_p , образуемого зарядами лавины.

Электрическое поле в излучаемой диполем D_p электромагнитной волне равно [5] (в системе единиц СИ):

$$E(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{d^2 D_p}{dt^2} \sin\theta \quad H(t) = \frac{1}{4\pi c r} \frac{d^2 D_p}{dt^2} \sin\theta \quad (8)$$

где θ — угол между рассматриваемым направлением и осью x .

Плотность потока энергии равна:

$$P(t) = E(t)H(t) = \epsilon_0 c E^2(t) = \frac{1}{(4\pi)^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)^2 \sin^2\theta \quad (9)$$

Мощность, излучаемая в единичный телесный угол, равна:

$$P_{\Omega}(t) = P(t) \cdot r^2 = \frac{1}{(4\pi)^2 \varepsilon_0 c^3} \left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)^2 \sin^2 \vartheta \quad (10)$$

Мощность, излучаемая в единичный телесный угол по нормали к направлению лавины, равна:

$$P_{\Omega}^{max}(t) = P(t) \cdot r^2 = \frac{1}{(4\pi)^2 \varepsilon_0 c^3} \left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)^2 \quad (11)$$

Полная мощность излучения равна:

$$W(t) = \frac{1}{6\pi \varepsilon_0 c^3} \left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)^2 \quad (17)$$

Перейдя в уравнении (11) к Фурье-образам, можно получить следующее выражение для энергии, излучаемой диполем D_p в единичный телесный угол по нормали к его направлению в единичном частотном интервале циклической частоты f :

$$E_{\Omega, f} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 c^3} \left| \left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)_{\omega} \right|^2 \quad (18)$$

где $\left(\frac{d^2 D_p}{dt^2} \right)_{\omega}$ — Фурье-образ второй производной дипольного момента по времени.

Электрическое поле стержневого электрода со сферическим закруглением на конце радиусом r_0 на оси симметрии электрода близко к полю сферического электрода радиусом r_0 [6]:

$$\gamma(x) = \gamma_0 \frac{r_0^2}{(x+r_0)^2} \quad (19)$$

где γ_0 — величина параметра приведенного поля на поверхности электрода. Мы будем рассматривать здесь только малые токи коронного разряда, при которых пространственный заряд еще не влияет на поле. В этом случае при изменении тока разряда величина γ_0 будет оставаться неизменной и равной критической величине, соответствующей порогу зажигания разряда. Условие малости тока сформулировано в Приложении. Пороговую величину γ_0 мы будем определять из критерия зажигания в неоднородном поле [7]:

$$N_0 \delta \int_0^{\infty} \sigma_i(\gamma(x)) dx = K \quad (20)$$

в котором положим $K = 8$. Зависимость γ_0 от $r_0 \delta$, найденная из уравнения (20) при $K = 8$, показана на рис. 1. Эта зависимость хорошо соответствует экспериментально измеренным в [8] величинам порогового поля зажигания разряда на проводящих сферах, помещенных в однородное внешнее поле. Для относительно больших радиусов кривизны электрода $r_0 \delta > 10^{-2}$ см расчетная зависимость $\gamma_0(r_0 \delta)$ близка к предложенной в [9] зависимости:

$$\gamma_0 = 27.8 \left[1 + \frac{0.54}{\sqrt{r_0 \delta}} \right] [\text{кВ/см}] \quad r_0 \delta [\text{см}] \quad (21)$$

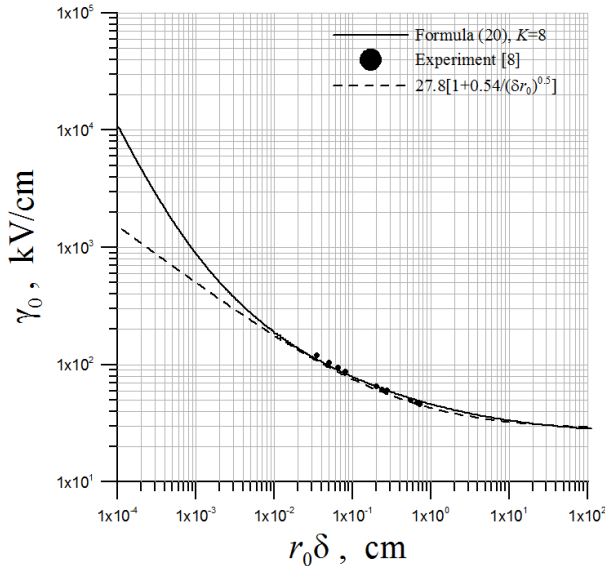


Рис. 1. Величина порогового для зажигания коронного разряда поля на поверхности стержневого электрода с полусферическим концом $\gamma_0 = E_0/\delta$.

Fig. 1. The corona ignition field on the surface of a rod electrode with a hemispherical end

Зависимость $\sigma_i(\gamma)$, использованная в наших расчетах, построена на аппроксимации экспериментальных данных, приведенных в [10], для первого ионизационного коэффициента Таунсенда λ_1 ([8], формула (3)) и имеет вид:

$$\sigma_i(\gamma) = \left[414\gamma^{0.5} \exp\left(-\frac{161}{\gamma}\right) - 4.3 \right] \cdot \Phi(\gamma - 26) \text{ см}^{-1} \quad (22)$$

где $\Phi(x)$ — единичная функция-ступенька.

Выбор параметра γ_0 на основе критерия (20) задает и конечное количество электронов в лавине N_{em} , поскольку, как это следует из решения уравнения (2), $N_{em} = \exp(K)$ и при $K = 8$, $N_{em} \approx 3 \cdot 10^3$. Отметим, что это количество электронов в лавинах коронного разряда много меньше, чем 10^6 , необходимое для заметного влияния собственного заряда лавины на расширение головки лавины и, тем более, меньше, чем 10^8 , требуемое для заметного искажения зарядом лавины внешнего поля [7].

2.1.2. Результаты расчета. На рис. 2 представлены результаты расчета параметров электромагнитного излучения, вызываемого электронными лавинами отрицательного коронного разряда при разных значениях параметра $r_0\delta$ (произведения радиуса кривизны коронирующего электрода на относительную плотность воздуха).

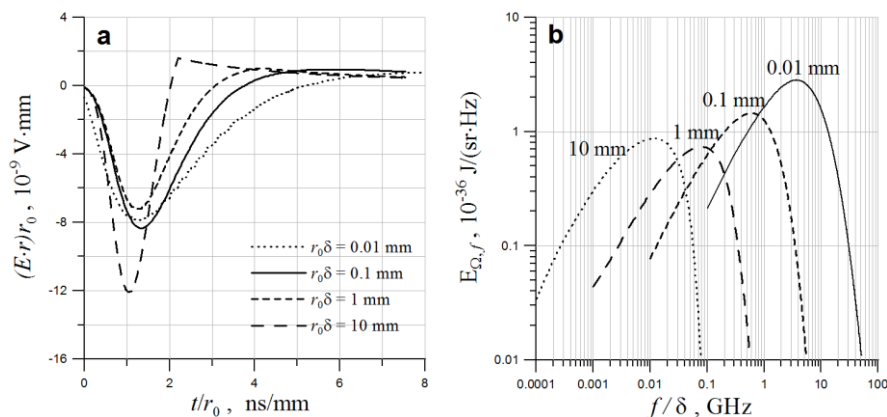


Рис. 2. Электромагнитное излучение отрицательного коронного разряда при разных значениях параметра $r_0\delta$. **а)** Электрическое поле в электромагнитном импульсе, излучаемом одной электронной лавиной в направлении, перпендикулярном направлению движения лавины, умноженное на расстояние от разряда до точки наблюдения; **б)** Спектральная энергия излучения лавины в единичный телесный угол в направлении, перпендикулярном направлению движения лавины (подписи около кривых — это значения параметра $r_0\delta$).

Fig. 2. Electromagnetic radiation of negative corona discharge at different values of the parameter $r_0\delta$. **a)** The electric field in an electromagnetic pulse emitted by a single electron avalanche in a direction perpendicular to the direction of the avalanche's movement, multiplied by the distance from the discharge to the observation point; **b)** Spectral energy of avalanche radiation per unit solid angle in the direction perpendicular to the direction of avalanche motion (the signatures near the curves are the values of the parameter $r_0\delta$).

На рис. 2а показано электрическое поле в излучаемом одной электронной лавиной электромагнитном импульсе. Амплитуда излучаемого лавиной импульса уменьшается обратно пропорционально расстоянию r от разряда до точки наблюдения. Поэтому на рис. 2а представлено произведение амплитуды электрического поля в импульсе на расстояние r , которое от расстояния r уже не зависит. Для того чтобы показать все кривые $Er(t)$ для разных $r_0\delta$ на одном графике, масштабы осей для разных $r_0\delta$ были изменены: время было поделено на r_0 , а поле умножено на r_0 . Как видно из рис. 2а, имеют место грубо приближенные зависимости: длительность импульса пропорциональна, а амплитуда — обратно пропорциональна r_0 . Поляризация излучения линейная, вектор электрического поля лежит в плоскости, проходящей через ось симметрии разряда и траекторию движения лавины. Электромагнитный импульс состоит из короткого сильного отрицательного (поле направлено против оси x) выброса и слабого положительного «хвоста» (площади положительной и отрицательной частей импульса одинаковы).

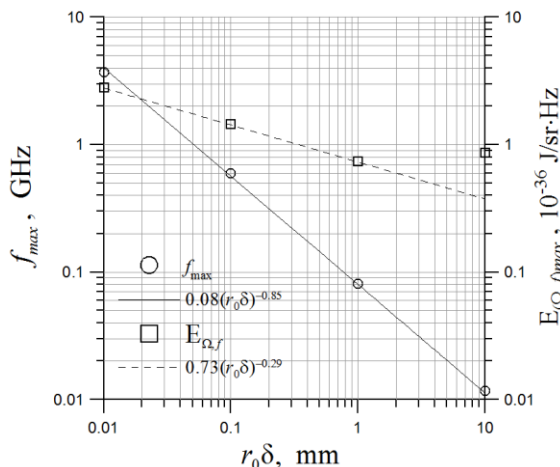


Рис. 3. Зависимость частоты f_{max} максимума спектральной мощности и величины спектральной энергии в максимуме $E_{(\Omega,f)max}$ от параметра $r_0\delta$.

Fig. 3. Dependence of the frequency f_{max} of the maximum spectral power and the magnitude of the spectral energy at the maximum $E_{(\Omega,f)max}$ on the parameter $r_0\delta$

На рис. 2б приведена спектральная энергия излучения лавины в отрицательном коронном разряде в единичный телесный угол в направлении, перпендикулярном движению лавины (оси разряда). Частота f_{max} , соответствующая максимуму спектральной энергии, уменьшается с увеличением радиуса кривизны коронирующего электрода приблизительно по степенному закону, немного более медленному, чем обратная пропорциональный (рис. 3): $f_{max} = 0,08(r_0\delta)^{-0,85}$ ГГц (r_0 в мм). Зависимость спектральной энергии излучения лавины в максимуме спектра при $r_0\delta \leq 1$ мм также близка к степенной, но более слабой: $E_{(\Omega,f)max} = 0,73(r_0\delta)^{-0,29} \cdot 10^{-36}$ Дж/ср·Гц.

Коронный разряд и излучение его электронных лавин подчиняются подобию, в котором время и пространственные параметры обратно пропорциональны, а частота, амплитуда и энергия излучаемых электромагнитных волн прямо пропорциональны плотности газа δ . Спектральная энергия импульса излучения от плотности газа не зависит.

Интересно проследить, в какой фазе движения лавины генерируется основная часть электромагнитного импульса. На рис. 4 показана зависимость напряженности электрического поля в излучаемом электромагнитном импульсе от координаты положения головки лавины для двух радиусов кривизны коронирующего электрода. На том же рис. 4 приведена и зависимость поля электрода, отнесенная к пробойному полю γ_{br} , от координаты. Как видно из рис. 4, у электрода с малым $r_0\delta$ генерация электромагнитного

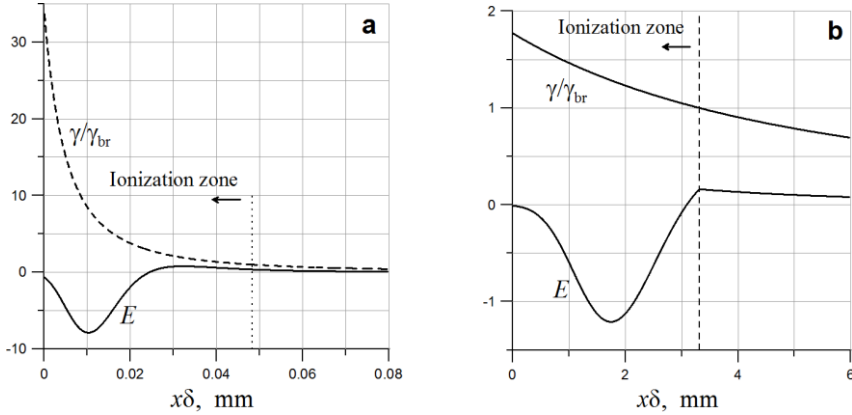


Рис. 4. Зависимость напряженности электрического поля E (в относительных единицах) в генерируемом электронной лавиной отрицательного коронного разряда электромагнитном импульсе и параметра приведенного поля γ , деленного на его пробойное значение γ_{br} , от координаты головки лавины ($x\delta$). **a)** $r_0\delta = 0,01$ мм; **b)** $r_0\delta = 10$ мм.

Fig. 4. Dependence of the electric field strength E (in relative units) in the electromagnetic pulse generated by the electron avalanche of a negative corona discharge and the parameter of the reduced field γ , divided by its breakdown value γ_{br} , on the coordinate of the avalanche head ($x\delta$).

a) $r_0\delta = 0.01$ mm; **b)** $r_0\delta = 10$ mm

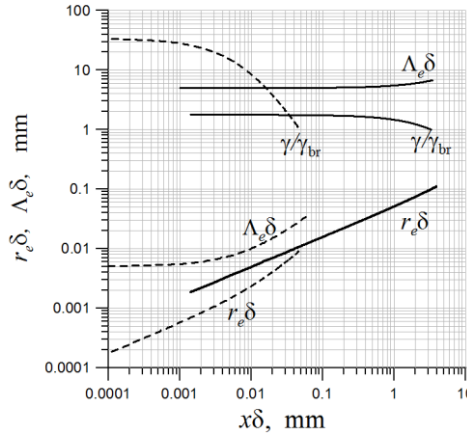


Рис. 5. Зависимости размера головки лавины $r_e\delta$, масштаба неоднородности поля электрода $\Lambda_e\delta$ и относительного поля электрода γ/γ_{br} от координаты лавины $x\delta$ (все размеры масштабируются обратно пропорционально плотности газа) для двух значений радиуса электрода: $r_0\delta = 10$ мм (сплошные линии), $r_0\delta = 0,01$ мм (пунктирные линии).

Fig. 5. Dependences of the avalanche head size $r_e\delta$, the scale of the electrode field inhomogeneity $\Lambda_e\delta$ and the relative electrode field γ/γ_{br} on the avalanche coordinate $x\delta$ (all dimensions are scaled inversely proportional to the gas density) for two values of the electrode radius: $r_0\delta = 10$ mm (solid lines), $r_0\delta = 0.01$ mm (dashed lines)

импульса происходит в ближней к электроду одной третьей части зоны ионизации, потому что масштаб неоднородности поля электрода вблизи электрода меньше размера зоны ионизации. У электрода с большим $r_0\delta$, у которого масштаб неоднородности поля электрода больше размера зоны ионизации, генерация происходит на большей части зоны ионизации.

В вышеизложенной модели генерации электромагнитного излучения электронными лавинами отрицательного коронного разряда мы предполагали малость размеров головки лавины по сравнению с масштабом неоднородности поля электрода. Масштаб неоднородности поля сферического электрода (19) равен:

$$\Lambda_e = \left| \left[\frac{d(\ln \gamma)}{dx} \right]^{-1} \right| = \frac{r_0 + x}{2} \quad (23)$$

Диффузионное расплывание головки лавины приводит к следующей зависимости радиуса головки от времени [7]:

$$r_e = 2\sqrt{D_e t} \quad (24)$$

где D_e — коэффициент свободной диффузии электронов в воздухе. На рис. 5 приведены зависимости радиусов головок лавин от координат лавин для двух значений радиусов кривизны электродов. Там же показано изменение с координатой головки лавины поля электрода γ и масштаба неоднородности этого поля $\Lambda_e\delta$. Все зависимости построены только в зоне ионизации $\gamma \geq 1$. Как видно из рис. 5, наименее строго условие $r_e \ll \Lambda_e$ выполняется для электрода с малым радиусом кривизны, $r_0\delta = 0,01$ мм, на границе зоны ионизации $x\delta = 0,05$ мм, там r_e равна третьей части от Λ_e . Но основное излучение у малого электрода генерируется ближе к электроду (см. рис. 4а) при $x\delta \approx 0,01$ мм, а там $r_e \approx 0,2 \Lambda_e$. Поэтому можно считать, что условие малости размера головки электронной лавины выполняется во всем рассмотренном диапазоне радиусов кривизны электрода.

2.2. Электромагнитное излучение электронной лавины в положительном коронном разряде

2.2.1. Модель лавины. В положительном коронном разряде развитая электронная лавина с большим числом электронов в головке формируется в непосредственной близости к электроду. Радиус головки электронной лавины много меньше радиуса электрода (в этом мы убедимся по результатам расчета), поэтому отражение зарядов лавины в электроде будет приблизительно таким же, как в плоском проводнике. То есть отражения зарядов будут иметь ту же абсолютную величину, что и заряды лавины, но противоположный знак, и будут находиться за границей электрода на том же

расстоянии от нее, что и заряды лавины. При этом каждый точечный заряд лавины вместе со своим отражением будет образовывать диполь такой же величины, как диполь, полученный перемещением этого точечного заряда лавины на ось симметрии разряда с сохранением его продольной координаты x . Это значит, что дипольный момент электронной лавины в положительном коронном разряде, движущейся по оси симметрии разряда вместе с ее отражением в электроде, будет равен дипольному моменту линейного заряда, расположенного на оси симметрии, полученного интегрированием осесимметричного распределения заряда в лавине по поперечному сечению лавины, и отражения этого линейного заряда в электроде. Распределение электронной концентрации в головке лавины с полным количеством электронов N_e в результате диффузионного расплывания при движении лавины в однородном поле дается выражением [7]:

$$n_e(x, r', t) = N_e(t)(4\pi D_e t)^{-3/2} \exp \left[-\frac{(x-x_a(t))^2 + r'^2}{4D_e t} \right] \quad (25)$$

где r' — радиальная координата в цилиндрической системе координат с осью x , t — время с началом отсчета в момент старта лавины, то есть появления затравочного электрона на границе зоны ионизации, $x_a(t)$ — координата центра головки лавины в момент времени t . Заменяем распределение (25) линейным электронным погонным зарядом $n_{el}(x, t)$, распределенным вдоль оси x , проинтегрировав (25) по поперечному сечению:

$$n_{el}(x, t) = \frac{N_e(t)}{\sqrt{4\pi D_e t}} \exp \left[-\frac{(x-x_a(t))^2}{4D_e t} \right] \quad (26)$$

Распределение концентрации ионов можно найти из уравнения:

$$\frac{dn_i(x, r', t)}{dx} = \sigma_i(\gamma(x)) N n_e(x, r', t) \quad (27)$$

Такое же уравнение получится и для погонного ионного заряда после интегрирования (27) по поперечной координате:

$$\frac{dn_{il}(x, t)}{dx} = \sigma_i(\gamma(x)) N n_{el}(x, t) \quad (28)$$

Электрический дипольный момент лавины вместе с ее отражением в электроде будет равен:

$$D_p(t) = 2q_e \left[-\int_0^\infty x n_{el}(x, t) dx + \int_0^\infty x n_{il}(x, t) dx \right] \quad (29)$$

Если размер головки лавины много меньше масштаба неоднородности поля электрода, то скорость дрейфа и частота ионизации для подавляющей части электронов лавины будут приблизительно одинаковы и равны их значениям в центре головки ($x_a, r' = 0$). Тогда распределения электронной и ионной концентраций будут иметь тот же вид, как в (25—28), а количество электронов в головке N_e и координата центра головки x_a будут подчиняться уравнениям (2) и (5). Так, однако, будет до тех пор, пока центр головки

лавины не приблизится к электроду на расстояние порядка ее радиуса. Далее гауссовские распределения концентраций должны искажаться, но поскольку размер головки лавины мал, а скорость движения лавины вблизи электрода в сильном поле велика, то существенное искажение распределений не успевает произойти. Поэтому мы будем считать, что распределения (26) и (28) справедливы, а частоту ионизации и скорость дрейфа электронов в той части головки, которая еще не успела влиться в электрод, определять не в точке x_a (которая становится отрицательной по мере вливания электронной лавины в электрод), а в «центре массы» x_c этой части головки:

$$x_c = \frac{1}{\int_0^\infty n_{el}(x) dx} \int_0^\infty x n_{el}(x) dx \quad (30)$$

Поле электрода (по абсолютной величине) полагаем таким же, как в предыдущем разделе (формула (19)). Величину поля на электроде γ_0 также определяем из критерия зажигания разряда (20). Вычисление параметров электромагнитного излучения лавины в положительном коронном разряде по найденному дипольному моменту $D_p(t)$ производится по формулам (8) и (18).

2.2.2. Результаты расчета. Для электродов с малым радиусом кривизны, $r_0\delta \lesssim 0,1$ мм, размер головки лавины, приходящей на электрод, становится порядка радиуса электрода и приближение малости радиуса головки лавины по сравнению с масштабом неоднородности поля электрода перестает работать. Поэтому расчет был выполнен только для трех значений $r_0\delta$: 10 мм, 1 мм и 0,1 мм.

На рис. 6а представлен результат расчета напряженности электрического поля E в излучаемом электронной лавиной положительного коронного разряда электромагнитном импульсе, умноженной на расстояние r от разряда до точки наблюдения, для трех значений параметра $r_0\delta$ (трех радиусов кривизны коронирующего электрода). Для того, чтобы представить эти три кривые на одном графике, были изменены масштабы осей: поле было умножено на $r_0\delta$, а время было поделено на $(r_0\delta)^{-1/2}$ (начало отсчета времени у разных кривых на рис.6а тоже разное). Передний фронт импульса излучения лавины у электродов с большим радиусом кривизны более пологий, чем задний. У электродов с малым $r_0\delta$ импульс практически симметричный. Длительность импульса приблизительно пропорциональна $(r_0\delta)^{-1/2}$, а амплитуда нелинейно растет с уменьшением $r_0\delta$. Длительность импульса излучения у лавины в положительной короне меньше, чем в отрицательной, поэтому спектр излучения смещен в более высокочастотную область (рис. 6б). Для электрода с $r_0\delta = 0,1$ мм максимум спектра излучения находится на частоте 4 ГГц. Очевидно, что тенденция увеличения частоты в максимуме спектральной энергии излучения лавин сохранится и

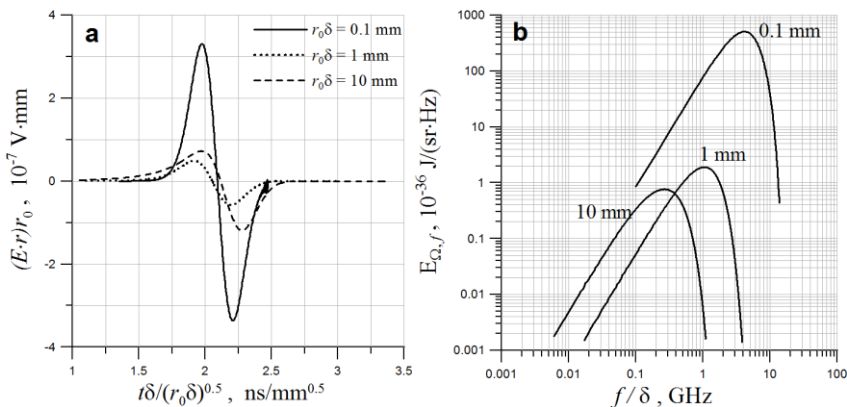


Рис. 6. Электромагнитное излучение положительного коронного разряда при разных значениях параметра $r_0\delta$. **а)** Электрическое поле в электромагнитном импульсе, излучаемом одной электронной лавиной в направлении, перпендикулярном направлению движения лавины, умноженное на расстояние от разряда до точки наблюдения; **б)** Спектральная энергия излучения лавины в единичный телесный угол в направлении, перпендикулярном направлению движения лавины (подписи около кривых — это значения параметра $r_0\delta$)

Fig. 6. Electromagnetic radiation of a positive corona discharge at different values of the parameter $r_0\delta$. **a)** The electric field in an electromagnetic pulse emitted by one electron avalanche in a direction perpendicular to the direction of movement of the avalanche, multiplied by the distance from the discharge to the observation point; **b)** Spectral energy of avalanche radiation per unit solid angle in the direction perpendicular to the direction of avalanche motion (the signatures near the curves are the values of the parameter $r_0\delta$)

при дальнейшем уменьшении радиуса коронирующего электрода. Энергия в излучаемом импульсе (и спектральная энергия) быстро нарастают с уменьшением $r_0\delta$ до 0,1 мм и далее. Это связано с ростом величины поля на электроде γ_0 (см. рис. 1).

3. Электромагнитное излучение коронного разряда

Количество электронных лавин n_a , приходящих в единицу времени на коронирующий электрод, равно:

$$n_a = \frac{I}{q_e N_{em}} \quad (31)$$

где I — ток коронного разряда, а N_{em} — конечное количество электронов в лавине к моменту, когда она покидает зону ионизации, в случае отрицательного коронного разряда, или вливается в электрод, в случае положительной короны. Тогда мощность, излучаемая коронным разрядом в единичный телесный угол по нормали к оси разряда в единичном частотном интервале, равна:

$$S_{\Omega,f} = E_{\Omega,f} n_a = \frac{E_{\Omega,f}}{e N_{em}} I \quad (32)$$

Поскольку величина N_{em} в наших расчетах фактически задана условием зажигания разряда (20), $N_{em} \approx 3 \cdot 10^3$, то спектральная мощность излучения разряда $S_{\Omega,f}$ оказывается прямо пропорциональна спектральной энергии $E_{\Omega,f}$ и току разряда I :

$$S_{\Omega,f} [\text{Вт/ср} \cdot \text{Гц}] = 2.1 \cdot 10^{15} E_{\Omega,f} [\text{Дж/ср} \cdot \text{Гц}] \cdot I [\text{А}] \quad (33)$$

Например, для электрода $r_0 \delta = 0,1$ мм с током положительного коронного разряда 10 мкА спектральная мощность излучения на частоте 4 ГГц будет равна $2 \cdot 10^{-23}$ Вт/ср·Гц. Если принимать это излучение в телесном угле 1 ср в частотном диапазоне шириной 1 ГГц, то принимаемая мощность составит $2 \cdot 10^{-14}$ Вт.

При одновременном протекании множества коронных разрядов в объеме газа с размерами, меньшими расстояния до наблюдателя, спектральная мощность излучения разрядов в направлении наблюдателя будет суммироваться. Если параметр $r_0 \delta$ для всех коронных разрядов в этом множестве будет приблизительно одинаков, то для определения спектральной мощности излучения этого множества разрядов можно применять формулу (34), в которой ток является суммарным током всех разрядов.

4. Обсуждение

Принятое в нашей модели приближение малости размера головки электронной лавины по сравнению с масштабом неоднородности поля электрода не позволяет применить наш расчет к коронным, особенно положительным, разрядам на электродах с малыми радиусами кривизны. Для определения радиуса головки лавины мы использовали формулу (26), полученную для однородного поля. В сферически симметричном поле головка лавины, движущейся к электроду (в положительном коронном разряде) должна испытывать сжатие. Учет этого эффекта в изложенной в данной работе теории позволит в какой-то степени распространить расчет на меньшие радиусы электрода.

В данных расчетах была использована величина $K = 8$ (число электронов в лавине 3000, соответствует коэффициенту вторичной эмиссии $3,3 \cdot 10^{-4}$). В то же время эксперименты [8] показали, что с уменьшением радиуса кривизны коронирующего электрода величина K растет. Если в расчетах использовать величину $K = 10,3$ (число электронов в лавине $3 \cdot 10^4$), то амплитуда излучаемого импульса увеличится на порядок, а мощность — на два порядка.

В данной работе мы ограничились рассмотрением малых токов коронных разрядов, при которых слабо возмущается холодное поле электро-

да. Эффект излучения лавин, очевидно, будет иметь место и при сильных токах разряда. В бесстримерном коронном разряде можно рассчитать самосогласованное поле в зоне ионизации и уже в самосогласованном поле рассчитать движение и излучение электронных лавин. Объемный заряд в коронном разряде всегда приводит к выполаживанию распределения поля в зоне ионизации, что должно приводить к смещению спектра излучения лавин в более низкочастотную область и уменьшению энергии излучаемых импульсов по сравнению с малым током разряда. Увеличение масштаба неоднородности поля с ростом тока разряда расширит и область применения приближения малого размера головки лавины.

В работе был рассмотрен коронный разряд на металлическом (хорошо проводящем) электроде. Однако разряд заряженного диэлектрика не сильно изменит расчетную мощность излучения. Даже диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью, равной единице, уменьшит дипольный момент лавины в два раза, а мощность излучения — в четыре раза. Если же относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического тела будет равна (2—3), то изображение зарядов электронной лавины в таком теле будет не многим меньше, чем в проводнике, и мощность излучения лавин будет не сильно меньше, чем в разряде на проводящем электроде.

Мощность, излучаемая единичным коронным разрядом, оказалась слишком мала для того, чтобы быть замеченной на фоне естественных шумов в атмосфере Земли, но в совокупности большого количества коронных разрядов излучение лавин может превысить естественный фон. Большое количество одновременно горящих коронных разрядов может быть реализовано в заряженном аэрозоле, который в естественных условиях образуется в грозовых облаках, в песчаных и снежных бурях и в облаках над действующими вулканами, а в лабораторных условиях создается генераторами заряженного аэрозоля (см., например, [11]).

5. Заключение

Разработана модель электромагнитного излучения СВЧ диапазона бесстримерного коронного разряда, вызванного флуктуациями тока в разряде, связанного с динамикой электронных лавин, составляющих ток разряда. Теория построена на основе представления электронной лавины излучающим электрическим диполем. Получены вид электромагнитного импульса и его спектральная энергия от отдельной лавины и спектральная мощность излучения коронного разряда в целом для различных радиусов кривизны коронирующего электрода и плотности газа в диапазоне (0,1—10) мм·атм. Обнаружена тенденция увеличения частоты и мощности излучения с уменьшением радиуса кривизны коронирующего электрода.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-17-00264.

Список литературы

1. Wang C., Chen X., Ouyang J., Li T., Fu J. Pulse Current of Multi-Needle Negative Corona Discharge and Its Electromagnetic Radiation Characteristics // *Energies*. 2018. Vol. 11. Art. 3120.
2. Martinez Santos L. E., Miranda R. L., Espino-Cortes F. P. Electromagnetic Spectrum of the Corona Discharge and Their Fundamental Frequency. In : *Recent Topics in Electromagnetic Compatibility*, 2021.
3. Pekarek S. Electromagnetic emission of a hollow needle to mesh negative corona and quasi-periodical spark discharge in the air // *Eur. Phys. J. D*. 2025. Vol. 79. Art. 29.
4. Физическая энциклопедия. М. : Советская энциклопедия, 1990. Т. 2: Добротность — Магнитооптика. С. 539–540.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М. : Наука, 1973. 504 с.
6. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Искровой разряд. М. : Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М. : Наука, 1987. 506 с.
8. Богатов Н. А. Исследование пороговых характеристик разряда на аэрозольных частицах // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, вып. 11. С. 921—931.
9. Bazelyan E. M., Aleksandrov N. L., Raizer Yu. P., Konchakov A. M. The effect of air density on atmospheric electric fields required for lightning initiation from a long airborne object // *Atm. Research*. 2007. Vol. 86, no. 2. P. 126–138.
10. Dutton J. A survey of electron swarm data // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1975. Vol. 4, no. 3. P. 577–856.
11. Богатов Н. А., Сысоев В. С., Сухаревский Д. И., Наумова М. Ю. Микроволновая диагностика разрядов в искусственном облаке заряженных водяных капель // *ЖТФ*. 2022. Т. 92, вып. 3. С. 386—391.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Условие слабого тока сферического коронного разряда

В стационарном коронном сферическом разряде концентрации электронов n_e и ионов n_i подчиняются следующим уравнениям:

$$\mp \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_e \mu_e E) = \nu_i n_e \quad (\text{A.1})$$

$$\pm \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_i \mu_i E) = \nu_i n_e \quad (\text{A.2})$$

где $\nu_i = \lambda_1 \mu_e E$ — частота ионизации электронным ударом. Верхние знаки в уравнениях (A.1, A.2) соответствуют положительному коронному разряду, а нижние — отрицательному. Подвижности электронов μ_e и ионов μ_i слабо зависят от поля E , поэтому для оценок можно считать их постоянными. Тогда уравнения (A.1, A.2) принимают вид:

$$\mp \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_e E) = \lambda_1 E n_e \quad (\text{A.3})$$

$$\pm \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 n_i E) = \lambda_1 \frac{\mu_e}{\mu_i} E n_e \quad (\text{A.4})$$

Невозмущенное поле в сферическом коронном разряде равно:

$$E_e(r) = \pm E_0 \frac{r_0^2}{r^2} \quad (\text{A.5})$$

где r_0 — радиус электрода, E_0 — поле на поверхности электрода (абсолютная величина). Предполагая возмущение поля пространственным зарядом малым и подставляя поле (A.5) в уравнения (A.3, A.4), получим:

$$\mp \frac{dn_e}{dr} \approx \lambda_1 n_e \quad (\text{A.6})$$

$$\pm \frac{dn_i}{dr} \approx \lambda_1 \frac{\mu_e}{\mu_i} n_e \quad (\text{A.7})$$

Решение уравнений (A.6, A.7) для положительного разряда:

$$n_e(r) \approx n_{e0} \exp \left[- \int_{r_0}^r \lambda_1 dr \right] \quad (\text{A.8})$$

$$n_i \approx \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} \int_{r_0}^r \lambda_1(r') \exp \left[- \int_{r_0}^{r'} \lambda_1(r'') dr'' \right] dr' \quad (\text{A.9})$$

где n_{e0} — концентрация электронов вблизи электрода.

Решение уравнений (A.6, A.7) для отрицательного разряда:

$$n_e(r) \approx n_{e0} \exp \left[\int_{r_0}^r \lambda_1 dr \right] \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} n_i &\approx \frac{\mu_e}{\mu_i} \int_r^\infty \lambda_1(r') n_e(r') dr' \approx \\ &\approx \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} \int_r^\infty \lambda_1(r') \exp \left[\int_{r_0}^{r'} \lambda_1(r'') dr'' \right] dr' \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Возмущение поля пространственным зарядом $\Delta E = E(r) - E_e(r)$ подчиняется уравнению Пуассона:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Delta E) = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e) \quad (\text{A.12})$$

Поскольку $\exp \left[- \int_{r_0}^{r'} \lambda_1(r'') dr'' \right] \leq 1$, то из (9) следует, что для положительного разряда

$$n_i < \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} K \quad K = \int_{r_0}^\infty \lambda_1(r) dr \quad (\text{A.13})$$

В положительном разряде практически во всей зоне ионизации (за исключением тонкого слоя вблизи электрода) $n_i > n_e$. Тогда из (A.13) и (A.12) следует:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Delta E) < \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} K \rightarrow \Delta E \leq \frac{1}{3} \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} K \left(r - \frac{r_0^3}{r^2} \right) \quad (\text{A.14})$$

Наибольшей величины ΔE достигает на границе r_i зоны ионизации (область за пределами зоны ионизации нас не интересует), а поле электрода там минимальное, равное пробойному значению E_{br} . Чтобы влиянием пространственного заряда можно было пренебречь, достаточно выполнения условия $\Delta E < E_{br}$:

$$\frac{1}{3} \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} K \left(r_i - \frac{r_0^3}{r_i^2} \right) < E_{br} \quad \text{или} \quad n_{e0} < 3 \frac{\mu_i \varepsilon_0}{e \mu_e} \frac{E_{br}}{r_0} \frac{1}{K \left(\sqrt{r_0} - \frac{1}{r_0} \right)} \quad (\text{A.15})$$

Ток разряда равен:

$$I = 4\pi r_0^2 e \mu_e E_0 n_{e0} \quad (\text{A.16})$$

Тогда из (A.15) получаем условие малости тока положительного коронного разряда:

$$I < 12\pi \mu_i \varepsilon_0 r_0 E_{br}^2 \frac{\gamma_0}{K(\sqrt{\gamma_0 - \frac{1}{\gamma_0}})} \quad (\text{A.17})$$

В отрицательном разряде электронная концентрация растет по радиусу, достигая максимального значения $n_{em} = n_{e0} \exp(K)$ на границе зоны ионизации. Из (A.11) следует неравенство:

$$n_i(r) < \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{em} K = \frac{\mu_e}{\mu_i} n_{e0} K \exp(K) \quad (\text{A.18})$$

Максимальной величины возмущение поля пространственным зарядом в отрицательном разряде, так же, как и в положительном, достигается на границе зоны ионизации, поэтому критерием малости тока отрицательного разряда также является условие $\Delta E(r = r_i) < E_{br}$, из которого аналогично (A.15, A.16) получаем условие малости тока отрицательного разряда:

$$I < 12\pi \mu_i \varepsilon_0 r_0 E_{br}^2 \frac{\gamma_0}{K(\sqrt{\gamma_0 - \frac{1}{\gamma_0}})} \exp(-K) \quad (\text{A.19})$$

Учитывая, что пробойное поле прямо пропорционально, а подвижность ионов обратно пропорциональна плотности газа, запишем критерии малости тока коронного разряда, выделив зависимость от плотности газа в явном виде:

$$\text{положительный разряд: } I < 12\pi (\mu_i \delta) \varepsilon_0 \left(\frac{E_{br}}{\delta} \right)^2 \frac{\gamma_0}{K(\sqrt{\gamma_0 - \frac{1}{\gamma_0}})} (r_0 \delta) \quad (\text{A.20})$$

$$\text{отрицательный разряд: } I < 12\pi (\mu_i \delta) \varepsilon_0 \left(\frac{E_{br}}{\delta} \right)^2 \frac{\gamma_0}{K \exp(K) (\sqrt{\gamma_0 - \frac{1}{\gamma_0}})} (r_0 \delta) \quad (\text{A.21})$$

Ограничение (A.21) на ток отрицательного разряда в $\exp(K) \approx 3000$ раз более сильное, чем в положительном разряде.

При изменении $r_0 \delta$ в диапазоне (0,1—10) мм параметр γ_0 меняется в диапазоне (1,8—7,2), при этом множитель $\frac{\gamma_0}{\sqrt{\gamma_0 - \frac{1}{\gamma_0}}} = 2,1—2,8$. Другие посто-

янные величины имеют для воздуха приблизительно следующие значения: $E_{br}/\delta = 26$ кВ/см, $\mu_i \delta = 2$ В⁻¹см²с⁻¹, $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-14}$ Ф/см, $K = 8$. Подставляя эти значения в (A.20, A.21), получим следующие количественные критерии малости тока коронного разряда, при котором возмущением поля электрода пространственным зарядом можно пренебречь:

$$\text{положительный разряд } I_{[\text{мкА}]} < (1.2 - 4) \cdot 10^2 (r_0 \delta)_{[\text{мм}]} \quad (\text{A.22})$$

$$\text{отрицательный разряд } I_{[\text{мкА}]} < (0.04 - 0.13) (r_0 \delta)_{[\text{мм}]} \quad (\text{A.23})$$

Нижняя граница тока в (А.22) и (А.23) соответствует $r_0\delta = 0,1$ мм, а верхняя — $r_0\delta = 10$ мм.

Информация об авторе

Богатов Николай Анатольевич, научный сотрудник Института прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Microwave Radiation of Corona Discharge

N. A. Bogatov

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS
46, Ul'yanov Str., Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation
bogatov@ipfran.ru

Received: April 29, 2025

Peer-reviewed: May 6, 2025

Accepted: May 6, 2025

Abstract: An analytical model of the mechanism of microwave radiation of a streamerless stationary corona discharge caused by a discrete structure of the discharge current consisting of a set of electron avalanches is developed. The shape, amplitude and directional pattern of electromagnetic pulses emitted by electron avalanches of positive and negative corona discharges on an electrode with a hemispherical end are determined. The spectral intensity of electromagnetic radiation of positive and negative corona discharges on a spherical electrode is calculated depending on the electrode radius and discharge current. A tendency for the frequency and intensity of the considered radiation of a corona discharge with a given current to increase with a decrease in the radius of curvature of the corona electrode is detected. Objects of natural and laboratory origin are proposed, in which the avalanche mechanism of microwave radiation generation can manifest itself with an intensity sufficient for its registration.

Keywords: corona discharge, electron avalanche, microwave radiation.

For citation (IEEE): N. A. Bogatov, "Microwave Radiation of Corona Discharge," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 376–397, 2025.
doi: 10.21227/c9n6-3x86. (In Russ.).

Acknowledgments

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 23-17-00264.

References

- [1] C. Wang, X. Chen, J. Ouyang, T. Li, and J. Fu, "Pulse Current of Multi-Needle Negative Corona Discharge and Its Electromagnetic Radiation Characteristics," *Energies*, vol. 11, Art. 3120, 2018.
- [2] L. E. Martinez Santos, R. L. Miranda, and F. P. Espino-Cortes, "Electromagnetic Spectrum of the Corona Discharge and Their Fundamental Frequency," in: *Recent Topics in Electro-magnetic Compatibility*, 2021.
- [3] S. Pekarek, "Electromagnetic emission of a hollow needle to mesh negative corona and quasi-periodical spark discharge in the air," *Eur. Phys. J. D*, vol. 79, art. 29, 2025.
- [4] Physical Encyclopedia (Fizicheskaya enciklopediya), vol. 2, pp.539–540, 1990. (In Russ.)

- [5] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Course of Theoretical Physics, The Classical Theory of Fields*, vol. 2, Pergamon Press, 1971.
- [6] E. M. Bazelyan and Y. P. Raizer, *Spark Discharge*, Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [7] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Berlin: Springer, 1997.
- [8] N. A. Bogatov, "Study of the Threshold Characteristics of a Discharge from Aerosol Particles," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 56 (11-12), pp. 829–838, 2014.
- [9] E. M. Bazelyan, N. L. Aleksandrov, Yu. P. Raizer, and A. M. Konchakov, "The effect of air density on atmospheric electric fields required for lightning initiation from a long airborne object," *Atm. Research*, vol. 86, no. 2, pp. 126–138, 2007.
- [10] J. Dutton, "A survey of electron swarm data," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 4, no. 3, pp. 577–856, 1975.
- [11] N. A. Bogatov, V. S. Syssoev, D. I. Sukharevsky, and M. Yu. Naumova, "Microwave diagnostics of electrical discharges in an artificial cloud of charged water drops," *Tech. Phys.*, vol. 68 (Suppl. 2), pp. S251–S256, 2023.

Information about the author

Nikolai A. Bogatov, Scientific researcher at the A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Особенности исследования антенных систем крайне высокочастотного диапазона по измерениям на компактных полигонах

¹Кирпанев А. В., ²Кирпанев Н. А.

¹АО «Научно-производственное предприятие “Радар ммс”»

ул. Новосельковская, д. 37 литера А,

г. Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

kirpanev_av@radar-mmms.com

Получено: 27 апреля 2025 г.

Отрецензировано: 5 мая 2025 г.

Принято к публикации: 5 мая 2025 г.

Аннотация: Рассмотрены особенности экспериментального исследования антенн крайне высокочастотного диапазона длин волн с применением сферического сканера распространенной кинематической схемы. Представлены аналитические выражения для выполнения задач волновой диагностики, позволяющие в зависимости от волнового размера испытываемой антенны рассчитать электромагнитное поле в ее плоской апертуре по измерениям амплитуды и фазы в дальней и ближней зонах излучения. Приведено решение по восстановлению электромагнитного поля в плоской апертуре испытываемой антенны на основе прямых измерений амплитуды и фазы с помощью коллиматора. Волновая диагностика испытываемых антенн по измерениям в ближней зоне основана на определении составляющих векторных амплитудных спектров однородных плоских волн через амплитуды векторных сферических волн. Основой волновой диагностики антенн как по измерениям в дальней зоне, так и с помощью коллиматора, является определение составляющих векторных амплитудных спектров однородных плоских волн испытываемой антенны через амплитуды сферических гармоник измеренных составляющих поля. Приведены различные схемы измерительных комплексов, применяемых для экспериментального исследования антенн и антенных систем.

Ключевые слова: антенна, дальнее поле, ближнее поле, апертура антенны, коллиматор, апертурное поле, сферический сканер, измерительный зонд, диаграмма направленности.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А. Особенности исследования антенных систем крайне высокочастотного диапазона по измерениям на компактных полигонах // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 398—417.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Кирпанев, А. В. Особенности исследования антенных систем крайне высокочастотного диапазона по измерениям на компактных полигонах / А. В. Кирпанев, Н. А. Кирпанев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 398—417.

1. Введение

Современные методы экспериментального исследования антенн и антенных систем предполагают применение векторных анализаторов цепей (ВАК), измеряющих амплитудно-фазовое распределение электромагнитного поля (ЭМП) испытуемой антенны (ИА) или антенной системы. Амплифазометрические измерения (от названия первоначальных средств измерения — амплифазометров) активно развивались с середины 60-х годов прошлого века для определения расчетным путем основных характеристик антенн больших волновых размеров в дальней зоне по измерениям в ближней зоне [1—4]. При этом в большинстве случаев ограничивались амплитудными диаграммами направленности (ДН) и коэффициентами усиления (КУ) ИА. Однако с развитием фазированных и активных фазированных антенных решеток (ФАР и АФАР) возросла необходимость волновой диагностики ИА, которую, как правило, корректно выполнить без амплифазометрических измерений невозможно. Последнее привело к необходимости организации подобных измерений не только в ближней, но и в дальней зоне ИА, а также с помощью коллиматора [5].

В ближней зоне, в зависимости от направленных свойств ИА, измерение ближнего ЭМП выполняют на координатных поверхностях, замыкающих ИА. Обычно это плоскость, цилиндр или сфера [1]. Сфера является ограниченной координатной поверхностью, поэтому определение характеристик ИА по измерениям на сфере имеет очевидные преимущества: наименьшая зависимость от направленных свойств ИА из-за отсутствия или незначительных методических ошибок от ограничения области измерения; возможность выполнения измерений как в ближней, так и в дальней зоне ИА; возможность обходиться без учета направленных свойств зонда в большинстве прикладных задач; легче реализовать измерения характеристик ИА с фрагментом носителя, а также радиопрозрачным обтекателем [6, 7].

Большие сложности вызывает практическая реализация амплифазометрических измерений в крайне высокочастотном (КВЧ) диапазоне от 27

до 110 ГГц. В W -диапазоне частот особенно сложно обеспечить требуемую погрешность измерения фазы, зависящую, преимущественно, от погрешностей позиционирования измерительного зонда и ИА (табл. 1).

Таблица 1. Требуемые погрешности позиционирования.

Table 1. Required positioning errors

Частотные диапазоны	Сферическое сканирование		
	Линейные ошибки $\leq$, мкм	Угловые ошибки $\leq$, (угловые минуты)	Радиус сферы $\leq$, м
X: 8—12 ГГц	± 150	$\pm 3'$	2
Ka: 27—40 ГГц	± 55	$\pm 1,5'$	1
W: 75—110 ГГц	± 25	$\pm 0,5'$	0,7

При выполнении условий, приведенных в табл. 1, среднеквадратические фазовые ошибки, обусловленные погрешностью позиционирования, не превышают 3—4°. Большинство организаций, специализирующихся на разработке стендов для антенных измерений, ограничиваются наибольшей частотой 50 ГГц. При выполнении измерений в W -диапазоне приемлемая для практики точность определения характеристик антенн может быть обеспечена при расхождении осей ± 35 мкм и угловых ошибках $\pm 1'$. Рассматривая возможность применения рефлекторного коллиматора, нужно учитывать, что отклонение профиля зеркала от расчетного в долях длины волны λ должно быть $\leq 0,015\lambda$ [3].

Приведенные ниже способы измерений характеристик ИА сферическим сканером связаны с системами координат, расположение которых по отношению к излучающей апертуре ИА приведено на рис. 1.

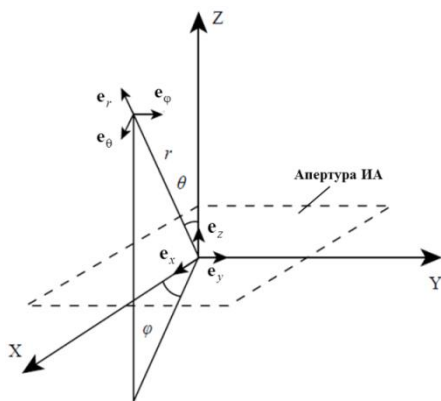


Рис. 1. Связанные с испытуемой антенной системы координат.

Fig. 1. Coordinate systems associated with the antenna under test

На рис.1 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ — единичные векторы декартовой системы координат, $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$ — единичные векторы сферической системы координат, r, θ, φ — сферические координаты.

Еще одна сложность при выполнении измерений в КВЧ диапазоне заключается в большом количестве точек измерения, определяемых требуемым шагом измерений по углу места и азимуту из следующих условий [4]

$$\begin{cases} \Delta\theta \leq \lambda/4r_a, \\ \Delta\varphi \leq \lambda/2r_a, \end{cases} \quad (1)$$

где r_a — минимальный радиус сферы, в который вписывается ИА. Например, в W -диапазоне для рефлекторной антенны диаметром 260 мм, даже ограничивая измерения областью передней полусферы при угловой скорости по азимуту $10^\circ/\text{с}$, время измерений для двух ортогональных поляризаций составит 5 часов. Такое время измерений делает очень трудоемким настройку рефлекторных антенн различных конструкций по максимуму плотности потока мощности в дальней зоне, так как для каждого положения рефлектора (или облучателя) необходимо выполнять длительные измерения с последующим восстановлением поля ИА в дальней зоне. Расстояние до дальней зоны антенны соответствует известному критерию [2]

$$r_{\text{дз}} \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где D — наибольший линейный размер поверхности излучаемой апертуры.

Приведенные выше обстоятельства побуждают искать пути менее трудоемкой настройки ИА и определения их амплитудных ДН и КУ, переходя к детальной волновой диагностике при существенных отклонениях КУ и параметров ДН от требуемых.

2. Измерения в ближней зоне

Рассматривая особенности амплифазометрических измерений в безэховой экранированной камере (БЭК) компактного полигона (КП), примем для определенности, что наибольшее расстояние, на котором возможны измерения, составляет 15 м. На таком расстоянии, согласно (2), прямые амплифазометрические измерения для антенн с круглой излучающей апертурой в Ка-диапазоне возможны до диаметра $D \leq 250$ мм, а в W -диапазоне — до $D \leq 155$ мм. Ориентации излучающей апертуры, приведенной на рис. 1, соответствует один из самых распространенных сферических сканеров для выполнения экспериментальных исследований ИА по измерениям в ближней зоне [4], приведенный ниже на рис. 2.

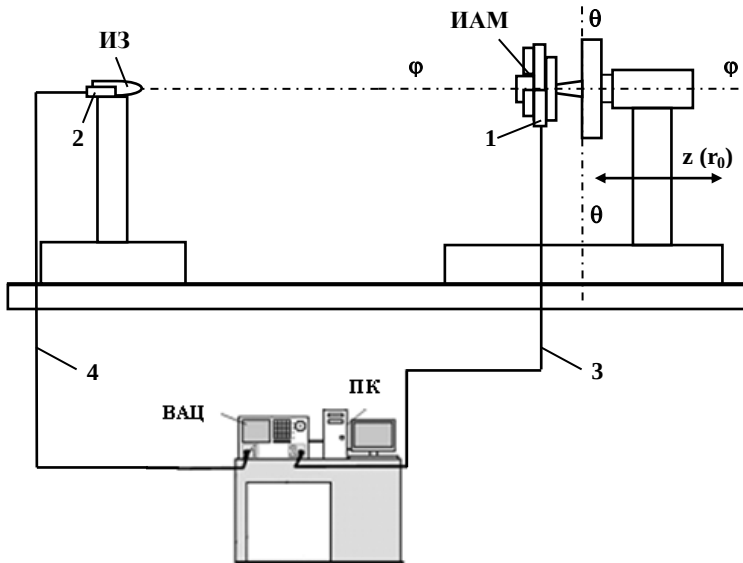


Рис. 2. Сферический сканер для испытания антенных систем.

Fig. 2. Spherical scanner for testing antenna systems

На рис. 2 обозначены: ИЗ — измерительный зонд; ИАМ — испытуемый антенный модуль, в состав которого входит несколько антенн; ВАЦ — векторный анализатор цепей, применяемый как амплифазометр; ПК — персональный компьютер для управления измерениями, сохранения результатов измерений и их последующей обработки; 4 и 3 — коаксиальные СВЧ-кабели, фазостабильные на промежуточной частоте; 1 — умножитель частоты; 2 — смеситель; φ – φ — азимутальная ось вращения; θ – θ — угломестная ось вращения; $z(r_0)$ — изменение положения ИА или ИАМ относительно центра сферы радиуса r_0 с помощью перемещение слайдера по координате z . Все составные части сканера, естественно, закрываются радиопоглощающим материалом (РПМ).

Составляющие напряженности электрического поля определяются известными равенствами [4]

$$E_\theta = \frac{k}{\sqrt{\eta}\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m (a_{nm} h_n^{(2)}(kr)) \frac{im P_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} + \\ + b_{nm} \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr \cdot h_n^{(2)}(kr)) \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos\theta) e^{im\varphi}, \quad (3)$$

$$E_{\varphi} = \frac{k}{\sqrt{\eta}\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m (a_{nm} h_n^{(2)}(kr) \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) + b_{nm} \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr \cdot h_n^{(2)}(kr)) \frac{im P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta}) e^{im\varphi}, \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, $\eta = \sqrt{\varepsilon/\mu}$ — проводимость среды, ε — диэлектрическая проницаемость среды, μ — магнитная проницаемость среды, $h_n^{(2)}(kr)$ — сферическая функция Ганкеля второго рода [4], $P_n^{|m|}(\cos \theta)$ — нормированная присоединенная функция Лежандра [4], $N = \{kr_a\} + n_1$ — число удерживаемых векторных сферических волн, $\{ \}$ — обозначение округления kr_a до меньшего целого числа, r_a — минимальный радиус сферы, в который вписывается ИА или ИАМ, a_{nm} и b_{nm} — амплитуды векторных сферических волн, n_1 — дополнительное слагаемое, призванное повысить точность. Если ИА или ИАМ имеют большие волновые размеры, то n_1 берут равным 10 [4], или определяют равенством [8]

$$n_1 = \varsigma \sqrt[3]{kr_a}. \quad (5)$$

Значение ς определяется условиями теряемой долей энергии от ограничения предела суммирования в (3) и (4) и определяется табл. 2

Таблица 2. Определение параметра ς .

Table 1. Definition of the parameter ς

Доля теряемой энергии, дБ	ς
-40	1,6
-60	2,5
-80	3.6
-120	5

Нормированная присоединенная функция Лежандра определяется равенством

$$P_n^{|m|}(\cos \theta) = \sqrt{\frac{2n+1}{2} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^{|m|}(\cos \theta), \quad (6)$$

где $P_n^{|m|}(\cos \theta)$ — присоединенная функция Лежандра (ненормированная).

Входящие в (3—4), $\frac{m P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta}$ и $\frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta)$ вычисляются с помощью

рекуррентных соотношений [4, 9], примененных к $P_n^{|m|}(\cos \theta)$, за исключением особых точек [4] при $\theta = 0$, $\theta = \pi/2$, $\theta = \pi$. Например, при $\theta = 0$:

$$P_n^{|m|}(\cos \theta)|_{\theta=0} = \begin{cases} 1, & |m| = 0, \\ 0, & |m| > 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{mP_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta}|_{\theta=0} = \begin{cases} 0, & m \neq \pm 1, \\ \pm \frac{n(n+1)}{2}, & m = \pm 1, \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta)|_{\theta=0} = \begin{cases} 0, & |m| \neq 1, \\ \frac{n(n+1)}{2}, & |m| = 1, \end{cases} \quad (9)$$

Равенства для значений $\theta = \pi/2$, $\theta = \pi$ приведены в [4] на стр.320—321.

При больших значениях n можно воспользоваться приближенной формулой [9]

$$P_n^{|m|}(\cos \theta) = (-n)^m \sqrt{\frac{2}{\pi n \sin \theta}} \cos\left((n + \frac{1}{2})\theta - \frac{\pi}{4} + \frac{m\pi}{2}\right) + O(n^{-\frac{3}{2}}). \quad (10)$$

Присоединенные функции Лежандра и их производные можно определять и с помощью численного интегрирования на основе равенств [9]

$$P_n^{|m|}(\cos \theta) = \frac{(-i)^m}{\pi} \frac{(n+m)!}{n!} \int_0^\pi (\cos \theta + i \sin \theta \cos \psi)^n \cos(m\psi) d\psi, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_n^{|m|}(\cos \theta)}{d\theta} &= \frac{(-i)^m}{\pi} \frac{(n+m)!}{(n-1)!} \int_0^\pi (\cos \theta + i \sin \theta \cos \psi)^{n-1} \times \\ &\times (-\sin \theta + i \cos \theta \cos \psi) \cos(m\psi) d\psi. \end{aligned} \quad (12)$$

Амплитуды a_{nm} и b_{nm} определяются экспериментальным путем с помощью численного интегрирования на основе следующих равенств [4]

$$\begin{aligned} a_{nm} &= \frac{\sqrt{\eta}}{k} \frac{(-1)^m}{\sqrt{2\pi} h_n^{(2)}(kr_0) \sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{m}{|m|}\right)^{-m} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} (E_\theta(r_0, \theta, \varphi) \frac{i(-m)P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} - \\ &- E_\varphi(r_0, \theta, \varphi) \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta)) e^{-im\varphi} \sin \theta d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} b_{nm} &= \frac{\sqrt{\eta}}{k} \frac{(-1)^m}{\sqrt{2\pi} \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr \cdot h_n^{(2)}(kr))|_{r=r_0} \sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{m}{|m|}\right)^{-m} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} (E_\theta(r_0, \theta, \varphi) \times \\ &\times \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) + E_\varphi(r_0, \theta, \varphi) \frac{i(-m)P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta}) e^{-im\varphi} \sin \theta d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (14)$$

где $E_\theta(r_0, \theta, \varphi)$ и $E_\varphi(r_0, \theta, \varphi)$ — комплексные амплитуды составляющих напряженностей электрического поля, измеренные на окружающей ИА (или ИАМ) сфере радиуса r_0 .

В дальней зоне в декартовой системе координат вектор напряженности электрического поля

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = i2\pi k \cos \theta \mathbf{A}(k_x, k_y) \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad (15)$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, $\mathbf{A}(k_x, k_y)$ — векторный амплитудный спектр однородных плоских волн, направление распространения которых характеризуется вектором $\mathbf{k} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y + k_z \mathbf{e}_z$, $k_x = \sin \theta \cos \varphi$, $k_y = \sin \theta \sin \varphi$, $k_z = \cos \theta = \sqrt{1 - k_x^2 - k_y^2}$. Область определения k_x и k_y является открытой окружностью единичного радиуса.

В дальней зоне и при больших значениях k без снижения точности определения поля излучения можно воспользоваться равенствами [4, 9]

$$\begin{cases} h_n^{(2)}(kr) = i^{n+1} \frac{e^{-ikr}}{kr}, \\ \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr \cdot h_n^{(2)}(kr)) = i^n \frac{e^{-ikr}}{kr}. \end{cases} \quad (16)$$

После подстановки (16) в (3) – (4), получим

$$E_\theta = \frac{1}{\sqrt{\eta} \sqrt{2\pi}} \frac{e^{-ikr}}{r} \sum_{n=1}^N \frac{i^n}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m \left(-a_{nm} \frac{m P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} + b_{nm} \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) \right) e^{im\varphi}, \quad (17)$$

$$E_\varphi = \frac{1}{\sqrt{\eta} \sqrt{2\pi}} \frac{e^{-ikr}}{r} \sum_{n=1}^N \frac{i^{n+1}}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m \left(a_{nm} \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) + b_{nm} \frac{m P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \right) e^{im\varphi}. \quad (18)$$

Выполняя преобразования над равенством (21) по переходу от декартовой к сферической системе координат и учитывая (17—18), получим равенства [10]

$$A_x(k_x, k_y) = \frac{1}{i2\pi k \sqrt{\eta} \sqrt{2\pi}} \frac{E'_\theta \cos \theta \cos \varphi - E'_\varphi \sin \varphi}{\cos \theta}, \quad (19)$$

$$A_y(k_x, k_y) = \frac{1}{i2\pi k \sqrt{\eta} \sqrt{2\pi}} \frac{E'_\theta \cos \theta \sin \varphi + E'_\varphi \cos \varphi}{\cos \theta}, \quad (20)$$

где

$$E'_\theta = \sum_{n=1}^N \frac{i^n}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m \left(-a_{nm} \frac{m P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} + b_{nm} \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) \right) e^{im\varphi}, \quad (21)$$

$$E'_\varphi = \sum_{n=1}^N \frac{i^{n+1}}{\sqrt{n(n+1)}} \sum_{m=-n}^n \left(-\frac{m}{|m|} \right)^m \left(a_{nm} \frac{d}{d\theta} P_n^{|m|}(\cos \theta) + b_{nm} \frac{m P_n^{|m|}(\cos \theta)}{\sin \theta} \right) e^{im\varphi}, \quad (22)$$

при этом входящие в (19—22) $\sin \theta = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, $\cos \theta = \sqrt{1 - k_x^2 - k_y^2}$, $\cos \varphi = k_x / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, $\sin \varphi = k_y / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, $\varphi = \arctg(k_y / k_x)$. Продольная составляющая вектора $\mathbf{A}(k_x, k_y)$ при выполнении условия $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ в области восстановления поля, определяется равенством

$$A_z(k_x, k_y) = -\frac{1}{\sqrt{1 - k_x^2 - k_y^2}} (k_x A_x(k_x, k_y) + k_y A_y(k_x, k_y)). \quad (23)$$

Поле в апертуре или в вынесенной апертуре ИА

$$E_v(x, y, d) = k^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 A_v(k_x, k_y) e^{-ikk_x x - ikk_y y - ik\sqrt{1 - k_x^2 - k_y^2} d} dk_x dk_y, \quad (24)$$

где $v = x, y$ или z , d — расстояние до апертуры или вынесенной апертуры вдоль оси OZ в системе координат, связанной с ИА.

Равенства (19—24) предназначены для волновой диагностики ИА и ИАМ на основе амплифазометрических измерений в ближней зоне сферическим сканером (рис.2). Определение поля в апертуре позволяет, например, найти расположение излучателей планарных ФАР и АФАР, амплитуда и фаза возбуждения которых не соответствует требуемым значениям. Определение полей на вынесенной апертуре ИА за радиопрозрачным обтекателем (РПО) позволяет учесть его влияние на апертурное поле ИА. Последнее для ФАР и АФАР дает возможность поиска путей ослабления влияния РПО за счет коррекции амплитудно-фазового распределения на излучателях.

Необходимость определения характеристик ИА с фрагментом носителя возникает, например, при исследовании системы ИА—РПО или одной из антенн, входящих в состав ИАМ. Примером такого ИАМ может быть антенная система измерителя скорости и высоты космической станции. В подобных случаях фазовый центр исследуемой антенны ИАМ зна-

чительно смещается относительно точки пересечения осей $\theta-\theta$ и $\varphi-\varphi$ (рис. 2), а r_a — радиус сферы, охватывающей весь ИАМ. При этом может многократно возрастать N . В качестве вычислительного примера рассмотрим случай, когда смещение излучающей апертуры вдоль оси $OZ - z_0 = 7\lambda$ ($\lambda = 0.03$ м) относительно центра сферической системы координат (точка пересечения осей), а размер плоской излучающей апертуры — $2\lambda \times 2\lambda$. Радиус сферы, на котором рассчитывалось поле — 10λ . Ниже, на рис. 3, приведено восстановленное поле в дальней зоне в Е-плоскости.

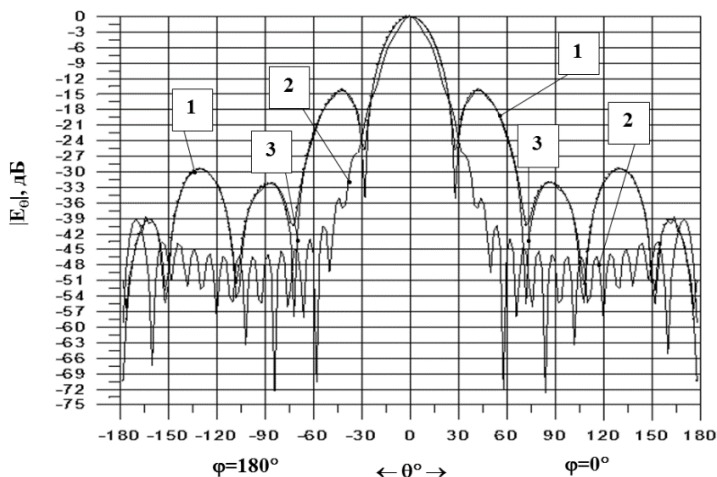


Рис. 3. Сопоставление амплитудных ДН в зависимости от числа суммируемых векторных сферических волн.

Fig. 3. Comparison of amplitude RP depending on the number of summed vector spherical waves

На рис. 3 цифрой 1 обозначена расчетная ДН апертурного источника излучения в дальней зоне, изображенная линией с символами (—+—), цифрой 2 обозначена ДН, восстановленная по распределению ближнего поля модельного источника при $N = 20$, а цифрой 3 — восстановленная ДН при $N = 80$. В примере $N = 20$ соответствует радиусу сферы, в который вписывается апертура $2\lambda \times 2\lambda$ источника излучения, а с учетом смещения $N \geq \left[k\sqrt{(d/2)^2 + z_0^2} \right] + 10$ минимально допустимая $N = 54$. На прак-

тике для высоких значений N при исследовании ИА и ИАМ КВЧ-диапазона в вычислениях целесообразно применять равенства (10—12).

Приведенный в этом разделе подход является хорошей основой для волновой диагностики ИА, ИАМ и систем «РПО—ИА», что подтверждалось ранее вычислительной и натурной верификацией [6, 10].

3. Измерения в дальней зоне

Если для волновых размеров ИА выполняется условие $r_0 \geq r_{\text{дз}}$, то основные характеристики дают прямые амплифазометрические измерения, а методы волновой диагностики, основанные на них, существенно упрощаются.

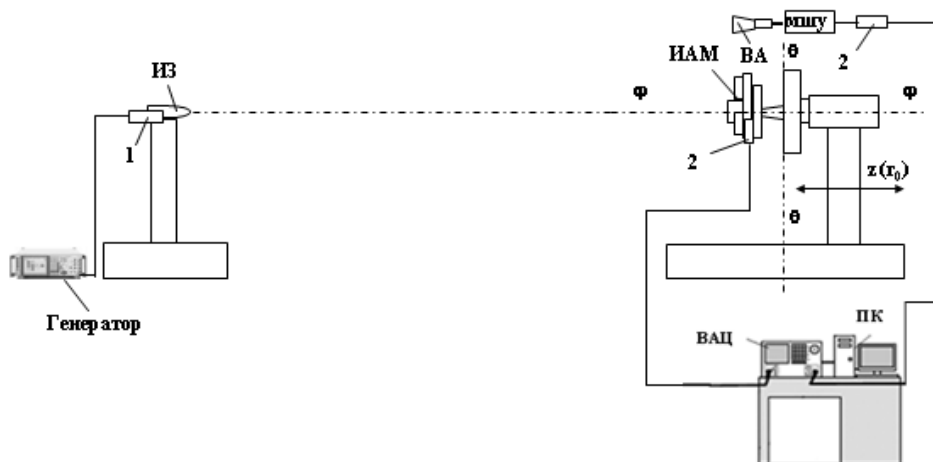


Рис. 4. Реализация измерений в дальней зоне сферическим сканером с помощью опорного радиоканала.

Fig. 4. Implementation of far-field measurements by a spherical scanner using a reference radio channel

Амплифазометрические измерения в дальней зоне для ИА небольших волновых размеров можно выполнять с помощью измерительной системы, показанной на рис. 2. При больших волновых размерах ИА или ИАМ, когда $r_0 > 5\text{ м}$, потери в СВЧ-кабелях могут быть существенными и на промежуточной частоте. Если ИА или ИАМ обладают свойством взаимности, то основные характеристики могут быть определены при их работе в режиме приема, как показано на рис. 4, на котором приведенный ИЗ работает в режиме передачи, а ВА — вспомогательная антенна, представляющая опорный канал и работающая в режиме приема. На рис. 4 МШУ — малозумящий усилитель. Опорный сигнал формируется от ЭМП, излучаемого ИЗ и принимаемого ВА, с выхода которой сигнал поступает на МШУ, а затем на смеситель 2. Подобная реализация измерений приведена в [5].

Если ИА имеет сравнительно небольшие волновые размеры, то для измерения ее дальнего поля допустимо применять сканер, показанный на рис. 2. Составляющие напряженности электрического поля ИА связаны с независимыми составляющими вектора $\mathbf{A}(k_x, k_y)$ равенствами [11]

$$\begin{cases} E_\theta(r, \theta, \varphi) = i2\pi k \frac{1}{\sqrt{1-k_z^2}} \frac{e^{-ikr}}{r} (k_x A_x(k_x, k_y) + k_y A_y(k_x, k_y)), \\ E_\varphi(r, \theta, \varphi) = i2\pi k \frac{k_z}{\sqrt{1-k_z^2}} \frac{e^{-ikr}}{r} (-k_y A_x(k_x, k_y) + k_x A_y(k_x, k_y)), \end{cases} \quad (25)$$

откуда

$$\begin{cases} A_x(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi k} \frac{i}{k_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} (k_y \hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) - k_z k_x \hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi)), \\ A_y(k_x, k_y) = -\frac{1}{2\pi k} \frac{i}{k_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} (k_x \hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) + k_z k_y \hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi)), \end{cases} \quad (26)$$

где $\hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi) = E_\theta(r_0, \theta, \varphi) r_0 e^{ikr_0}$, $\hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) = E_\varphi(r_0, \theta, \varphi) r_0 e^{ikr_0}$, r_0 — радиус сферы, на котором измеряются составляющие $E_\theta(r_0, \theta, \varphi)$, $E_\varphi(r_0, \theta, \varphi)$ с помощью ВАЦ (рис. 2), $k_z = \sqrt{1-k_x^2-k_y^2} = \cos \theta$. В полюсе сферы, при $\theta = 0$, $\varphi = 0$ и, соответственно $k_x = 0$, $k_y = 0$, независимые составляющие векторных амплитудных спектров плоских волн ИА определяются равенствами

$$\begin{cases} A_x(0, 0) = -i \frac{r_0}{2\pi k} e^{ikr_0} E_x(r_0, 0, 0) = -i \frac{r_0}{2\pi k} e^{ikr_0} E_\theta(r_0, 0, 0), \\ A_y(0, 0) = -i \frac{r_0}{2\pi k} e^{ikr_0} E_y(r_0, 0, 0) = -i \frac{r_0}{2\pi k} e^{ikr_0} E_\varphi(r_0, 0, 0). \end{cases} \quad (27)$$

Разложим $\hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi)$, $\hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi)$ в ряды по сферическим гармоникам

$$\begin{cases} \hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \Theta_{nm} P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{-im\varphi}, \\ \hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \Phi_{nm} P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{-im\varphi}, \end{cases} \quad (28)$$

где

$$\begin{cases} \Theta_{nm} = \frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi) e^{im\varphi} P_n^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta d\theta d\varphi, \\ \Phi_{nm} = \frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) e^{im\varphi} P_n^{|m|}(\cos \theta) \sin \theta d\theta d\varphi. \end{cases} \quad (29)$$

Так как измерения выполняются для дискретных значений θ и φ , то интегральные равенства (29) аппроксимируются суммами. При этом шаг измерений должен соответствовать условиям $\Delta\theta \leq \lambda/4r_a$, $\Delta\varphi \leq \lambda/2r_a$. Входящие в выражения (26) $\hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi)$ и $\hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi)$ можно представить теперь аналитическими функциями, зависящими от аргументов k_x и k_y

$$\begin{cases} \hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi) = \hat{E}_\theta(k_x, k_y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \Theta_{nm} P_n^{|m|}(\sqrt{1-k_x^2-k_y^2}/k) e^{-im \arctg(k_y/k_x)}, \\ \hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi) = \hat{E}_\varphi(k_x, k_y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \Phi_{nm} P_n^{|m|}(\sqrt{1-k_x^2-k_y^2}/k) e^{-im \arctg(k_y/k_x)}, \end{cases} \quad (30)$$

как и составляющие $A_x(k_x, k_y)$, $A_y(k_x, k_y)$.

Поле в апертуре или в вынесенной апертуре ИА определяется равенством (24). При этом аналогично приведенному выше подходу, основанному на измерениях в ближней зоне, в дискретной интерпретации равенства (24) можно использовать равномерную сетку суммирования по аргументам k_x и k_y .

4. Измерения с помощью коллиматора

Если ИА или система «антенна-обтекатель» имеют настолько большие волновые размеры, что условие $r_0 \geq 2D^2/\lambda$ становится трудновыполнимым из-за потерь и фазовых ошибок в СВЧ-трактах и требуемых размеров помещения измерительного КП, то можно воспользоваться практикой коллиматорных измерений [2, 3, 5]. Один из вариантов коллиматора, преобразующего сферический фронт облучателя в плоский с помощью планарной линзы, приведен ниже на рис. 5, где обозначены: ВАЦ — векторный анализатор цепей; ПК — персональный компьютер для управления измерениями и обработки измеренных данных; 1, 2 — фазостабилизаторы коаксиальные СВЧ-кабели; О — облучатель; РПМ — радиопоглощающий материал; ПЛ — планарная линза; СРП — стойка радиального перемещения ИЗ; «О»Ф — «отвязанный» фундамент. Остальные обозначения раскрыты на рис. 3. Коллиматор должен размещаться на одном со сферическим сканером «О»Ф основании для исключения влияния внешних механических воздействий на точность позиционирования при выполнении измерений.

Один из вариантов успешной реализации коллиматора с ПЛ для исследования антенн W-диапазона показан в [12, 13]. Приведенный на рис. 5 стенд предназначен как для амплифазометрических измерений в ближней

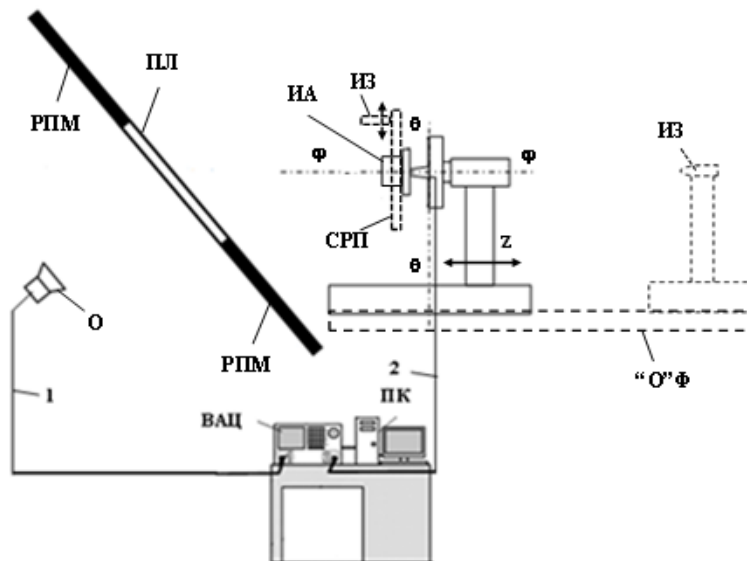


Рис. 5. Стенд для экспериментального исследования и настройки антенн и антенных систем КВЧ-диапазона.

Fig. 5. A stand for experimental research and adjustment of antennas and antenna systems of the UHF range

зоне с помощью сферического сканера, так и для выполнения измерений с помощью коллиматора, применяя одно двухкоординатное опорно-поворотное устройство (ОПУ). Угловое перемещения с помощью ОПУ вокруг азимутальной оси $\varphi - \varphi$ открывает возможность с помощью размещения СРП с управляемым перемещением ИЗ с линейной поляризацией выполнить измерения амплитудного и фазового распределения в «тихой зоне» апертурного поля коллиматора. Измерения выполняются при двух ортогональных положениях ИЗ. Желательно, чтобы длина СРП превышала диаметр расчетной «тихой зоны». С помощью слайдера, перемещая ОПУ по координате z (рис. 5), можно контролировать равномерность амплитуды и фазы в разных сечениях «тихой зоны».

Коллиматор позволяет выполнять быструю проверку основных характеристик ИА больших волновых размеров и настройку рефлекторных ИА. К основным характеристикам ИА отнесем параметры амплитудных ДН в двух ортогональных сечениях — ширину главного лепестка ДН, уровень боковых лепестков (УБЛ), а также КУ и коэффициент эллиптичности для антенн с круговой поляризацией. Один из способов измерения КУ с помощью коллиматора приведен в [5]. В более детальных исследованиях ИА (или ИАМ) возникает необходимость при существенных откло-

нениях основных характеристик от требуемых. В этих случаях для реализации волновой диагностики необходимо выполнять измерения на всей области сферы, ограничивающей излучаемый поток мощности ИА. В идеальном случае предполагается, что коллиматор в «тихой зоне», принадлежащей апертурной области, формирует плоский волновой фронт с равномерной амплитудой и фазой. В приведенном на рис. 5 примере равномерность фазы в «тихой зоне» определяется, преимущественно, голографической структурой, а равномерность амплитудного распределения — фокусным расстоянием и амплитудной диаграммой направленности облучателя.

Если предположить, что ИА работает в режиме излучения, а идеальный коллиматор в режиме приема, то выполнение сферического сканирования в «тихой зоне» коллиматора (рис. 5) при двух взаимноортогональных поляризациях облучателя соответствует измерениям в дальней зоне. При вертикальной поляризации облучателя с помощью ВАЦ измеряются комплексная амплитуда $U_\theta(\theta, \varphi)$, а при горизонтальной — $U_\varphi(\theta, \varphi)$, которые для идеального коллиматора с точностью до постоянного комплексного множителя соответствуют $\hat{E}_\theta(r_0, \theta, \varphi)$, $\hat{E}_\varphi(r_0, \theta, \varphi)$. В области значений k_x и k_y несложно получить аналитические выражения для $U_\theta(k_x, k_y)$, $U_\varphi(k_x, k_y)$, идентичные (30), полученные с помощью представления $U_\theta(\theta, \varphi)$, $U_\varphi(\theta, \varphi)$ рядами сферических гармоник на основе выражений, идентичных (28—29). Далее, по аналогии с измерениями в дальней зоне, приведем равенства для ИА

$$\begin{cases} \tilde{A}_x(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi k} \frac{i}{k_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} (k_y U_\varphi(k_x, k_y) - k_z k_x U_\theta(k_x, k_y)), \\ \tilde{A}_y(k_x, k_y) = -\frac{1}{2\pi k} \frac{i}{k_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} (k_x U_\varphi(k_x, k_y) + k_z k_y U_\theta(k_x, k_y)), \end{cases} \quad (31)$$

где $\tilde{A}_x(k_x, k_y)$, $\tilde{A}_y(k_x, k_y)$ для идеального коллиматора соответствуют $A_x(k_x, k_y)$, $A_y(k_x, k_y)$ с точностью до комплексного множителя. В результате подстановки в подынтегральные выражения (24) вместо $A_v(k_x, k_y)$ составляющих $\tilde{A}_v(k_x, k_y)$, после выполнения численного интегрирования получим $\tilde{E}_v(x, y, d)$. Для идеального коллиматора после нормировки к максимальным значениям амплитуд, а также вычисления относительных фазовых значений составляющих $E_v(x, y, d)$ и $\tilde{E}_v(x, y, d)$, получим иден-

тичные нормированные амплитудно-фазовые распределения (АФР) в апертуре ИА. На практике восстановленное в апертуре ИА АФР по измерениям дальнего поля будет, естественно, отличаться от АФР, полученного на основе коллиматорных измерений. Это связано как с инструментальными ошибками амплифазометрических измерений в дальней зоне, так и с отклонением апертурного фронта коллиматора от плоского в «тихой зоне». Коллиматор представляет собой рефлекторную или линзовую (рис. 5) антенну, волновой размер апертуры которой обычно вдвое превышает волновой размер апертуры ИА. Поле коллиматора в передней полусфере при его работе на излучение характеризуется векторной амплитудой однородных плоских волн $\mathbf{G}_k(k_x, k_y)$. Если рассматривать коллиматор как приемную антенну и воспользоваться интегральной формулой Кернса [14], то комплексная амплитуда сигнала, поступающего от коллиматора на вход ВАЦ при работе ИА на излучение, определяется равенством

$$U(0,0,d) = a_0 \gamma k^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{A}(k_x, k_y) \mathbf{R}_k(k_x, k_y) e^{-ik\sqrt{1-k_x^2-k_y^2}d} dk_x dk_y, \quad (32)$$

где $\mathbf{R}_k(k_x, k_y) = Z_k \eta \frac{k_z}{k} \mathbf{G}_k(-k_x, -k_y)$ — векторный амплитудный спектр приема коллиматора; $\eta = \sqrt{\varepsilon/\mu}$; Z_k — входное сопротивление коллиматора; γ — коэффициент импедансного рассогласования между коллиматором и подключенным к нему входным портом ВАЦ; a_0 — комплексная амплитуда входного сигнала ИА от опорного порта ВАЦ. Коллиматор является антенной с линейной поляризацией, определяемой поляризацией излучателя. Например, если поле ИА имеет x -поляризацию, то на основе (32)

$$U_x(0,0,d) = a_0 \gamma k^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 A_x(k_x, k_y) R_{kx}(k_x, k_y) e^{-ik\sqrt{1-k_x^2-k_y^2}d} dk_x dk_y. \quad (33)$$

Для реального коллиматора $\mathbf{R}_k(k_x, k_y)$ или $R_{kx}(k_x, k_y)$ определяются или по амплифазометрическим измерениям его апертурного поля с помощью, например, плоско-полярного сканирования поля [15] СРП ИЗ (рис. 5), или оцениваются расчетным путем. Равенства (32) и (33) позволяют оценить вносимую коллиматором методическую погрешность.

Для идеального коллиматора, предполагая, что x -поляризованный плоский фронт формируется им вдоль оси OZ , $R_{kx}(k_x, k_y) = \delta(0 - k_x, 0 - k_y)$, где k_x и k_y определяются углами позиционирования сканера (рис. 5) относительно волнового фронта коллиматора. При этом, за счет фильтрую-

щего свойства δ -функции, комплексная амплитуда принимаемого коллиматором сигнала пропорциональна $A_x(k_x, k_y)$ для всех k_x и k_y области сканирования.

5. Заключение

Приведенные выше методы и представленные описания технических средств учитывают особенности экспериментального исследования ИА, ИАМ, а также систем ИА—РПО КВЧ диапазона длин волн. Представленный на рис. 5 измерительный комплекс позволяет применять приведенные выше методические подходы при настройке и исследовании излучающих систем различных волновых размеров. Амплифазометрические измерения в дальней зоне позволяют также осуществлять поиск фазовых центров антенн небольших волновых размеров, а также облучателей рефлекторных антенн. Коллиматор позволяет выполнить быстрый контроль основных характеристик ИА, что важно при их серийном изготовлении. Перспективной и требующей дальнейшего развития представляется волновая диагностика антенных систем на основе коллиматорных амплифазометрических измерений.

Список литературы

1. Yaghjian A. D. An overview of near-field antenna measurements // IEEE Trans. Antennas Propag. 1986. Vol. 34. P. 30–45.
2. Захарьев Л. Н., Леманский А. А. [и др.]. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М. : Радио и связь, 1985. 368 с.
3. Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д. [и др.]. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне. Л. : Наука, 1985. 272 с.
4. Hansen J. E. Spherical Near-Field Antenna Measurements. London : Peter Peregrinus, 1988. 876 p.
5. Миляев П. В., Калинин Ю. Н., Савченко Д. И. Современные методы и средства измерения радиотехнических характеристик антенн // Альманах современной метрологии. 2019. № 2(18). С. 133—157.
6. Кирпанев А. В., Назаров В. С., Шатраков Ю. Г., Шубников В. В. Особенности определения характеристик излучения системы антенна-фрагмент носителя по измерениям на сфере // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 2. С. 69—74.
7. Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А. Принципы исследования антенн с обтекателем регулярной формы с помощью сферического сканера // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 14—21.
8. Jensen F., Frandsen A. On the number of modes in spherical wave expansion. In : Proc. 26th AMTA. 2004. Vol. 2, no. 1. P. 489–494.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1974. 837 с.
10. Кирпанев А. В., Шубников В. В. Метод амплитудной диагностики апертурных антенн и плоских антенных решеток на основе сферического сканирования ближнего поля // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. 2015. № 2. С. 131—142.

11. Кирпанев А. В., Кирпанев Н. А. Методы исследования антенн и систем «антенна-обтекатель» по амплифазометрическим измерениям сферических составляющих их поля в дальней зоне // Вопросы радиоэлектроники. 2021. № 1. С. 45—51.
12. Ala-Laurinaho J., Hirvonen T., Piironen P. [et al.]. Measurement of the Odin telescope at 119 GHz with a hologram type CATR // IEEE Trans. Antennas Propag. 2001. Vol. 49. P. 1264–1270.
13. Lönnqvist A., Koskinen T., Häkli J. [et al.]. Hologram-based compact range for submillimeter-wave antenna testing // IEEE Trans. Antennas Propag. 2005. Vol. 53. P. 3151–3159.
14. Kerns D. M. Plane-Wave Scattering-Matrix Theory of Antennas and Antenna-Antenna Interactions. Washington : U.S. Government Printing Office, NBS Monograph 1981. 162 p.
15. Gregson S., McCormick J., Parini C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements. London : The Institution of Engineering and Technology, 2007. 413 p.

Информация об авторах

Кирпанев Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника отдела АО «НПП “Радар ммс”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Кирпанев Никита Алексеевич, ассистент высшей школы прикладной физики и космических технологий института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Features of Research on Extremely High Frequency Range Antenna Systems Using Compact Test Ranges

A. V. Kirpanev¹ and N. A. Kirpanev²

¹*Scientific and Production Enterprise “Radar Mms”*

37, Litera A, Novoselkovskaya St., St. Petersburg, 197375, Russian Federation

²*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University*

29B, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

kirpanev_av@radar-mms.com

Received: April 27, 2025

Peer-reviewed: May 5, 2025

Accepted: May 5, 2025

Abstract: *The specific aspects of experimental investigations of extremely high frequency range antennas using a spherical scanner based on a common kinematic scheme are considered. Analytical expressions are presented for solving wave diagnostics problems, enabling the calculation of the electromagnetic field distribution in the flat aperture of the antenna under test based on amplitude and phase measurements obtained in the far-field and near-field regions. The method for reconstructing the aperture field of the antenna under test using direct amplitude and phase measurements with a collimator is proposed. The wave diagnostics of antennas based on near-field measurements relies on determining the components of the vector amplitude spectra of homogeneous plane waves by the amplitudes of vector spherical waves. For both far-field measurements and collimator-based diagnostics, the fundamental principle involves calculating the components of the vector amplitude spectra of homogeneous plane waves from the amplitudes of spherical harmonics of the measured field components. Various configurations of measurement setups used for the experimental characterization of antennas and antenna systems are also presented.*

Keywords: *antenna, far field, near field, antenna aperture, collimator, aperture field, spherical scanner, measurement probe, radiation pattern.*

For citation (IEEE): A. V. Kirpanev and N. A. Kirpanev, “Features of Research on Millimeter-Wave Antenna Systems Using Compact Test Ranges,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 398–417, 2025, doi: 10.21227/fh9k-gm59. (In Russ.).

References

- [1] A. D. Yaghjian, “An overview of near-field antenna measurements,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, pp. 30–45, 1986.

- [2] L. N. Zacharyev, A. A. Lemansky, [et al.]. *Metodi izmereniya kharakteristik antenn SVCh*. Moscow: Radio i sviaz Publ., 1985. (In Russ.).
- [3] L. D. Bahrah, S. D. Kremenezky, [et al.]. *Metodi izmereniya parametrov izluchyschik system v blizney zone*. Leningrad: Nauka Publ., 1985. (In Russ.).
- [4] J. E. Hansen, *Spherical Near-Field Antenna Measurements*, London: Peter Peregrinus, 1988.
- [5] P. V. Milyev, Ju. N. Kalinin, and D. I. Savchenko, "Sovremenie metodi i sredstva izmereniya radiotekhnicheskikh kharakteristik antenn," *Almahah sovremenoy metrologii*, no. 2(18), pp. 133–157, 2019. (In Russ.).
- [6] A. V. Kirpanev, V. S. Nazarov, Ju. G. Shatrakov, and V. V. Shubnikov, "Osobennosti opredeleniya kharakteristik izlucheniya sistemy antenna-fragment nositelya po izmereniyam na sfere" // *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, vol. 2, pp. 69–74, 2013. (In Russ.).
- [7] A. V. Kirpanev and N. A. Kirpanev, "Prinzipy issledovaniya antenn s obtekatelem regulirnoy formi s pomoshchyu sfericheskogo skanera," *Voprosi radioelektroniki*, vol. 4, pp. 14–21, 2020. (In Russ.).
- [8] F. Jensen and A. Frandsen, "On the number of modes in spherical wave expansion," in: *Proc. 26th AMTA*, vol. 2, no. 1, pp. 489–494, 2004.
- [9] G. Korn and T. Korn, *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*, N.Y.: Dover Publications, 2000.
- [10] A. V. Kirpanev and V. V. Shubnikov, "Metod amplitudnoy diagnostiki aperturnikh antenn i ploskikh antennikh reshetok na osnove sfericheskogo skanirovaniya blizhnego polya," *Voprosy radioelektroniki*, Seriya OT, vol. 2, pp. 131–142, 2015. (In Russ.).
- [11] A. V. Kirpanev and N. A. Kirpanev, "Metody issledovaniya antenn i system 'antenna-obtekatel' po amplifazometricheskim izmereniyam sfericheskikh sostavlyushchikh ikh polya v dalney zone," *Voprosy radioelektroniki*, vol. 1, pp. 45–51, 2021.
- [12] J. Ala-Laurinaho, T. Hirvonen, P. Piironen, A. Lehto, [et al.], "Measurement of the Odin telescope at 119 GHz with a hologram type CATR," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, pp. 1264–1270, 2001.
- [13] A. Lönnqvist, T. Koskinen, J. Häkli, J. Säily, [et al.], "Hologram-based compact range for submillimeter-wave antenna testing," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, pp. 3151–3159, 2005.
- [14] D. M. Kerns, *Plane-Wave Scattering-Matrix Theory of Antennas and Antenna-Antenna Interactions*. Washington: U.S. Government Printing Office, NBS Monograph, 1981.
- [15] S. Gregson, J. McCormick, and C. Parini, *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007.

Information about the authors

Aleksey V. Kirpanev, Doctor of Engineering Science, Professor, Deputy Head of Department, SC SPE "Radar mms", St. Petersburg, Russian Federation.

Nikita N. Kirpanev, Assistant, Higher School of Applied Physics and Space Technologies, Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

Искусственная нейронная сеть для коррекции амплитудно-фазового распределения антенной решетки с учетом отказов антенных элементов

Тучков А. А., Горбатенко Н. Н., Нестеров В. Ю.,
Углов А. С., Чиков Н. И.

*Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи
ул. Нансена, 130, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация
tuchkov4@yandex.ru*

Получено: 25 апреля 2025 г.

Отрецензировано: 5 мая 2025 г.

Принято к публикации: 5 мая 2025 г.

Аннотация: Предложен метод коррекции амплитудно-фазового распределения антенной решетки с помощью искусственной нейронной сети при наличии отказов антенных элементов. Описанный метод позволяет в реальном масштабе времени корректировать амплитудно-фазовое распределение антенной решетки с учетом отказов антенных элементов и снижать уровень боковых лепестков диаграммы направленности в заданном угловом секторе. В исследовании подробно описан метод формирования обучающей выборки с учетом используемой архитектуры искусственной нейронной сети. Описан процесс обучения искусственной нейронной сети и приведена используемая функция ошибки. Результаты применения предложенного метода подтвердили эффективность применения искусственных нейронных сетей для коррекции амплитудно-фазового распределения с учетом отказов антенных элементов. Применение подхода позволяет не только снизить уровень боковых лепестков диаграммы направленности в заданных угловых направлениях, но и выполнять это в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: фазированные антенные решетки, диаграмма направленности, амплитудно-фазовое распределение, искусственная нейронная сеть.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Искусственная нейронная сеть для коррекции амплитудно-фазового распределения антенной решетки с учетом отказов антенных элементов / А. А. Тучков [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 418—431.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Искусственная нейронная сеть для коррекции амплитудно-фазового распределения антенной решетки с учетом отказов антенных элементов / А. А. Тучков, Н. Н. Горбатенко, В. Ю. Нестеров [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 418—431.

1. Введение

Цифровые антенные решетки (ЦАР) с большим числом каналов являются ключевым элементом современных радиолокационных, телекоммуникационных и навигационных систем. Их широкое применение обусловлено возможностью электронного сканирования, формирования диаграмм направленности (ДН). Однако практическая эксплуатация ЦАР сопряжена с проблемой отказов отдельных антенных элементов (АЭ) или целых блоков, что неизбежно приводит к ухудшению параметров ДН ЦАР: повышению уровня боковых лепестков (УБЛ), расширению луча и снижению коэффициента направленного действия (КНД). Перечисленные факторы негативно сказываются на характеристике обнаружения радиолокационных систем, т. е. при этом снижается вероятность обнаружения полезного сигнала на фоне шумов, источники которых расположены в направлениях боковых лепестков. Для восстановления характеристик ЦАР необходимо провести ремонт или замену неисправных АЭ. Однако это не всегда представляется возможным или экономически выгодным для систем, расположенных в труднодоступных местах, таких как горы, удаленные острова или для систем, находящихся в космическом пространстве. Чтобы продлить срок службы и сохранить рабочие характеристики ЦАР требуется коррекция АФР с учетом отказов АЭ.

В литературе представлены различные подходы к оптимизации и восстановлению ДН ЦАР при наличии отказов АЭ. В работе [1] применяют генетические алгоритмы для восстановления ДН после отключения каналов. Такие алгоритмы обладают высокой вычислительной ресурсоемкостью, что особенно критично для ЦАР с большим количеством АЭ. В работах [2—5] сравнивают различные методы оптимизации, такие как метод конфигураций, алгоритм имитации отжига и метод роя частиц. Алгоритм имитации отжига показывает наибольшую скорость работы, но с увеличением размера решетки время оптимизации значительно возрастает для всех методов.

Существуют перспективные подходы к синтезу ДН и коррекции АФР при применении искусственных нейронных сетей (ИНС) [6—8]. Однако в таких работах рассматриваются антенные решетки небольших размеров (6—8 АЭ) с отказом одного из элементов линейной решетки, а восстановление ДН рассматривается только в главных плоскостях. Другим применением ИНС в области синтеза ДН ЦАР является формирование нулей в диаграмме. В работе [9] указывают на эффективность ИНС в таком приложении, однако формирование нулей не позволяет справиться с помехами от протяженных источников.

Существующие подходы коррекции АФР с помощью ИНС имеют дополнительные ограничения, связанные с методом формирования обучающей выборки и архитектуры используемой ИНС. В [8] используется полносвязная ИНС, позволяющая решить задачу коррекции АФР линейной решетки, состоящей из 8 элементов с одним отключенным АЭ. Обучающая выборка в этом случае является набором всех возможных значений амплитуд и фаз с заданным шагом при одном отказавшем АЭ. Однако такой подход существенно усложняет процесс формирования обучающей выборки при увеличении числа АЭ ЦАР. Так в [8] каждый исправный АЭ может принимать одно из 5 значений амплитуды и одно из 18 значений фаз. Для ЦАР, состоящей из 6 АЭ с одним случайным отказом количество возможных вариантов составит $5^5 \times 18^5 = 47\,239\,200$ возможных ДН. Очевидно, что при дальнейшем масштабировании количества АЭ ЦАР объем такой обучающей выборки будет стремительно увеличиваться, что делает подобный подход для формирования обучающей выборки применимым только со значительными ограничениями и для малых размеров ЦАР. Следует отметить, что большая обучающая выборка, составленная из случайных значений амплитуд и фаз в задаче снижения БЛ, будет содержать большое число нерелевантных распределений, следовательно, и ДН, что в конечном счете скажется на качестве и скорости обучения ИНС.

В связи с этим представляется актуальной в научном и практическом плане разработка методов восстановления характеристик направленности АР за счет коррекции АФР при отказах части АЭ с помощью ИНС в масштабе реального времени.

Цель работы: снижение уровня боковых лепестков ДН многоканальной АР с учетом отказов антенных элементов в заданном угловом секторе в масштабе реального времени.

Решаемые задачи:

1. Разработка метода коррекции АФР АР с учетом отказов АЭ с помощью ИНС.
2. Проверка работоспособности разработанного метода коррекции АФР с учетом отказов АЭ для снижения уровня БЛ ДН в заданном угловом секторе.

2. Формирование обучающей выборки

Рассмотрим -элементную плоскую АР, раскрыв которой размещен в плоскости Oxy декартовой системы координат $Oxyz$. Пусть M — число АЭ вдоль оси Ox , а N — вдоль оси Oy .

Свяжем с декартовой системой координат сферическую систему координат $Or\theta\phi$ таким образом, что $u = \sin(\theta)\cos(\phi)$, $v = \sin(\theta)\sin(\phi)$.

С учетом введенных обозначений запишем выражение для ДН АР с отказами в виде:

$$F_{\text{отк}}(B, A, \phi, u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{mn} e^{j\phi_{mn}} e^{jk(x_{mn}u + y_{mn}v)} \cdot B_{mn}, \quad (1)$$

где A_{mn} , ϕ_{mn} — амплитуда и фаза АЭ; x_{mn} , y_{mn} — координаты фазовых центров АЭ ($m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$); $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; B_{mn} — двоичная маска отказов (1 — исправный АЭ, 0 — неисправный АЭ).

При отсутствии отказов формируемая ДН АР может быть рассчитана по формуле вида (1) при условии, что все значения двоичной маски отказов равны 1. Обозначим угловой сектор подавления БЛ ДН Ω_s , представляющий собой угловые направления, в которых требуется подавление уровня БЛ, и введем функцию $F_{\text{цел}}(u, v)$, описывающую целевую ДН. Целевая ДН вне области подавления боковых лепестков соответствует ДН АР без отказов, а в области боковых лепестков определим требования к БЛ в виде:

$$|F(u, v)|^2 \leq \epsilon \quad \forall (u, v) \in \Omega_s, \quad (2)$$

где $\epsilon = 10^{-10}$ (–100 дБ) — целевой уровень подавления в угловом секторе Ω_s .

Требуется найти амплитуды и фазы возбуждения АЭ, удовлетворяющие критерию:

$$\min_{A, \phi} \sum_{(u, v) \notin \Omega_s} |F_{\text{цел}}(u, v) - F_{\text{отк}}(B, A, \phi, u, v)|^2, \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\max_{(u, v) \in \Omega_s} |F_{\text{отк}}(B, A, \phi, u, v)|^2 \leq \epsilon, \quad (4)$$

$$0 \leq A_{mn} \leq 1, \quad (5)$$

$$0 \leq \phi_{mn} < 2\pi. \quad (6)$$

Для решения сформулированной задачи будет использоваться ИНС, для которой необходимо определить архитектуру и выполнить обучение. После этого при задании на вход ИНС маски отказов на ее выходе будет формироваться откорректированное АФР. Временные затраты на коррекцию АФР будут соответствовать времени прямого распространения входных данных через ИНС.

Согласно алгоритму внутренней точки запишем барьерную функцию $\Phi(A, \phi)$ с учетом введенных ограничений (4—6).

$$\Phi(A, \phi) = f(A, \phi) - \mu \sum \ln(\epsilon - |F|^2), \quad (7)$$

где μ — параметр барьера, уменьшаемый на каждой итерации.

При помощи метода Ньютона минимизируется выражение (8) до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки (9).

$$\begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta \Phi \end{bmatrix} = -\nabla^2 \Phi^{-1} \nabla \Phi, \quad (8)$$

$$\|\nabla \Phi\| < \delta, \quad (9)$$

Алгоритм прекращает работу, когда норма градиента барьерной функции становится меньше заданного порогового значения δ . Физический смысл этого условия заключается в том, что дальнейшие изменения переменных оптимизации (амплитуд и фаз) не приведут к существенному улучшению целевой функции. Алгоритм внутренней точки позволяет получить АФР и соответствующую ДН с подавлением уровня БЛ до -70 дБ в угловом секторе Ω_s .

Подготовка обучающей выборки выполнялась следующим образом. Первым шагом задавалась модель ЦАР размера 40×40 АЭ, расположенных в узлах прямоугольной сетки с шагом, равным $0,5\lambda$. Размер ЦАР обусловлен компромиссом между объемом доступной видеопамяти и исследовательским интересом к увеличению числа АЭ в составе решетки. Шаг выбирался исходя из требований к сектору углов отклонения главного лепестка ДН, при котором отсутствуют дифракционные максимумы.

На втором шаге формировался набор АФР Z^* с помощью оптимизационного алгоритма, описанного выше, и выражений (1—9). Будем называть такой набор и соответствующую ему ДН оптимальными. Для оптимизации необходимо сформировать эталонный набор АФР, маску отказов АЭ и угловой сектор подавления БЛ ДН. В качестве эталонного набора АФР использовались непараметрические оконные функции (окна Бартлетта, Блэкмана, Хэмминга, Ханна и др.) и параметрические (окна Тьюки, Тейлора, Кайзера, Гаусса, Чебышева) с различными параметрами. Разнообразие оконных функций требуется для обеспечения полноты обучающей выборки: различных форм ДН, коэффициента усиления и ширины главного лепестка. Маска отказов АЭ B_{mn} представляет собой матрицу АЭ со значениями, равными 1 для рабочих АЭ, и 0 для отказавших АЭ. Процент отказов АЭ в ЦАР выбирался случайно в диапазоне от 1 до 15 %.

Поскольку ИНС могут работать только с данными, которые принадлежат множеству вещественных чисел, то перед подачей комплекснозначного АФР на вход ИНС преобразовалось в изображение размером $40 \times 40 \times 2$, где в первом цветовом канале будет содержаться действительная часть АФР $\text{Re}(Z)$, а во втором мнимая часть АФР $\text{Im}(Z)$.

На третьем шаге угловой сектор подавления БЛ ДН Ω_s преобразовался к виду бинарной матрицы для возможности обработки ИНС. Индексы такой

бинарной матрицы кодируют угловые направления по азимуту и углу места. Элементы матрицы принимают значение 1, если в заданном направлении необходимо подавление БЛ ДН и 0, если такое условие отсутствует.

3. Архитектура искусственной нейронной сети

Для коррекции АФР с учетом отказов АЭ предлагается применить сверточную ИНС с несколькими входами для обработки эталонного (целевого) АФР, бинарной маски отказов АЭ и углового сектора для подавления БЛ ДН. Блок схема используемой ИНС приведена на рисунке 1.

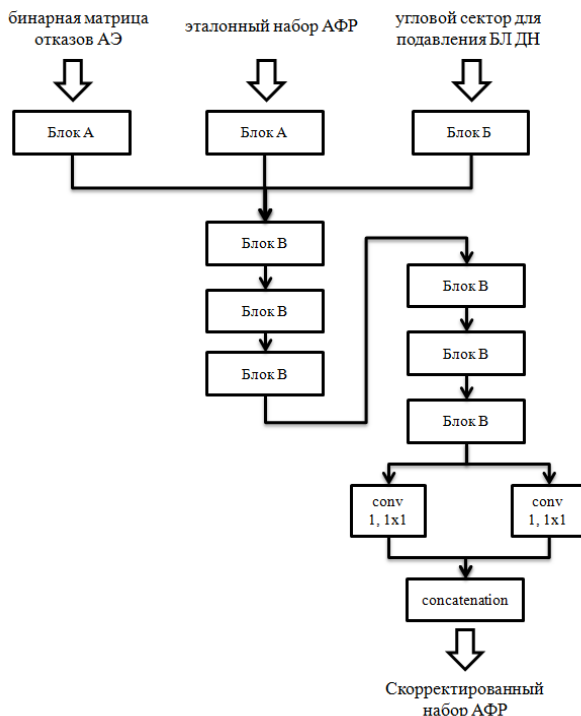


Рис. 1. Блок схема используемой архитектуры ИНС.

Fig. 1. Block diagram of the employed artificial neural network architecture

Подробная схема каждого из блоков приведена на рисунках 2—4. После каждого слоя свертки (*convolution layer*) используется слой нормализации (*batch normalization layer*) и функция активации (*leaky ReLU layer*). Слой конкатенации (*concatenation layer*) объединяет тензоры вдоль 3-й размерности, позволяя комбинировать признаки, извлеченные на разных этапах обработки данных.

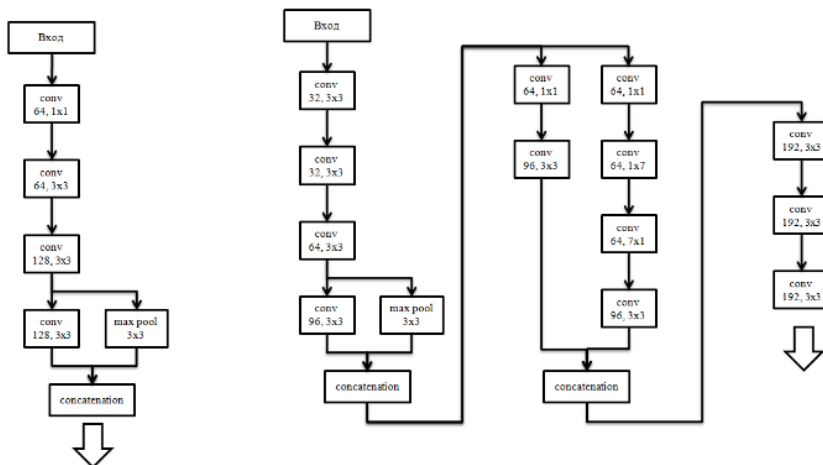


Рис. 2 Архитектура блока А (слева) и блока Б (справа).

Fig. 2. Architecture of Block A (left) and Block B (right)

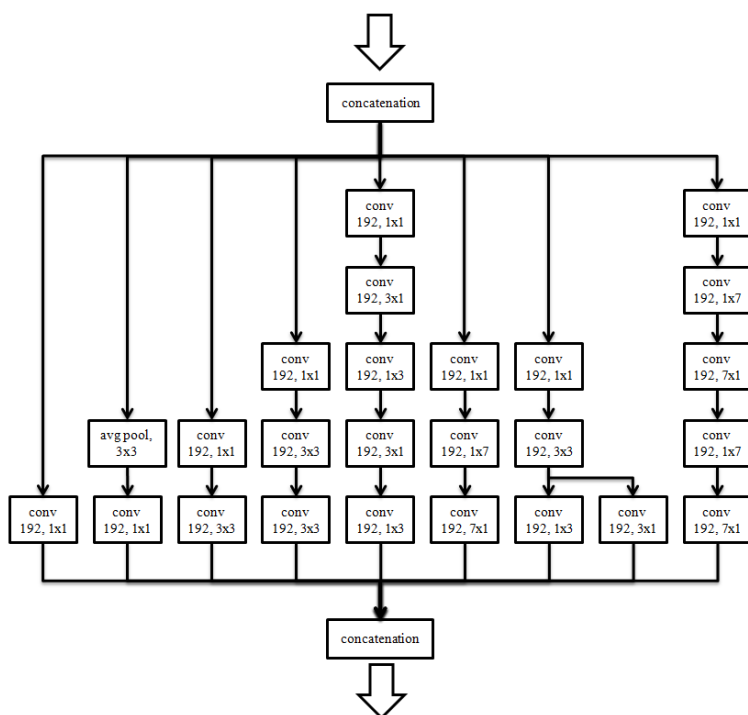


Рис. 3 Архитектура блока В.

Fig. 3. Architecture of Block B

Архитектура ИНС, используемая в данной работе, является комбинацией архитектур *InceptionNet* и *EfficientNet*. Использование различных сверточных фильтров позволяет извлекать разнообразные признаки из входных изображений. Применение сверточных слоев с размером фильтра 1×1 уменьшает количество каналов входного тензора, сохраняя пространственные размеры. Это снижает вычислительную сложность последующих операций, таких как свертки с большими фильтрами (3×3 , 1×7 и 7×1).

4. Обучение искусственной нейронной сети

Общая схема обучения представлена на рис. 4. Обучение проводилось с помощью алгоритма градиентного спуска. В качестве функции ошибки L использовалось среднеквадратичное отклонение АФР Z' на выходе ИНС и оптимального АФР Z^* , рассчитываемое для одного набора данных обучающей выборки размером M по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^M \left[\frac{(Re(Z^*) - Re(Z'))^2}{M} + \frac{(Im(Z^*) - Im(Z'))^2}{M} \right]. \quad (10)$$

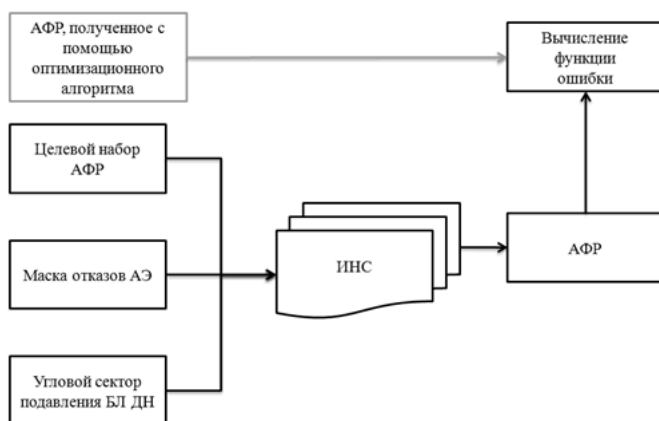


Рис. 4. Схема обучения ИНС.

Fig. 4. Diagram of the artificial neural network training process

Размер полученной выборки составил 126 000 наборов данных. Каждый такой набор состоит из целевого АФР, оптимального АФР, маски отказов АЭ и углового сектора подавления БЛ ДН. Полученная выборка делится на обучающую, валидационную и тестовую состоящие из 120 000, 5 000 и 1 000 наборов данных соответственно. Обучение продолжалось до момента, когда ее качество на валидационной выборке перестало улуч-

шаться. Для контроля процесса использовалась стратегия ранней остановки: если в течение десяти последовательных эпох функция потерь не уменьшалась, то обучение завершалось. Такой подход позволил избежать переобучения и обеспечить оптимальное соотношение между точностью модели и ее способностью обобщать новые данные. Финальная версия сети была выбрана на той эпохе, где достигались наилучшие показатели на валидационной выборке.

5. Результаты применения ИНС

Анализ полученных результатов выполнялся следующим образом. Из тестовой выборки выбирался набор данных, в который входило целевое АФР, маска отказов АЭ, угловой сектор подавления БЛ ДН и оптимальное АФР. На вход обученной ИНС подавалось целевое АФР (рис. 5а), маска отказов АЭ (рис. 5б) и угловой сектор подавления БЛ ДН (рис. 5в).

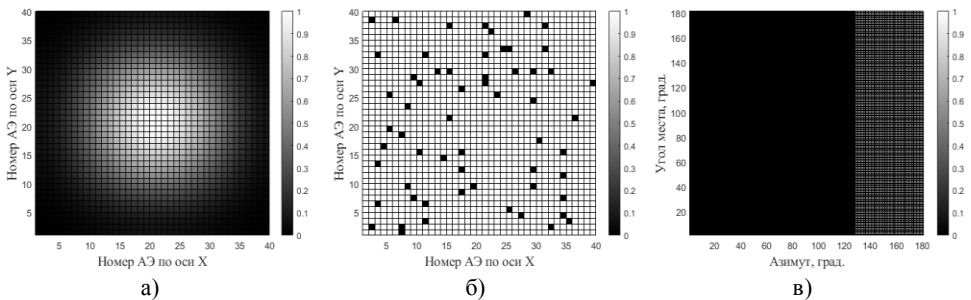


Рис. 5. Пример набора входных данных для ИНС: а) амплитудное распределение; б) маска отказов АЭ; в) угловой сектор подавления БЛ ДН.

Fig. 5. Example of an input dataset for the artificial neural network: а) amplitude distribution; б) antenna element failure mask; в) angular sector of sidelobe suppression

На рис. 6 изображены ДН для АФР полученного на выходе ИНС Z' и оптимального АФР Z^* .

Высокий уровень подавления БЛ в требуемой области с помощью оптимизационного алгоритма внутренней точки достигается за счет точных (вплоть до 8-го знака после запятой) значений амплитуд и фаз отдельных АЭ. В ЦАР точность задания параметров ограничивается разрядностью цифровых устройств управления: если разрядность составляет 6 бит, то амплитуда и фаза могут принимать только 2^6 значений. Это приводит к квантованию сигналов и невозможности задания непрерывных значений амплитуд и фаз. Учитывая квантование АФР, получим ДН, изображенные на рис. 7 и 8.

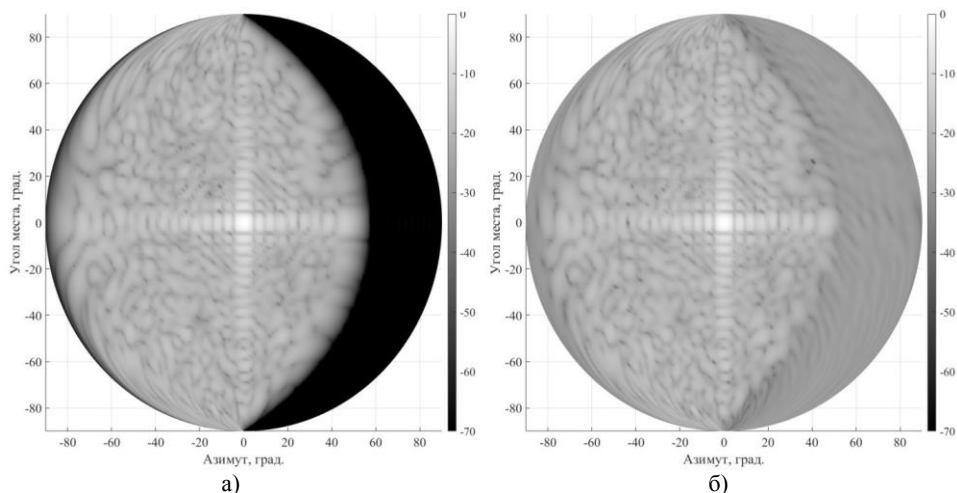


Рис. 6. Пример ДН, полученной с помощью оптимизационного алгоритма (а) и ИНС (б).

Fig. 6. Example of a Radiation Pattern obtained using an optimization algorithm (a) and an artificial neural network (b)

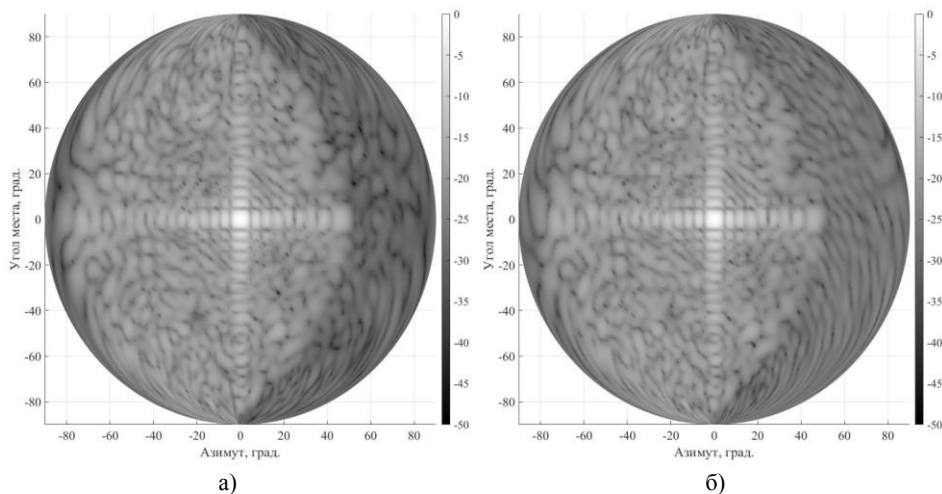


Рис. 7. Пример ДН, полученной с помощью оптимизационного алгоритма (а) и ИНС (б) с учетом квантования АФР.

Fig. 7. Example of a radiation pattern obtained using an optimization algorithm (a) and an artificial neural Network (b) considering amplitude-phase distribution quantization

Результат, полученный с помощью ИНС, незначительно уступает по уровню подавления БЛ в угловом секторе Ω_s оптимизационному алгоритму внутренней точки. Так, среднее значение УБЛ для оптимизационного

алгоритма составило $-31,1$ дБ, а для ИНС $-28,0$ дБ. Однако разработанный метод коррекции АФР с учетом отказов АЭ при помощи ИНС позволяет подавлять БЛ в угловом секторе Ω_s в масштабе реального времени. Результат обработки 1000 образцов из тестовой выборки приведен в таблице 1.

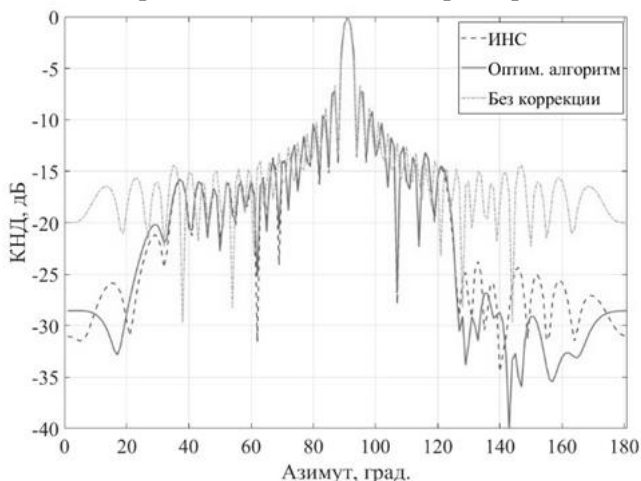


Рис. 8. Пример ДН в азимутальной плоскости с учетом квантования АФР: без коррекции (штрихпунктирная линия), полученная с помощью оптимизационного алгоритма (сплошная линия), полученная с помощью ИНС (штриховая линия).

Fig. 8. Example of a radiation pattern in the azimuthal plane considering amplitude-phase distribution quantization: uncorrected (dash-dotted line), obtained using an optimization algorithm (solid line), obtained using an artificial neural network (dashed line)

Таблица 1. Результаты обработки тестовой выборки ИНС

Table 1. Results of artificial neural network processing on the test set.

Метод коррекции АФР	Время обработки 1000 образцов тестовой выборки, с	Среднее время обработки 1 образца тестовой выборки, с
ИНС	410,26	0,41
алгоритм внутренней точки	19670,31	19,67

6. Заключение

Разработанный метод коррекции АФР АР с учетом отказов АЭ при подавлении боковых лепестков в заданном угловом секторе отличается от известных использованием ИНС архитектура, которое сочетает в себе решения *InceptionNet* и *EfficientNet*, позволяя эффективно извлекать признаки из входных данных. Обучающая выборка для ИНС сформирована при помощи оптимизационного алгоритма внутренней точки и позволяет снизить уровень БЛ в заданном угловом секторе до -70 дБ.

Проверка работоспособности показала, что обученная ИНС с учетом квантования уровней амплитуд и фаз позволяет снизить уровень БЛ ДН АР при отказах АЭ в среднем до $-28,0$ дБ, что незначительно уступает оптимизационному алгоритму внутренней точки с уровнем БЛ ДН АР: $-31,1$ дБ. Среднее время коррекции АФР для АР размером 40×40 АЭ составляет $0,41$ секунд для ИНС, что быстрее оптимизационного алгоритма внутренней точки в $47,9$ раз.

Список литературы

1. Yeo B. K., Lu Y. Array failure correction with a genetic algorithm // IEEE Trans. Antennas Propag. 1999. Vol. 47, no. 5. P. 823–828.
2. Boopalan N., Ramasamy A. K., Nagi F. A comparison of faulty antenna detection methodologies in planar array // Appl. Sci. 2023. Vol. 13. Art. 3695.
3. Findler N. V., Lo C., Lo R. Pattern search for optimization // Math. Comput. Simul. 1987. Vol. 29, no. 1. P. 41–50.
4. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA) : Lessons learned // Control and Cybernetics. 1996. Vol. 25, no. 1. P. 33–54.
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In : Proc. of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks (Perth, WA, Australia, November 27 –December 1, 1995). 1995. Vol. 4. P. 1942–1948.
6. Iye T., Susukida Y., Takaya S., Sugiura T., Fujii Y. A deep learning based antenna array calibration method using radiation power pattern. In : 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Kyoto, Japan, 2022). P. 1–5.
7. Cui C., Li W. T., Ye X. [et al.]. An effective artificial neural network-based method for linear array beam pattern synthesis // IEEE Trans. Antennas Propag. 2021. Vol. 69, no. 10. P. 6431–6443.
8. Tsai S., Wu M., Chen Y., Yan H., Chuang M. Pattern Compensation for Faulty Phased Array Antenna Based on Deep-Learning Technique // IEEE Open J. Antennas Propag. 2024. Vol. 6. P. 414–421.
9. Mallioras I., Yioultsis T. V., Kantarzi N. V., Lazaridis P. I., Zaharis Z. D. 3D Adaptive beam-forming approach with a fine-tuned deep neural network. In : 2023 12th International Conference on Modern Circuits and System Technologies (Athens, Greece, 28–30 June 2023). P. 1–4.

Информация об авторах

Тучков Андрей Александрович, инженер 2 категории, Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Горбатенко Николай Николаевич, кандидат технических наук, руководитель группы, Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Нестеров Вадим Юрьевич, инженер 1 категории, Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Углов Артем Сергеевич, инженер, Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Чиков Николай Иванович, кандидат технических наук, начальник сектора, Ростовский-на-Дону Научно-Исследовательский Институт Радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Artificial Neural Network for Correcting Amplitude-Phase Distribution of an Antenna Array with Faulty Antenna Elements

A. A. Tuchkov, N. N. Gorbatenko, V. Yu. Nesterov, A. S. Uglov,
and N. I. Chikov

Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication
130 Nansen St., Rostov-on-Don, Russian Federation
tuchkov4@yandex.ru

Received: April 25, 2025
Peer-reviewed: May 5, 2025
Accepted: May 5, 2025

Abstract: A method for correcting the amplitude-phase distribution of an antenna array using an artificial neural network (ANN) in the presence of faulty antenna elements is proposed. The described approach enables real-time correction of the amplitude-phase distribution while accounting for element failures and reduces sidelobe levels of the radiation pattern in specified angular sectors. The study details the methodology for forming the training dataset, the architecture of the ANN, the learning process, and the applied loss function. Experimental results confirm the effectiveness of ANN-based correction for maintaining radiation pattern quality despite element failures. The method not only suppresses sidelobes in targeted angular regions but also operates efficiently in real-time.

Keywords: phased antenna arrays, radiation pattern, amplitude-phase distribution, artificial neural network.

For citation (IEEE): A. A. Tuchkov, N. N. Gorbatenko, V. Y. Nesterov, A. S. Uglov, and N. I. Chikov, "Artificial Neural Network for Correcting Amplitude-Phase Distribution of an Antenna Array with Faulty Antenna Elements," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 418–431, 2025, doi: 10.21227/57mw-1x49. (In Russ.).

References

- [1] B. K. Yeo and Y. Lu, "Array failure correction with a genetic algorithm," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 5, pp. 823–828, 1999.
- [2] N. Boopalan, A. K. Ramasamy, and F. Nagi, "A comparison of faulty antenna detection methodologies in planar array," *Appl. Sci.*, vol. 13, art. 3695, 2023.
- [3] N. V. Findler, C. Lo, and R. Lo, "Pattern search for optimization," *Math. Comput. Simul.*, vol. 29, no. 1, pp. 41–50, 1987.
- [4] L. Ingber, "Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned," *Control and Cybernetics*, vol. 25, no. 1, pp. 33–54, 1996.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks* (Perth, WA, Australia, November 27 –December 1, 1995), vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.

- [6] T. Iye, Y. Susukida, S. Takaya, T. Sugiura, and Y. Fujii, "A deep learning based antenna array calibration method using radiation power pattern," in *2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (Kyoto, Japan), pp. 1–5, 2022.
- [7] C. Cui, W. T. Li, X. Ye, [et al.], "An effective artificial neural network-based method for linear array beam pattern synthesis," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 10, pp. 6431–6443, 2021.
- [8] S. Tsai, M. Wu, Y. Chen, H. Yan, and M. Chuang, "Pattern Compensation for Faulty Phased Array Antenna Based on Deep-Learning Technique," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 6, pp. 414–421, 2024.
- [9] I. Mallioras, T. V. Yioultsis, N. V. Kantarizis, P. I. Lazaridis, and Z. D. Zaharis, "3D Adaptive beamforming approach with a fine-tuned deep neural network," in *2023 12th International Conference on Modern Circuits and System Technologies* (Athens, Greece, June 28–30, 2023), pp. 1–4, 2023.

Information about the authors

Andrey A. Tuchkov, Engineer, 2nd category, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Nikolay N. Gorbatenko, Ph.D. in Engineering, Group Leader, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Vadim Yu. Nesterov, Engineer, 1st category, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Artem S. Uglov, Engineer, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Nikolay I. Chikov, Ph.D. in Engineering, Head of Sector, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, Russian Federation.

УДК 535.417.2, 621.372.5, 621.372.22

Разработка микрополоскового резонатора аддитивными методами SLA-печати и экструзии паст

¹Присекин Р. В., ^{1,2}Доценко О. А., ¹Ткачёв Д. А., ²Артищев С. А.,
²Труфанова Н. С., ¹Верхошанский Я. Ю., ¹Темиргалиев А. И.

¹*Томский государственный университет
пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Российская Федерация*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050, Российская Федерация
roman.prisekin2000@mail.ru*

Получено: 5 мая 2025 г.

Отрецензировано: 12 мая 2025 г.

Принято к публикации: 12 мая 2025 г.

Аннотация: *Представлена разработка новой резонансной микрополосковой структуры (МПС), основанная на совместимости различных методов 3D-печати: стереолитографической печати керамических подложек и экструзии проводящих паст. Проведенные измерения добротности изготовленной МПС показывают ее эффективность в сравнении с аналогичными разработками. Работа подчеркивает значимость и перспективы использования методов 3D-печати в изготовлении МПС для СВЧ-тракта. Применение данных технологий позволяет в короткие сроки изготовить прототип устройства и провести его предварительные испытания.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, матрица рассеяния, микрополосковый резонатор, добротность, удельная проводимость, керамика, проводящие пасты.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Разработка микрополоскового резонатора аддитивными методами SLA-печати и экструзии паст / Р. В. Присекин [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 432—442.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Разработка микрополоскового резонатора аддитивными методами SLA-печати и экструзии паст / Р. В. Присекин, О. А. Доценко, Д. А. Ткачёв [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 432—442.

1. Введение

За последние десятилетия аддитивное производство (или 3D-печать) активно развивается благодаря своей способности быстро создавать прототипы и обеспечивать выпуск относительно недорогой продукции. Каждый год на рынок выходят новые материалы для 3D-печати, что способствует расширению применения данной технологии. Опубликовано много статей, посвященных разработкам компонентной базы СВЧ-техники, в частности, объемных [1] и полосковых [2—4] волноводных систем. Компоненты, которые ранее требовали длительного срока изготовления, теперь могут быть изготовлены всего за несколько дней или даже часов.

Недавние исследования также подчеркивают важность использования аддитивного производства для создания гибких и многофункциональных электронных компонентов. Например, работа [5] демонстрирует, как 3D-печать может быть использована для создания микрополосковых антенн, которые обладают улучшенными характеристиками по сравнению с традиционными методами производства. В другом исследовании [6] рассматриваются преимущества использования проводящих филаментов для создания микросистем.

В диссертации [7] исследуются возможности применения аддитивной принтерной технологии для создания компонентов и СВЧ-устройств. Автором рассматриваются различные аспекты аддитивного производства, включая выбор материалов, проектирование и изготовление компонентов, а также их тестирование и сертификацию. Диссертация представляет собой ценный вклад в область СВЧ-техники, демонстрируя потенциал аддитивного производства для создания сложных и эффективных устройств.

Таким образом, использование аддитивного производства в сочетании с новыми материалами и методами может значительно улучшить производственные процессы в области СВЧ-техники, позволяя создавать более сложные и эффективные устройства.

В данной работе описана простая резонансная структура, представляющая собой микрополосковый резонатор, созданный по технологии стереолитографической печати керамики и экструзии проводящих паст. Показана возможность изготовления СВЧ-устройств с использованием данных технологий.

2. Стереолитографическая печать (SLA-печать) керамических подложек

Для изготовления диэлектрической подложки микрополоскового резонатора использовался керамический порошок на основе порошковой шихты, представляющей собой смесь $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и комплекса стеклообразу-

ющих добавок. Наиболее распространенные промышленно-выпускаемые шихты представляют собой составы на основе 90—97 масс. % α - Al_2O_3 с добавлением системы SiO_2 - MgO - CaO . Формирование алюмомagneзиальной шпинели MgAl_2O_4 обеспечивает снижение роста зерн корунда, что положительно сказывается на физико-механических свойствах керамики. Состав используемого керамического порошка марки «ВК-95-1» приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав керамического порошка.

Table 1. Composition of ceramic powder

Содержание компонента, масс. %			
Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO
95,3	3,3	0,2	1,2

Перед смешиванием с УФ-отверждаемой смолой для исключения агломерации частиц и повышения их смачиваемости фотополимеризуемым связующим проводилось уменьшение вязкости суспензии. Для этого осуществлялось модифицирование поверхности порошков путем добавления диспергирующей добавки (*ВУК-111*, *Disperbyk*) в количестве 3 % от массы порошка. Добавка вводилась в среде спирта с последующим перемешиванием в планетарной мельнице в течение 15 минут при частоте вращения 14 Гц с мелющими телами из ZrO_2 в соотношении 3:1 от массы порошка для равномерного распределения диспергирующей добавки. После перемешивания порошок высушивался до постоянной массы при 80 °С в течение 24 часов и затем протирался через сито с номинальным размером ячейки 0,1 мм. Насыпная плотность (ρ_n) и удельная поверхность ($S_{уд}$) исходного и модифицированного порошков марки «ВК-95-1» приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение исходного и модифицированного порошков.

Table 2. Comparison of the original and modified powders

Материал	ρ_n , г/см ³	$S_{уд}$, м ² /г
ВК-95-1	0,69	1,67
ВК-95-1 (модифицированный)	0,54	1,21

Снижение удельной поверхности порошка, которое, возможно, обеспечивается за счет гранулирования отдельных частиц в процессе модификации, обеспечивает возможность снижения требуемого количества связующего для получения суспензии с приемлемой для 3D-печати вязкостью.

В качестве связующего был выбран состав на основе следующих компонентов: 25 масс. % диметакрилового олигоэфира, 25 масс. % диметакрилового олигогликоля, 24 масс. % метакрилового (фенил) эфирного мономера, 24 масс. % олигоуретан диметакрилат, 2 масс. % фотоинициатора радикальной полимеризации 2,2-диметокси 2-фенил ацетофенона

(коммерческое название *Irgacur 651*). Использование данной композиции в качестве исходной фотополимерной смолы позволяет получать трехмерные изделия по технологии стереолитографической 3D-печати с использованием источника света с длиной волны 390—410 нм.

Полученная после перемешивания с использованием верхнеприводной мешалки суспензия подвергалась дополнительной обработке ультразвуком с частотой 40 кГц в течение 15 минут с последующим вакуумированием в течение 2 часов. Параметры 3D-печати приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры стереолитографической 3D-печати.

Table 3. Stereolithographic 3D-printing parameters

Мощность УФ-излучения, мВт/см ²	Высота слоя, мкм	Время воздействия УФ-излучения для базовых/ последующих слоев, с	Пауза перед воздействием УФ-излучения, с
4,6	70	60/20	10

Далее напечатанные образцы очищались от излишков керамической суспензии и подвергались термической обработке для удаления связующего и спекания керамического порошка. Температурный профиль спекания образцов представлен на рисунке 1 (а).

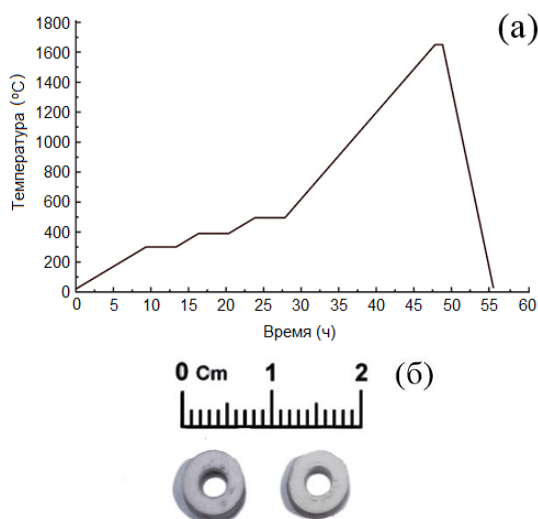


Рис. 1. а) Профиль спекания керамических образцов;
 б) Напечатанные тороидальные керамические образцы.

Fig. 1. a) Sintering profile of ceramic samples; b) Printed toroidal ceramic samples

Были получены тороидальные образцы керамики, геометрические размеры которых приведены в таблице 4. Фотография полученных образ-

цов приведена на рисунке 1 (б). Данные образцы использовались для исследования электрофизических характеристик.

Таблица 4. Размеры образцов печатной керамики.

Table 4. Dimensions of printed ceramic samples

Номер образца	Толщина, мм	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм
1	2,09	6,9	3
2	2,65	6,9	3

Выбранные размеры керамических образцов обусловлены особенностями измерительной установки, в частности, используемого измерительного коаксиального резонатора. Методология измерений подробно описана в работе [8].

Рассчитанные из измеренных S -параметров спектры действительной части диэлектрической проницаемости материала в диапазоне от $10 \cdot 10^3$ Гц до $12 \cdot 10^9$ Гц приведены на рисунке 2 (а), $\text{tg}(\delta) = \varepsilon''/\varepsilon'$ — на рисунке 2 (б).

Из рис. 2 следует, что электрофизические характеристики изготовленных материалов подложки на частоте 3 ГГц: $\varepsilon' = 6,25$ отн.ед., $\text{tg}\delta_\varepsilon = 6 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. Сравнение полученных результатов с характеристиками материалов, изготавливаемых на научно-промышленных предприятиях по стандартной твердотельной технологии: $\varepsilon' = 10,3$ отн.ед., $\text{tg}\delta_\varepsilon = 0,15 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. [9, 10] показало, что диэлектрическая проницаемость материала меньше в 1,6 раза, а $\text{tg}\delta_\varepsilon$ — больше в 4 раза. Разница в значениях определяется, по всей видимости, пористостью, появляющейся в керамике из-за отжига связующего. Для приближения к параметрам промышленной керамики требуется усовершенствовать технологию изготовления подложек.

3. Экспериментальная реализация микрополоскового резонатора

На рисунке 3 (а) приведена фотография микрополоскового резонатора, изготовленного по технологии стереолитографической 3D-печати керамики и экструзии проводящих паст. Геометрические размеры резонатора: длина $l = 36$ мм; ширина проводящей линии $W = 2$ мм; высота диэлектрического слоя $H = 1,35$ мм. Параметры были подобраны таким образом, чтобы резонансная частота $f_{\text{рез}}$ находилась в диапазоне от 3 до 4 ГГц. Выбранный диапазон обусловлен тем, что: 1) для подключения к измерительной установке использовался SMA-разъем, который имеет КСВ < 2 в частотном диапазоне до 6 ГГц; 2) для измерений использовался скалярный анализатор цепей МИКРАН Р2-М, рабочий диапазон частот которого от 10 кГц до 4 ГГц.

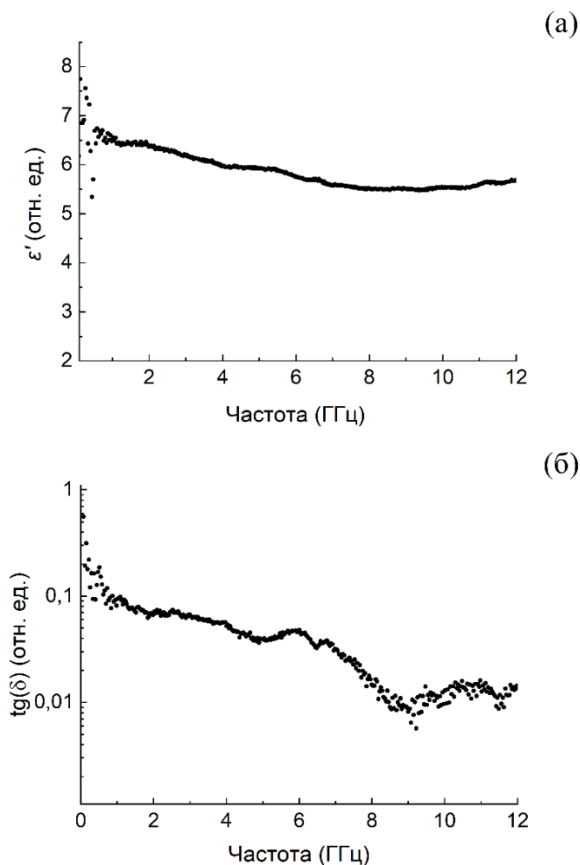


Рис. 2. а) Спектры действительной части диэлектрической проницаемости образцов;
 б) Тангенс угла диэлектрических потерь образцов.

Fig. 2. а) Spectra of the real part of the dielectric permittivity of samples;
 б) Dielectric loss tangent of samples

Входной импеданс изготовленного резонатора составил 50 Ом, что позволило минимизировать дополнительные отражения электромагнитных волн, образующихся на концах коаксиального кабеля и резонатора.

Подключение к изготовленному прототипу осуществлялось путем припаивания к коаксиальным выводам SMA-разъема проводящих полосок из меди так, чтобы при взаимодействии с образцом они образовывали планарные конденсаторы (емкостная связь). Измерения проводились на слабой связи для лучшего определения собственных параметров прототипа. Были измерены параметры матрицы рассеяния (рисунок 3 (б)). Резонансная частота полученной модели резонатора равна 3,377 ГГц.

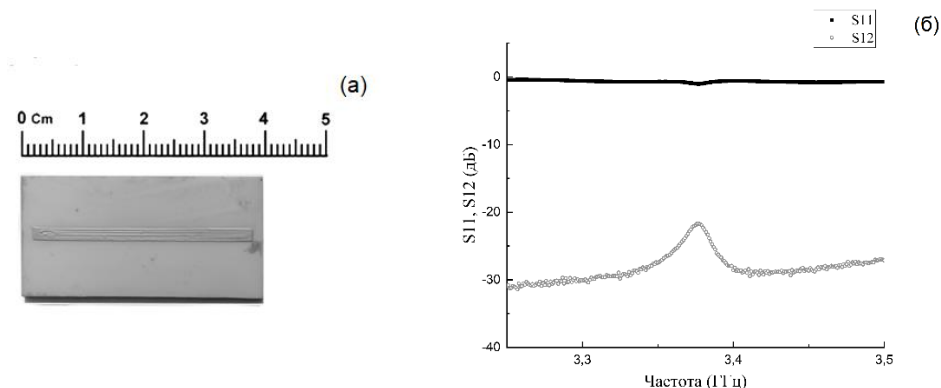


Рис. 3. а) Фотография микрополоскового резонатора;
б) Амплитудно-частотная характеристика.

Fig. 3. а) Photograph of a microstrip resonator;
б) Frequency-amplitude characteristic of this resonator

Измеренное значение добротности изготовленного прототипа составило $Q \approx 161$. В работах [11, 12] представлены различные конфигурации микрополосковых резонаторов и фильтров на их основе; показано, что собственная добротность Q разработанных СВЧ-устройств находится в интервале 100—500, с учетом использования керамических подложек с более высокой диэлектрической проницаемостью таких, как ТБНС ($\epsilon' \approx 80$ отн. ед.), что, в отличие от используемой печатной керамики, позволяет изготавливать более миниатюрные и высокодобротные резонаторы.

4. Заключение

В работе представлена резонансная структура, изготовленная при использовании технологий стереолитографической печати керамических изделий и экструзии проводящих паст. Эту структуру можно использовать как составную часть волноводного тракта. При улучшении технологии подобные структуры могут использоваться при проведении радиоизмерений резонаторным методом.

Проведенные измерения демонстрируют, что предложенная резонансная структура обладает высокой стабильностью и эффективностью при работе на заданных частотах.

Полученные результаты важны для последующего совершенствования конструкции резонатора и применения в разработке и изготовлении различных СВЧ-устройств. Дальнейшее развитие данной темы требует усовершен-

ствования технологий 3D-печати керамики и нанесения токопроводящих дорожек. Внесение изменений в конструкцию/топологию представленного резонатора позволит получить классические микрополосковые лестничные фильтры, а также расширить применение известных устройств.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0010.

Список литературы

1. Харалгин С. В., Куликов Г. В., Котельников А. Б., Снастин М. В., Добычина Е. М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати // Российский технологический журнал. 2019. №1. С. 80—102.
2. Татаренко А. С., Бичурин М. И., Филиппов А. В., Сринивасан Г. СВЧ фазовращатель на основе феррит-пьезоэлектрических композиционных материалов // Вестник Новгородского государственного университета. 2004. № 28. С. 156—158.
3. Roy S., Qureshi M. B., Asif S., Braaten B. D. A Model for 3D-Printed Microstrip Transmission Lines using Conductive Electrifi Filament. In : Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, USNC/URSI National Radio Science Meeting, Jul. 2017. P. 1099—1100.
4. Rice A., Kiourti A. Additively Manufactured Three-Dimensional Microstrip Balun for Wearable Applications // Electronics. 2025. Vol. 14, no. 4. Art. 432.
5. Pizarro F. [et al.]. Parametric Study of 3D Additive Printing Parameters Using Conductive Filaments on Microwave Topologies // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 106814—106823.
6. Jin P. [et al.]. Micro/nano additives in 3D printing concrete // Cement and Concrete Composites. 2025. Vol. 155. Art. 105799.
7. Труфанова Н. С. Компоненты и СВЧ-устройства, изготавливаемые на основе аддитивной принтерной технологии : дис. ... канд. техн. наук. 2.2.14. Томск, 2024. 159 с.
8. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Paraoanu G. S. Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009. Vol. 57, no. 9. P. 2257—2267.
9. ВК 94-1 (22ХС). [Электронный ресурс]. URL: <https://vpk-nn.ru/product/testovyyj-tovar-1> (дата обращения: 24.02.2025).
10. Изготовление радиотехнической керамики. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.toriy.ru/services/manufacturer-of-electronic-ceramics/> (дата обращения: 24.02.2025).
11. Захаров А. В. Добротность резонаторов из отрезков линий передачи, перестраиваемых конденсатором // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 5. С. 646—654.
12. Беляев Б. А. [и др.]. Новая конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 22. С. 52—60.

Информация об авторах

Присекин Роман Викторович, аспирант кафедры радиоэлектроники Радиофизического факультета Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Доценко Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Радиофизического факультета Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Ткачёв Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Артищев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры Радиоконструкторского факультета Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Труфанова Наталья Сергеевна, младший научный сотрудник лаборатории печатной электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Верхошанский Янис Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Темиргалиев Александр Игоревич, лаборант лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Development of a Microstrip Resonator Using Additive Methods of SLA Printing and Extrusion of Pastes

R. V. Prisekin¹, O. A. Dotsenko^{1,2}, D. A. Tkachev¹, S. A. Artishchev²,
N. S. Trufanova², Ya. Yu. Verkhoshansky¹, and A. I. Temirgaliev¹

¹Tomsk State University

36, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

roman.prisekin2000@mail.ru

Received: May 5, 2025

Peer-reviewed: May 12, 2025

Accepted: May 12, 2025

Abstract: *The development of a new resonant microstrip structure based on the compatibility of various 3D-printing methods: SLA printing of ceramic substrates and extrusion of conductive pastes is presented. The conducted measurements of the quality factor of the obtained structure show its efficiency in comparison with similar developments. The work emphasizes the importance and prospects of using the described 3D-printing methods in manufacturing of new microstrip structures for the microwave path. The application of these technologies allows manufacturing a prototype device and its preliminary testing in the short-term.*

Keywords: *additive technologies, scattering matrix, microstrip resonator, quality factor, specific conductivity, ceramics, conductive pastes.*

For citation (IEEE): R. V. Prisekin, O. A. Dotsenko, D. A. Tkachev, [et. al.], “Development of a Microstrip Resonator Using Additive Methods of SLA Printing and Extrusion of Pastes,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 432–442, 2025, doi: 10.21227/b7vk-db47. (In Russ.)

Acknowledgments

The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, project No. FSWM-2025-0010.

References

- [1] S. V. Kharalgin, G. V. Kulikov, A. B. Kotelnikov, M. V. Snastin, and E. M. Dobychina, “Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology,” *Russian Technological Journal*, vol. 1, pp. 80–102, 2019. (In Russ.).
- [2] A. S. Tatarenko, M. I. Bichurin, A. V. Filippov, and G. Srinivasan, “Microwave phase shifter based on ferrite-piezoelectric composite materials,” *Vestnik NovSU*, no. 28, pp. 156–158, 2004. (In Russ.).

- [3] S. Roy, M. B. Qureshi, S. Asif, and B. D. Braaten, "A Model for 3D-Printed Microstrip Transmission Lines using Conductive Electrifi Filament," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, USNC/URSI National Radio Science Meeting, Jul. 2017, pp. 1099–1100.
- [4] A. Rice and A. Kiourti, "Additively Manufactured Three-Dimensional Microstrip Balun for Wearable Applications," *Electronics*, vol. 14, art. 432, 2025.
- [5] F. Pizarro [et al.], "Parametric Study of 3D Additive Printing Parameters Using Conductive Filaments on Microwave Topologies," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106814–106823, 2019.
- [6] P. Jin [et al.], "Micro/nano additives in 3D printing concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 155, art. 105799, 2025.
- [7] N. S. Trufanova, *Components and microwave devices manufactured based on additive printing technology*, Ph.D. dissertation, Tomsk, 2024. (In Russ.).
- [8] K. Chalapat, K. Sarvala, J. Li, and G. S. Paraoanu, "Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 9, pp. 2257–2267, 2009.
- [9] BK 94-1 (22XC)", [Online]. Available: <https://vpk-nn.ru/product/testovyyj-tovar-1> (Accessed: Feb. 24, 2025). (In Russ.).
- [10] Manufacturing of radiotechnical ceramics, [Online]. Available: <https://toriy.ru/services/manufacturer-of-electronic-ceramics/> (Accessed: Feb. 24, 2025). (In Russ.).
- [11] A. B. Zakharov, "Quality of resonators made from segments of transmission lines, tunable by a capacitor," *Commun. Technol. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 603–610, 2011.
- [12] A new design of a miniature microstrip resonator with interdigital structure / B. A. Belyaev, A. M. Serzhantov, Y. F. Bal'va, [et al.], *Technical Physics Letters*, vol. 40, no. 11, pp. 1010–1013, 2014.

Information about the authors

Roman V. Prisekin, postgraduate student of the Department of Radio Electronics of the Faculty of Radiophysics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Olga A. Dotsenko, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Radio Electronics of the Faculty of Radiophysics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Dmitry A. Tkachev, junior researcher of the Laboratory of Metallurgy Nanotechnology, Research Laboratory of High-Energy and Special Materials of the Faculty of Physics and Engineering of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Sergey A. Artishchev, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Design of Units and Components of Radioelectronic Equipment of the Faculty of Radio Design of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation.

Natalia S. Trufanova, junior researcher, Laboratory of Printed Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation.

Yanis Yu. Verkhoshansky, junior researcher at the Laboratory of Nanotechnologies of Metallurgy, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Alexander I. Temirgaliev, laboratory assistant at the Laboratory of Nanotechnologies of Metallurgy, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Метод повышения частотной эффективности многоканальной системы передачи информации с частотным разделением абонентов

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

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
degtyaryov1966@yandex.ru

Получено: 14 мая 2025 г.

Отрецензировано: 20 мая 2025 г.

Принято к публикации: 20 мая 2025 г.

Аннотация: Предложенный метод повышения частотной эффективности многоканальной системы передачи информации за счет перекрытия частотных интервалов, выделенных для связи в соседних каналах, основан на определении веса ортогональности принимаемого канального символа с соседними канальными символами основного канала и канальными символами соседних каналов. Показано, что если соседние каналы связи характеризуются одинаковыми полосами пропускания и выделенные для них частотные интервалы перекрываются по частоте на половину полосы пропускания, то частотную эффективность многоканальной системы передачи информации можно повысить в 2 раза. Расчеты проводились для случая, когда канальные символы описываются функциями отсчетов, домноженными на гармоническое колебание несущей частоты. Вес ортогональности канальных символов для этого случая представляет собой сумму гармонических колебаний.

Ключевые слова: ортогонализация, ортогональность с весом, оптимальный приемник, коррелятор, межсимвольная интерференция, межканальные помехи, частотная эффективность, частотное разделение абонентов.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дегтярев А. Н., Афонин И. Л., Поляков А. Л. Метод повышения частотной эффективности многоканальной системы передачи информации с частотным разделением абонентов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 443—453.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дегтярев, А. Н. Метод повышения частотной эффективности многоканальной системы передачи информации с частотным разделением абонентов / А. Н. Дегтярев, И. Л. Афонин, А. Л. Поляков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 443—453.

1. Введение

Частотная эффективность систем передачи информации (СПИ) определяется как отношение скорости передачи информации R к полосе пропускания канала связи ΔF [1]

$$\gamma = R / \Delta F .$$

При частотном разделении абонентов для исключения межканальных помех вводятся защитные частотные интервалы шириной ΔF_3 , так, что

$$\Delta F = \sum_{i=1}^L (\Delta F_i + \Delta F_3) = \sum_{i=1}^L k_{fi} \Delta F_i ,$$

где ΔF_i — полоса пропускания i -го канала связи, L — число пар абонентов, $k_{fi} = (\Delta F_i + \Delta F_3) / \Delta F_i$ — коэффициент использования полосы пропускания канала связи, ΔF — полоса пропускания канала связи, выделенного для связи всех пар абонентов [1].

В случае, когда все каналы связи, выделенные для связи пар абонентов, одинаковы, $k_{fi} = k_{f3}$

$$\Delta F = k_{f3} L \Delta F_i .$$

В общем случае $k_{fi} \leq 1$, причем знак равенства соответствует идеальным каналам связи, выделенным для связи пар абонентов с прямоугольными АЧХ и нулевыми защитными интервалами.

Для повышения частотной эффективности многоканальной СПИ необходимо снижать ширину защитных частотных интервалов между соседними каналами связи и повышать отношение сигнал/шум, от которого зависит скорость передачи информации.

В работе [2] для одновременного подавления межсимвольной интерференции и межканальных помех использовалась ортогонализация принятого канального символа с соседними канальными символами в основном и соседних каналах. Ортогонализация проводилась путем определения веса ортогональности. При этом считалось, что между соседними каналами защитный частотный интервал равен нулю ($\Delta F_3 = 0$). Расчет показал, что вероятность ошибки при приеме сигналов ФМ-2 предложенным методом существенно меньше вероятности ошибки при классическом методе приема для одинаковых отношений сигнал/шум в основном канале связи.

Целесообразно рассмотреть вопрос о том, насколько можно уменьшить защитный частотный интервал для повышения частотной эффективности многоканальной СПИ. Т. е. рассмотреть вопрос о возможности перекрытия частотных интервалов, выделенных для связи в соседних каналах связи.

2. Алгоритм работы демодулятора

Рассмотрим структурную схему демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия (см. рис. 1).

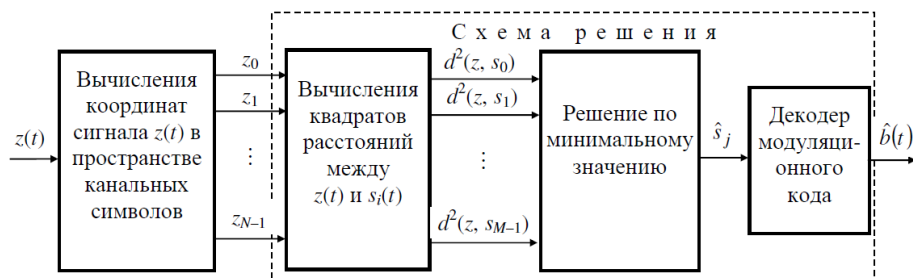


Рис. 1. Структурная схема демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия.

Fig. 1. Block diagram of a demodulator optimal according to the criterion of maximum likelihood

Демодулятор работает на основании следующего алгоритма.

1. Определение координат сигнала $z(t)$ в пространстве ортогональных функций $\{\varphi_n(t)\}$.
2. Определение квадратов расстояний между сигналом $z(t)$ и канальными символами $s_{ik}(t)$ в N -мерном пространстве функций $\{\varphi_n(t)\}$.
3. Сравнение квадратов расстояний, определение номера i , которому соответствует минимальное значение квадрата расстояния $d^2(z(t), s_{ik}(t))$ между $z(t)$ и канальными символами $s_{ik}(t)$, выдача решения о переданном канальном символе $\hat{s}_{ik}(t)$.
4. Представление канального символа $s_{ik}(t)$ битами согласно модуляционному коду.

Каждый j -й коррелятор или согласованный фильтр по окончании интервала времени наблюдения входной смеси вырабатывает отсчетное значение полезного выходного сигнала, пропорциональное правой части условий

$$\int_{T_z} \varphi_i(t) \varphi_j(t) \rho_\varphi(t) dt = \begin{cases} \text{const} \neq 0, & j = i, \\ 0, & j \neq i, \end{cases}$$

где $\rho_\varphi(t)$ — вес ортогональности функций $\varphi_n(t)$, в классическом случае считается, что $\rho_\varphi(t) = 1$.

Заметим, что опорным сигналом каждого j -го коррелятора является сигнал $y_j(t) = \varphi_j(t) \rho_\varphi(t)$. Так, для коррелятора, согласованного с сигналом в

виде функции $\varphi_0(t)$, опорным сигналом является $y_0(t) = \varphi_0(t)\rho_\varphi(t)$. При этом возможные отсчетные значения выходного сигнала коррелятора записываются в виде

$$\int_{T_z} \varphi_0(t)\varphi_j(t)\rho_\varphi(t)dt = \begin{cases} \text{const} \neq 0, & j = 0, \\ 0, & j \neq 0. \end{cases}$$

Т. е. свойство полноты для системы функций $\{\varphi_n(t)\}$ не требуется. Тогда можно считать, что в каждом корреляторе используется свой вес ортогональности $\rho_{\varphi j}(t)$, обеспечивающий выполнение условий

$$\int_{T_z} \varphi_i(t)\varphi_j(t)\rho_{\varphi j}(t)dt = \begin{cases} \text{const} \neq 0, & j = i, \\ 0, & j \neq i. \end{cases}$$

В этом случае опорный сигнал каждого j -го коррелятора будет иметь вид

$$y_j(t) = \varphi_j(t)\rho_{\varphi j}(t).$$

При поэлементном приеме каналные символы $s_j(t)$ выбираются так, чтобы снизить уровень межсимвольной интерференции (МСИ) и межканальных помех (МКП). Поэтому целесообразно чтобы $s_j(t) = \varphi_j(t)$.

3. Метод повышения частотной эффективности

Будем рассматривать идеальные каналы связи.

Пусть соседние каналы связи характеризуются одинаковыми полосами пропускания $\Delta\omega = 2\omega_m$, где ω_m — верхняя граничная частота в спектре низкочастотного сигнала. Сместим соседние каналы по частоте так, чтобы они перекрывались по частоте на величину ω_m (см. рис. 2). Будем считать, что фильтр основной селекции приемника характеризуется полосой пропускания $\Delta\omega_{\text{ПЧ}} = 4\omega_m$.

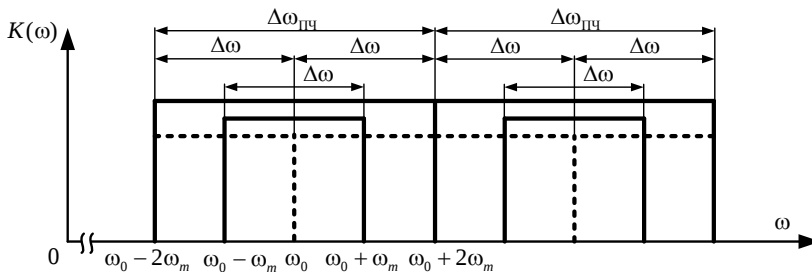


Рис. 2. Частотный план каналов связи.

Fig. 2. Frequency plan of communication channels

По основному каналу связи передаются сигналы, сформированные из элементарных сигналов вида

$$s_{0n}(t) = \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{\omega_m t - \pi n} \cos \omega_0 \left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right),$$

где ω_0 — частота несущего колебания.

По соседним каналам связи передаются соответственно сигналы, сформированные из элементарных сигналов вида

$$s_{1n}(t) = \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{\omega_m t - \pi n} \cos[(\omega_0 + \omega_m)\left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right)],$$

$$s_{2n}(t) = \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{\omega_m t - \pi n} \cos[(\omega_0 - \omega_m)\left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right)].$$

Условия, при которых сигналы соседних каналов не влияют на правильный прием сигналов основного канала, записываются как

$$\begin{cases} B_{K2p}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \cos \omega_0 t \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} \cos \omega_0 \left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right) p_{s0}(t) dt = \begin{cases} A, n = 0, \\ 0, n \neq 0, \end{cases} \\ B_{K12p}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \cos \omega_0 t \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} \cos[(\omega_0 + \omega_m)\left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right)] p_{s0}(t) dt = 0, \\ B_{K32p}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \cos \omega_0 t \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} \cos[(\omega_0 - \omega_m)\left(t - \frac{\pi n}{\omega_m}\right)] p_{s0}(t) dt = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Определим вес $p_{s0}(t)$, для которого существуют равенства (1).

Будем считать, что в основном и соседних каналах работают узкополосные системы связи, т. е. величина $k = \omega_0 / \omega_m$ много больше единицы. Для простоты примем, что k является целым числом. Система уравнений (1) после преобразований приводится к виду

$$\begin{cases} B_{K2p}(n) = \frac{\cos kn\pi}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} [\cos 2\omega_0 t + 1] p_{s0}(t) dt = \begin{cases} A, n = 0, \\ 0, n \neq 0, \end{cases} \\ B_{K12p}(n) = \frac{\cos[(k+1)n\pi]}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} \times \\ \times [\cos(2\omega_0 + \omega_m)t + \cos \omega_m t] p_{s0}(t) dt = 0, \\ B_{K32p}(n) = \frac{\cos[(k-1)n\pi]}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_m t}{\omega_m t} \frac{\sin(\omega_m t - \pi n)}{(\omega_m t - \pi n)} \times \\ \times [\cos(2\omega_0 - \omega_m)t + \cos \omega_m t] p_{s0}(t) dt = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Вес $\rho_{s0}(t)$, удовлетворяющий этим условиям, будем искать в виде

$$\rho_{s0}(t) = \lambda_0 + \lambda_1 \cos \omega_m t + \lambda_2 \cos 2\omega_m t. \quad (3)$$

Подстановка выражения (3) в условия (2) и интегрирование дает

$$\begin{cases} B_{K2p}(n) = \frac{\cos kn\pi}{2} \frac{\sin \pi n}{\omega_m n} \left(\lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 \right) = \begin{cases} A, n=0, \\ 0, n \neq 0, \end{cases} \\ B_{K12p}(n) = \frac{\cos[(k+1)n\pi]}{2} \frac{\sin \pi n}{\omega_m n} \left(\frac{1}{2} \lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 + \frac{1}{4} \lambda_2 \right) = 0, \\ B_{K32p}(n) = \frac{\cos[(k-1)n\pi]}{2} \frac{\sin \pi n}{\omega_m n} \left(\frac{1}{2} \lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 + \frac{1}{4} \lambda_2 \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Второе и третье равенства системы (4) являются линейно зависимыми, следовательно, в дальнейшем одно из уравнений, которые составлены для соседних каналов связи, можно не рассматривать.

Равенства системы (4) будут выполняться, если

$$\begin{cases} \lambda_0 + \frac{1}{2} \lambda_1 = A, \\ \lambda_0 + \lambda_1 + \frac{1}{2} \lambda_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) имеет бесконечно большое число решений. Одно из этих решений имеет вид

$$\lambda_0 = 2A, \lambda_2 = 0, \lambda_1 = -2A.$$

Таким образом, в частотной полосе шириной $\Delta\omega_{\text{ПЧ}} = 4\omega_m$ можно передать сигналы трех абонентов.

Предлагаемый подход позволяет превзойти частотную эффективность многоканальной системы передачи информации в $3/2 = 1,5$ раза.

Дальнейшее уплотнение каналов связи, предназначенных для передачи информации различными абонентами, возможно за счет аналогичного смещения по частоте каналов других абонентов, что позволит повысить частотную эффективность многоканальной системы передачи информации в пределе в 2 раза.

Вес ортогональности в этом случае принимает вид

$$\rho_{s0}(t) = \sum_{m=0}^M \lambda_n \cos m\omega_m t, \quad (6)$$

где максимальное число слагаемых M ограничено отношением

$$M \leq \omega_0 / \omega_m.$$

Коэффициенты веса определяются из системы уравнений

4. Выводы и направление дальнейших исследований

Предложенный метод повышения частотной эффективности многоканальной системы передачи информации за счет перекрытия частотных интервалов, выделенных для связи в соседних каналах, основан на определении веса ортогональности принимаемого канального символа с соседними канальными символами основного канала и канальными символами соседних каналов.

Показано, что если соседние каналы связи характеризуются одинаковыми полосами пропускания и выделенные для них частотные интервалы перекрываются по частоте на половину полосы пропускания, то частотную эффективность многоканальной системы передачи информации можно повысить в 2 раза. Расчеты проводились для случая, когда канальные символы описываются функциями отсчетов, домноженными на гармоническое колебание несущей частоты. Вес ортогональности канальных символов для этого случая представляет собой сумму гармонических колебаний.

При дальнейших исследованиях необходимо определить помехоустойчивость СПИ одного канала, входящей в такую многоканальную систему передачи информации. Расчет помехоустойчивости этой СПИ целесообразно проводить для приемника в виде коррелятора. Необходимо исследовать помехоустойчивость коррелятора для двух вариантов опорного сигнала: непрерывного и дискретного. Кроме того, необходимо исследовать вопрос о возможности использования предлагаемого метода при передаче двумерных сигналов.

Список литературы

1. Зюко А. Г. Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В. Теория электрической связи. М. : Радио и связь, 1999. 432 с.
2. Дегтярев А. Н., Афонин И. Л., Поляков А. Л. Прием одномерных полосовых сигналов в условиях действия межсимвольной интерференции и межканальных помех // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2025. Т. 17, № 1. С. 83—92.

Информация об авторах

Дегтярев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Афонин Игорь Леонидович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Поляков Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радио-электроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

The Method for Increasing the Frequency Efficiency of a Multichannel Information Transmission System with Frequency Division of Subscribers

A. N. Degtyaryov, I. L. Afonin, and A. L. Polyakov

Sevastopol State University

33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
andegtyarev@mail.sevsu.ru

Received: May 14, 2025

Peer-reviewed: May 20, 2025

Accepted: May 20, 2025

Abstract: The proposed method of increasing the frequency efficiency of a multichannel information transmission system by overlapping the frequency intervals allocated for communication in neighboring channels is based on determining the orthogonal weight of the received channel symbol with neighboring channel symbols of the main channel and channel symbols of neighboring channels. It is shown that if neighboring communication channels are characterized by the same bandwidth and the frequency intervals allocated to them overlap in frequency by half the bandwidth, then the frequency efficiency of a multichannel information transmission system can be increased by 2 times. The calculations were performed for the case when the channel symbols are described by the functions of samples multiplied by the harmonic oscillation of the carrier frequency. The weight of the orthogonality of the channel symbols for this case is the sum of the harmonic oscillations.

Keywords: orthogonalization, weighted orthogonality, optimal receiver, correlator, intersymbol interference, interchannel interference, frequency efficiency, frequency division of subscribers.

For citation (IEEE): A. N. Degtyaryov, I. L. Afonin, and A. L. Polyakov, "The Method for Increasing the Frequency Efficiency of a Multichannel Information Transmission System with Frequency Division of Subscribers," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 443–453, 2025, doi: 10.21227/1vy2-5r71. (In Russ.).

References

- [1] A. G. Zyuko, [et al.], *Noise immunity and efficiency of information transmission systems*, Moscow : Radio i svyaz' Publ., 1985. (In Russ.).
- [2] A. N. Degtyarev, I. L. Afonin, and A. L. Polyakov. "Reception of one-dimensional bandpass signals under conditions of intersymbol interference and interchannel interference," *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, vol 17, no. 1, pp. 83–92e, 2025.

Information about the authors

Andrey N. Degtyarev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Smart Technical Systems of Sebastopol State University, Sebastopol, Russian Federation.

Igor L. Afonin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Smart Technical Systems of Sebastopol State University, Sebastopol, Russian Federation.

Aleksandr L. Polyakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Smart Technical Systems of Sebastopol State University, Sebastopol, Russian Federation.

Научно-практическая деятельность в филиале Национального исследовательского центра телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева в г. Севастополе (ИЦ «Омега») при создании и развитии новых компетенций (к 10-летию филиала)

^{1,2}Проценко М. Б., ^{1,2}Громоздин В. В.

¹Филиал НИЦ Телеком в г. Севастополе (ИЦ «Омега»)

ул. Вакуленчука, д. 29, Севастополь, 299053, Российская Федерация
procenkomb@nic-t.ru, gromozdinvv@nic-t.ru

²Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

Получено: 12 мая 2025 г.

Отрецензировано: 19 мая 2025 г.

Принято к публикации: 19 мая 2025 г.

Аннотация: В статье кратко описаны освоенные в филиале НИЦ Телеком в г. Севастополе (ИЦ «Омега») уникальные компетенции, такие как сертификационные испытания устройств/систем автоматизированной информационной системы ЭРА-ГЛОНАСС, аппаратуры спутниковой навигации, испытания на одобрения типа аварийных радиобуев международной спутниковой системы КОСПАС-САРСАТ, натурные испытания береговых радиотехнических объектов систем управления движения судов (СУДС), глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ) и международной автоматизированной системы оповещения (НАВТЕКС). Основу данных компетенций составляют созданные в ИЦ «Омега» и приобретенные новые средства измерений, испытательное и вспомогательное оборудование, разработанные и освоенные методики испытаний. Отдельно отмечены уже решенные, решаемые в настоящее время и планируемые к решению научно-практические задачи в рамках создания и развития данных компетенций.

Ключевые слова: сертификационные испытания; испытания на одобрения типа; натурные испытания; ЭРА-ГЛОНАСС; аварийный радиобуй КОСПАС-САРСАТ; СУДС, ГМССБ, НАВТЕКС.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Проценко М. Б., Громоздин В. В. Научно-практическая деятельность в филиале Национального исследовательского центра телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева в г. Севастополе (ИЦ «Омега») при создании и развитии новых компетенций (к 10-летию филиала) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 454—473.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Проценко, М. Б. Научно-практическая деятельность в филиале Национального исследовательского центра телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева в г. Севастополе (ИЦ «Омега») при создании и развитии новых компетенций (к 10-летию филиала) / М. Б. Проценко, В. В. Громоздин // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 454—473.

1. Введение

Создание актуальных и своевременных компетенций применительно к испытаниям новой высокотехнологичной продукции на подтверждение соответствия ее параметров и характеристик определенным требованиям является достаточно сложной задачей, как в научно-техническом, так и в организационно-экономическом аспектах. Создание таких компетенций влечет за собой оснащение испытательного центра (лаборатории) новыми средствами измерений, новым испытательным и вспомогательным оборудованием, освоение данного оборудования, выстраивание уникальных технологических процессов, обучение персонала и многое другое, что неразрывно связано с научно-практической деятельностью. Отдельной задачей при этом является поддержание данных компетенций на соответствующем уровне, их развитие, в первую очередь, для обеспечения конкурентоспособности, что также требует особого научно-практического подхода.

При этом организация самой научно-практической деятельности на предприятии представляет собой также сложный многогранный процесс, который требует сочетания волевых качеств соответствующих руководителей, исследовательских и практических навыков исполнителей, особой мотивации как у руководителей, так и у исполнителей, технической и финансовой возможности реализации задуманного.

Целью данной работы является краткое описание уже освоенных в ИЦ «Омега» уникальных компетенций, включая при этом как уже решенные и решаемые в настоящее время, так и планируемые к решению научно-практические задачи.

2. ИЦ «Омега» сегодня

Филиал национального исследовательского центра телекоммуникаций имени М. И. Кривошеева (НИЦ Телеком) в г. Севастополе (ИЦ

«Омега» — Испытательный центр «Омега») с момента образования по сегодняшний день динамично развивается, в том числе, в части создания и развития новых уникальных компетенций.

Основные направления деятельности ИЦ «Омега» в области испытаний включают:

- функциональные испытания радио- и телекоммуникационного оборудования;
- испытания оборудования на электромагнитную совместимость (ЭМС);
- испытания на безопасность низковольтного оборудования;
- механико-климатические испытания оборудования;
- электроакустические и телефонометрические испытания оборудования и др.

Для выполнения данных работ ИЦ «Омега» в 2015 году подтвердил свою подготовленность и был аккредитован Федеральной службой по аккредитации (Росаккредитация) как Испытательная лаборатория в составе Испытательного центра ФГАУ НИЦ Телеком в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 и критериями аккредитации, а также как орган по сертификации продукции и орган по сертификации систем менеджмента качества в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО/МЭК 17065-2012, ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021-1-2017 и критериями аккредитации. Согласно установленным законодательством правилам на протяжении 2015—2024 гг. ИЦ «Омега» регулярно проходил процедуры подтверждения компетентности с положительными результатами.

ИЦ «Омега» включен в Единый реестр органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) Евразийского экономического союза, осуществляющих оценку соответствия продукции, входящей в сферу действия технических регламентов:

- ТР ТС 020/2011 «ЭМС технических средств» [1];
- ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» [2];
- ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» [3].

ИЦ «Омега» — одна из немногих действующих в Российской Федерации испытательных лабораторий, аккредитованных на право проведения испытаний средств связи, электронных устройств/систем вызова экстренных оперативных служб ЭРА-ГЛОНАСС (УСВ) и аппаратуры спутниковой навигации (АСН), а также испытаний для целей обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности.

В декабре 2016 года Испытательный центр НИЦ Телеком на базе ИЦ «Омега» был признан Секретариатом международной спутниковой

системы поиска и спасания КОСПАС-САРСАТ (Канада) в качестве одобренной испытательной лаборатории КОСПАС-САРСАТ по проведению технических тестов радиобуев 406 МГц с целью получения типового одобрения. В реестре международной Системы КОСПАС-САРСАТ находится всего 5 лабораторий.

ИЦ «Омега» также имеет признание со стороны Российского морского регистра судоходства и Российского классификационного общества.

В конце 2018 года ИЦ «Омега» назначен Технической службой, уполномоченной проводить испытания электронных и электрических узлов, которые могут быть установлены на колесные транспортные средства, для официального утверждения типа на соответствие требованиям [4], установленным Правилами ООН.

3. Основные компетенции ИЦ «Омега»

Из основных направлений испытаний были сформированы уникальные компетенции. Краткое описание некоторых из них приведено ниже.

Сертификационные испытания устройств/систем ЭРА-ГЛОНАСС, так называемых «тревожная кнопка», которыми должны быть оснащены все автомобили, как производимые в Российской Федерации, так и ввозимые из-за рубежа, с целью снижения тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий и иных происшествий на дорогах посредством уменьшения времени доведения информации об указанных происшествиях до экстренных оперативных служб.

Устройство/система ЭРА-ГЛОНАСС (УСВ) представляет собой бортовой терминал автоматизированной информационной системы ЭРА-ГЛОНАСС, который устанавливается на транспортном средстве и предназначен в соответствии с требованиями ТР ТС 018/2011 [3] для автоматического формирования минимально необходимой информации, включая координаты и параметры движения транспортного средства, определенные при помощи глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, и передачи ее по сетям подвижной радиотелефонной связи стандартов GSM, UMTS. Информационное взаимодействие в системе ЭРА-ГЛОНАСС осуществляется также посредством двустороннего голосового обмена с экстренными оперативными службами при помощи громкоговорящей связи в кабине/салоне транспортного средства.

В состав УСВ входят следующие ключевые компоненты: основной телекоммуникационный блок с навигационным, коммуникационным модулями, тональным модемом, встроенной неснимаемой многопрофильной eSIM микросхемой, датчик автоматической идентификации ДТП; блок интерфейса пользователя с кнопкой экстренного вызова, микрофон, динамик, антенны коммуникационного и навигационного модулей (см. рис. 1).

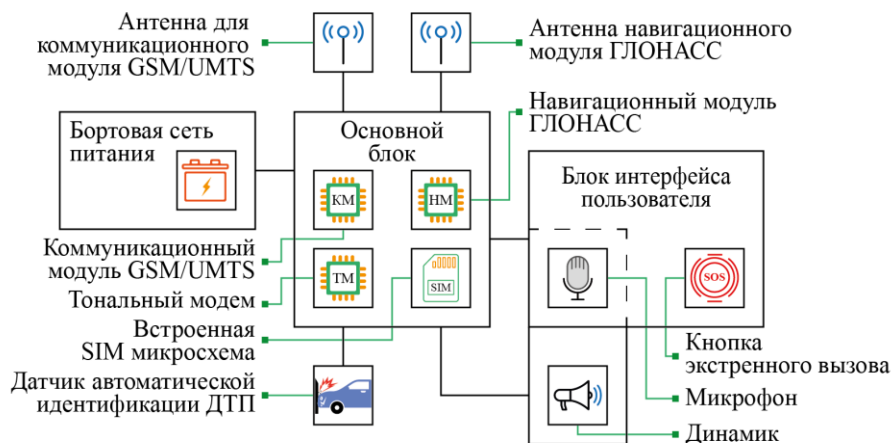


Рис. 1. Состав УСВ ЭРА-ГЛОНАСС.

Fig. 1. Composition of the ERA-GLONASS system

Нормативными документами [5—12] установлены общие технические требования, а также методы по следующим видам испытаний УСВ:

- электромагнитная совместимость;
- соответствие функциональных параметров, включая параметры тонального модема и навигационного модуля, модулей беспроводной связи (коммуникационных модулей);

- стойкость к климатическим и механическим воздействиям;
- качество громкоговорящей связи в кабине транспортного средства;
- соответствие требованиям по определению момента аварии.

В период с 2015 по настоящее время ИЦ «Омега» выполнил более 900 заказов на испытания УСВ и близких к ним по функциональному назначению АСН, в том числе около 500 заказов на испытания УСВ и АСН отечественного производства.

Из перечисленных выше видов испытаний наиболее высокотехнологичными и трудоемкими являются испытания коммуникационных модулей GSM 900/1800 и UMTS 900/2000. Для оптимизации процесса данных испытаний в ИЦ «Омега» успешно решена научно-практическая задача по обеспечению автоматизации данного процесса путем создания программного обеспечения, позволяющего одновременно управлять режимами работы испытуемого модуля и средствами измерений (широкополосным радиокommunikационным тестером), считывать измеренные значения и записывать их в соответствующую форму протокола.

При внедрении и совершенствовании испытаний параметров навигационного модуля УСВ в ИЦ «Омега» также успешно решен ряд других научно-практических задач, в частности:

— разработан, а также адаптирован под средство измерения имитатор сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/*GPS R&S* с требуемыми сценариями имитации;

— автоматизированы измерения и расчеты для ряда параметров навигационного модуля, таких как погрешность определения координат и скорости в автономном статическом и в динамическом режимах.

В рамках подготовки к испытаниям по проверке качества громкоговорящей связи в кабине транспортного средства в ИЦ «Омега» разработано и изготовлено испытательное оборудование «Имитатор акустического шума ИАШ-01» в комплекте с программным обеспечением «*Omega Noise Simulation*», которые в соответствии с требованиями [9] осуществляют запись необходимых шумовых сценариев в кабине транспортного средства на испытательной трассе и впоследствии позволяют обработать и воспроизводить полученные сценарии в стационарных условиях в лаборатории.

При освоении испытаний на стойкость к механическим воздействиям и по определению момента аварии УСВ в ИЦ «Омега» спроектирован, изготовлен, аттестован в установленном порядке и введен в эксплуатацию специальный ударный стенд: «Тележка испытательная ТИ-1», который предназначен для воспроизведения динамики дорожно-транспортного происшествия в случае лобового столкновения транспортного средства [13]. Данный стенд позволяет также проводить испытания на воздействие перегрузок, возникающих при столкновении транспортного средства, проверять надежность оригинальных механизмов крепления компонентов УСВ и оценивать работоспособность УСВ после воздействия.

Кроме этого, в ИЦ «Омега» спроектирована, разработана и изготовлена измерительная многоканальная система ударных параметров МИСУП-1, которая успешно прошла процедуру одобрения типа и включена в реестр средств измерений Российской Федерации. Данная измерительная система предназначена для измерения параметров ударного ускорения при испытаниях на воздействие перегрузок, возникающих при столкновении транспортного средства, а также при испытаниях по определению момента аварии устройств и систем вызова экстренных оперативных служб. Измерительная система МИСУП-1 с реализованными алгоритмами измерения, обработки и фильтрации ударных воздействий позволила проводить испытания датчика автоматической идентификации ДТП, встроенного в УСВ, на предмет определения истинности аварийного события и ложного срабатывания для различных видов ударных воздействий, реализованных с помощью изготовленного ударного стенда.

Кроме этого, в ИЦ «Омега» освоена, реализована и уточнена методика испытаний многопрофильной неснимаемой *eSIM* микросхемы, входящей в состав основного блока УСВ. Методика включает процедуры удаленной загрузки дополнительного профиля по радиоканалу на неснимаемую *eSIM* микросхему УСВ, переключение профилей, как локальное, так и удаленное, а также удаление данных профиля. Эта методика испытаний создана с целью обеспечения потенциальной возможности широкого применения *eSIM* микросхемы в перспективе как удобного инструмента для пользователей транспортных средств с УСВ.

В качестве развития данной компетенции в ИЦ «Омега» в части испытаний УСВ и АСН продолжаются работы над решением ряда новых научно-практических задач, таких как:

- автоматизация испытаний коммуникационных модулей с поддержкой технологии *LTE*;

- разработка локальной системы тестирования АСН на соответствие функциональных параметров, включая параметры тонального модема и навигационного модуля, модулей беспроводной связи (коммуникационных модулей);

- разработка «Анализатора параметров звуковых трактов» для тестирования двустороннего голосового обмена с экстренными оперативными службами при помощи громкоговорящей связи в кабине/салоне транспортного средства;

- участие в разработке стенда для переворота транспортного средства, необходимого для определения момента опрокидывания по датчику, входящему в состав УСВ;

- разработка методики испытаний параметров антенн для возможности подтверждения требований, в соответствии с которыми установка антенн УСВ обеспечивает в рабочем положении транспортного средства устойчивый прием сигналов не менее двух действующих глобальных навигационных спутниковых систем и в любом положении транспортного средства устойчивую связь по сетям подвижной радиотелефонной связи, обеспечивающим прием и передачу сигналов стандартов *GSM 900/1800* и *UMTS 900/2000*.

Испытания на одобрения типа аварийных радиобуев (аварийных радиомаяков) КОСПАС-САРСАТ. Аварийные радиобуи (АРБ), персональные (PLB) и авиационные (ELT) радиомаяки (АРМ) в совокупности определяют отдельный составной сегмент международной спутниковой системы КОСПАС-САРСАТ и предназначены для формирования и передачи сигналов бедствия с целью получения соответствующими службами поис-

ка и спасения точных и надежных данных о местоположении судов, самолетов и других объектов, потерпевших и терпящих аварию [14].

В ИЦ «Омега» освоены, проводятся и постоянно совершенствуются испытания на одобрения типа АРБ (АРМ), которые являются относительно сложными радиотехническими устройствами. Для повышения качества данных испытаний и одновременного уменьшения их трудоемкости в ИЦ «Омега» используются универсальные измерительные комплексы, в разработке которых специалисты ИЦ «Омега» принимали непосредственное участие. В общем виде структурная схема измерительного комплекса для испытаний АРБ (АРМ) приведена на рис. 2.

При помощи данных комплексов, кроме проверки собственно параметров радиосигнала АРБ (АРМ), параметров модуляции и потребляемой мощности, в ходе испытаний проводятся обязательные проверки вариантов кодирования содержания аварийного сообщения.

За 2015—2025 гг. ИЦ «Омега» выполнено более 70 заказов на испытания свыше 30 моделей АРБ (АРМ) из разных стран, в том числе производства Российской Федерации; Республики Беларусь; Израиля; Австралии, Китая; Республики Корея.

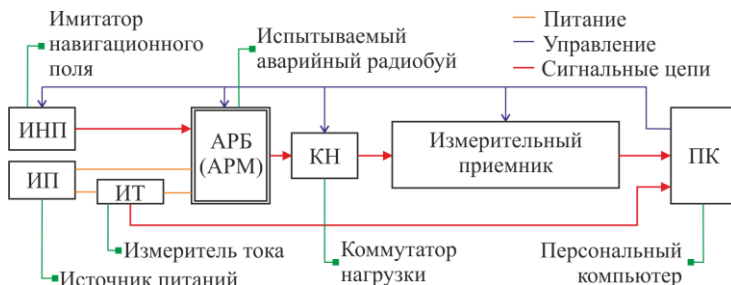


Рис. 2. Структурная схема измерительного комплекса для испытаний АРБ (АРМ).

Fig. 2. Structural diagram of the measuring complex for testing the EIRB (PLB, ELT)

При освоении и совершенствовании испытаний на одобрения типа АРБ (АРМ) в ИЦ «Омега» успешно решен ряд научно-практических задач, которые можно сгруппировать по следующим направлениям:

Автоматизация процессов:

- измерений радиочастотных, электрических и временных параметров АРБ (АРМ) на частотах 406 МГц и 121,5 МГц;
- измерений антенных характеристик АРБ (АРМ);
- проверки навигационных параметров АРБ (АРМ), помещенного в радиочастотное поле имитатора, создающего сигналы спутников глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo;

— оформления протокола испытаний.

Разработка и внедрение:

— устройства контроля и регистрации временных интервалов свечения индикаторов АРБ (АРМ) с синхронным контролем и регистрацией излучения радиосигналов АРБ (АРМ);

— стенда для измерения силы света светоимпульсного маячка АРБ (АРМ) в верхней полусфере при воздействии повышенной и пониженной температуры в климатических камерах;

— рабочего места по контролю автоматического разряда батарей АРБ (АРМ) регулируемым стабильным током с заданным временем разряда и его остановкой.

Модернизация:

— стенда для проверки глубины срабатывания автоматического устройства отделения АРБ (АРМ) с автоматической записью показаний манометра и подводного видео процесса отделения АРБ (АРМ).

Освоение и реализация:

— испытаний АРМ на правильность алгоритма активизации сигналами дистанционных датчиков перегрузки и разрушения воздушных судов;

— испытаний новой функции АРБ (АРМ) в виде «обратного канала», реализующего подтверждение принятия аварийного сигнала.

Специалисты ИЦ «Омега» не только активно отслеживают все нововведения в системе КОСПАС-САРСАТ, но и принимают непосредственное участие в деятельности Совета КОСПАС-САРСАТ. Так, начиная с 2022 года, по приглашению ФГУП «Морсвязьспутник» (организация, представляющая Российскую Федерацию в Программе КОСПАС-САРСАТ) в составе российской делегации специалисты ИЦ «Омега» принимают участие в работе Объединенных комитетов (*Joint Committee*) и Сессий Совета КОСПАС-САРСАТ (*COSPAS-SARSAT COUNCIL*). Это позволяет не только получать актуальную информацию и заблаговременно определять направления собственного развития в данной компетенции, но и вносить собственный вклад в развитие Системы КОСПАС-САРСАТ.

В настоящее время ИЦ «Омега» работает над подготовкой к аккредитации ИЦ ФГАУ НИЦ Телеком для проведения испытаний на одобрения типа АРБ (АРМ) второго поколения, что ставит новые научно-практические задачи.

Одной из таких задач является освоение нового измерительного комплекса. Такой комплекс в настоящее время уже разработан специалистами филиала ФГАУ НИЦ Телеком в г. Санкт-Петербург при участии ИЦ «Омега» [15], успешно прошел испытания в целях утверждения типа и внесен в реестр средств измерений Российской Федерации. Структурные

схемы измерительных комплексов для проведения испытаний АРБ (АРМ) для обоих поколений практически единообразны (см. рис. 2). Основные отличия измерительных комплексов определяются особенностями анализируемых радиосигналов АРБ (АРМ), составом измеряемых технических параметров и диапазонами их значений.

Также в процессе подготовки к испытаниям АРБ (АРМ) второго поколения изготовлена уникальная установка для проведения антенных измерений, позволяющая проводить бесконтактные измерения параметров излучения АРБ (АРМ) в соответствии с требованиями, приведенными в [16, 17]. Продолжаются работы по организации рабочих мест проведения антенных измерений и спутниковых квалификационных (натурных) испытаний в верхней полусфере с открытым свободным небосводом на полигоне ФГАУ НИЦ Телеком в г. Балашиха.

Следующая приоритетная научно-практическая задача развития данной компетенции состоит в создании и отработке новых видов испытаний, которые неразрывно связаны с совершенствованием АРМ, в частности:

- создание сценариев изменения скорости движения, пикирования, крена, изменения направления движения воздушных судов имитаторами глобальных навигационных спутниковых систем;

- использование имитатора шины *ARINC429* воздушных судов для передачи в АРМ сигналов по определенным координатам и времени *UTC*, а также приоритетов активации и деактивации АРМ;

- уменьшение периода посылок до 5 сек (в 10 раз) для АРМ.

Натурные испытания береговых радиотехнических объектов систем обеспечения безопасности мореплавания (СОБМ), в том числе береговых объектов и центров систем управления движения судов (СУДС), глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ) и международной автоматизированной системы оповещения (НАВТЕКС).

Объекты СУДС включают центры СУДС и радиотехнические посты (РТП), находящиеся на удалении от центров СУДС и предназначенные для размещения оборудования, технических средств и персонала (см. рис. 3).

В состав СУДС включаются следующие основные технические средства, обеспечивающие получение, обработку, отображение и регистрацию информации о судоходной и навигационной обстановке и взаимодействие с судами, в том числе:

- береговые радиолокационные станции (РЛС);

- средства автоматической информационной (идентификационной) системы (АИС);

- средства радиотелефонной связи с судами (ОВЧ-связь).

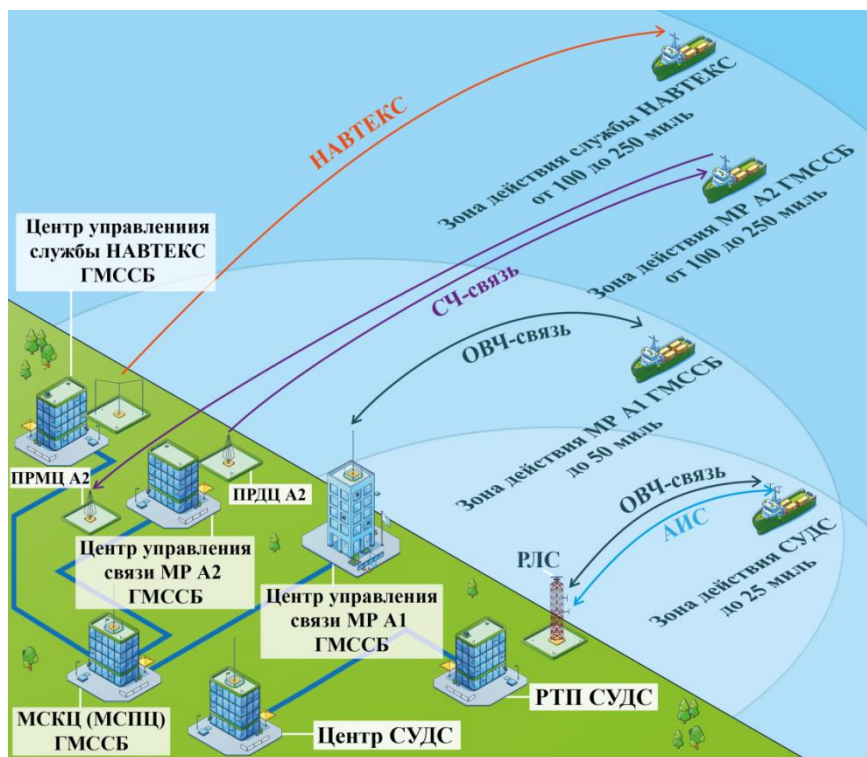


Рис. 3. Основные технические средства береговых объектов и центров СУДС, ГМССБ, НАВТЕКС.

Fig. 3. Main technical means of coastal facilities and centers of VTS, GMDSS, NAVTEX

Применительно к береговым объектам и центрам ГМССБ (см. рис. 3) можно выделить следующие основные технические средства:

— береговые станции ГМССБ морского района A1 (MR A1), обеспечивающие в диапазоне ОВЧ морской подвижной службы постоянную возможность приема сообщений о бедствии с использованием цифрового избирательного вызова (ЦИВ) и устойчивую связь с судами в режиме радиотелефонии;

— береговые станции ГМССБ морского района A2 (MR A2), обеспечивающие в диапазоне СЧ морской подвижной службы постоянную возможность приема сообщений о бедствии с использованием ЦИВ и устойчивую связь с судами в режиме радиотелефонии;

— береговые станции службы, обеспечивающей передачу на суда навигационных, метеорологических предупреждений и другой срочной информации, относящейся к безопасности мореплавания (НАВТЕКС).

За 2015—2025 гг. ИЦ «Омега» проведено около 60 натурных испытаний переоснащенных и новых объектов (26 объектов СУДС, 15 объектов МР А1 ГМССБ, 9 объектов МР А2 ГМССБ, 7 объектов НАВТЕКС, 1 объект КВ радиопорт) в 23 портах РФ: Керчь, Кавказ, Новороссийск, Туапсе, Темрюк, Санкт-Петербург, Приморск (Балтика), Кандалакша (Кольский залив), Архангельск, Ванино, Де-Кастри, Астрахань, Сочи, Сабетта, Холмск (Сахалин), Магадан, Севастополь, Таганрог, Феодосия, Мурманск, Калининград, Махачкала, Иркутск (Ангарск).

В 2020 г. в интересах ФГУП «Росморпорт» ИЦ «Омега» выполнена НИР «Исследование особенностей натурных испытаний систем обеспечения безопасности мореплавания. Рекомендации по организации и выполнению натурных испытаний систем управления движением судов (СУДС) и элементов Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ). Разработка типового регламента проведения натурных испытаний. Разработка проекта нормативного документа».

При выполнении данной НИР использован весь накопленный опыт ИЦ «Омега» в проведении натурных испытаний береговых радиотехнических объектов СОБМ, в том числе в части, касающейся упорядочения процедур подготовки и проведения соответствующих работ, оформления и сдачи протоколов, уменьшения трудоемкости проведения натурных испытаний береговых объектов и центров СУДС, ГМССБ и, соответственно, повышения их эффективности.

Научная новизна приведенных в НИР результатов определяется, в первую очередь, развитием инженерных методологий определения границ береговых радиостанций СОБМ и состоит: в корректной математической формулировке разрабатываемых методов; комплексного анализа шумовых компонент электромагнитного поля с учетом их математического описания и методов прогнозирования распространения радиоволн СЧ, ОВЧ и СВЧ диапазонов, в том числе на смешанных трассах; введение нового обобщающего параметра (фактическая чувствительность) с возможностью его измерения; представления новых результатов в виде графических зависимостей (номограмм) для определения границ рабочих зон СОБМ.

Практическая значимость полученных результатов в наиболее общем виде определяется разработкой и внедрением типовых методик расчета граничных значений дальности действия береговых станций диапазона СОБМ и разработкой типовых программ и методик проведения натурных испытаний береговых объектов СОБМ, на основании которых разработаны, согласованы, утверждены и введены действие следующие стандарты организации ФГУП «Росморпорт»:

1. «Правила проверки электромагнитной совместимости на объектах систем обеспечения безопасности мореплавания». Стандарт организации. СтО 14649425-0006-2021. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 29.09.2021 г.

2. «Методика расчета дальности действия береговой радиолокационной станции СУДС в диапазоне СВЧ». Стандарт организации. СтО 14649425-0007-2021. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 04.10.2021 г.

3. «Методика расчета граничных значений дальности действия технических средств береговых станций в диапазоне ОВЧ для морского района А1 ГМССБ и СУДС (радиотелефония и АИС)». Стандарт организации. СтО 14649425-0008-2021. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 06.10.2021 г.

4. «Методика расчета граничных значений дальности действия технических средств береговых станций морского района А2 ГМССБ и НАВТЕКС». Стандарт организации. СтО 14649425-0009-2021. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 15.10.2021 г.

5. «Типовая программа и методика проведения испытаний по определению дальности радиосвязи береговой станции морского района А1 глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности». Стандарт организации. СтО 14649425-0010-2022. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 28.03.2022 г.

6. «Типовая программа и методика проведения натурных испытаний системы управления движением судов». Стандарт организации. СтО 14649425-0011-2022. ФГУП «Росморпорт». Утвержден и введен в действие 05.05.2022 г.

На основе полученных научных и практических результатов подготовлена и принята к защите диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук одним из наших ведущих специалистов.

Таким образом, полученные результаты, которые также опубликованы в [18—26], позволили дать специалистам материал, необходимый в их практической деятельности, а также систематизировать как методы расчета напряженности поля в пределах дальности действия СОБМ, так и достаточно строго обосновать методы измерений основных радиотехнических параметров с возможностью их дальнейшего развития.

Также в качестве развития данной компетенции специалисты ИЦ «Омега» в настоящее время работают над решением ряда новых научно-практических задач [18].

Одной из таких задач, направленной на совершенствование натурных испытаний береговых объектов и центров СОБМ, является развитие

методов (методик) и средств измерений технических и эксплуатационных характеристик технических средств береговых объектов и центров в пределах их рабочих зон. Актуальность данной задачи определяется особенностями измерений технических и эксплуатационных характеристик, в том числе существенно влияющих на погрешности измерений. Примерами таких особенностей могут служить: ограниченное пространство на контрольно-испытательном судне, существенно влияющее на электромагнитную обстановку; влияние таких внешних факторов, как состояние моря (высота волн, их период), наличие и интенсивность осадков. Решение данной задачи направлено на минимизацию погрешности измерений и, соответственно, на увеличение достоверности получаемых результатов.

Другой задачей, непосредственно вытекающей из предыдущей, является автоматизация измерений с целью повышения точности, достоверности, повторяемости результатов измерений и снижения трудоемкости работ за счет оптимизации процесса испытаний.

Следующей задачей, имеющей прикладной характер, является оптимизация прокладки маршрута следования контрольно-испытательного судна с измерительным оборудованием. Для максимальной достоверности маршрут следования контрольно-испытательного судна должен охватывать все рабочие зоны технических средств береговых объектов и центров, включая границы рабочих зон, теневые и «мертвые» зоны, что с учетом заданных требований на форму и границы рабочих зон, существенно увеличивает время проведения испытаний. Основным критерием оптимизации в данном случае выступает минимизация времени проведения испытаний при сохранении заданного уровня достоверности результатов. В основе алгоритма оптимизации планируется использование одного из эвристических подходов, которые на основе случайного поиска позволяют получать решение «близкое» к оптимальному, что вполне достаточно для решения задачи построения оптимального маршрута следования.

4. Заключение

Сегодня коллектив Испытательного центра «Омега» — это компетентные, высококлассные специалисты, способные не только качественно реализовывать, но и активно осваивать новые технологии и методы испытаний, формулировать и решать научно-практические задачи.

Используемый в ИЦ «Омега» системный подход в организации научно-практической деятельности, в том числе для развития уникальных компетенций, позволил повысить эффективность испытаний в целом, в том числе минимизировать трудозатраты при сохранении, и даже повышении уровня достоверности измерений.

Список литературы

1. Технический регламент Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств»: (ТР ТС 020/2011): [утв. решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 879: с изм. от 10 июня 2022 года]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902320551?ysclid=m9r4rr2fh1854131309>. (дата обращения: 21.04.2025).
2. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности низковольтного оборудования»: (ТР ТС 004/2011): [утв. решением комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 года № 768: с изм. от 10 июня 2022 года]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902299536?ysclid=m9r4va5k40385855621> (дата обращения: 21.04.2025).
3. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств»: (ТР ТС 018/2011): [утв. решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 877: в редакции 20 мая 2023 года]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://m-certif.ru/sites/default/files/tr_ts_0182011_tehnicheskij_reglament_tamozhennogo_sojuza_o_bezopasnosti.pdf. (дата обращения: 21.04.2025).
4. ГОСТ Р 41.10-99. (Правила ЕЭК ООН № 10). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении электромагнитной совместимости: государственный стандарт Российской Федерации : дата введения 2000-07-01. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200027764?ysclid=m9r518a1xz899175403>. (дата обращения: 21.04.2025).
5. ГОСТ 33464-2015. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Устройство/системы вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования: межгосударственный стандарт: дата введения 2017-01-01. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200142997?ysclid=m9r572eckg434233032>. (дата обращения: 21.04.2025).
6. ГОСТ 33465-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Протокол обмена данными устройства/системы вызова экстренных оперативных служб с инфраструктурой системы экстренного реагирования при авариях. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200142998?ysclid=m9r5a87ge0633985230>. (дата обращения: 21.04.2025).
7. ГОСТ 33466-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний устройства/системы вызова экстренных оперативных служб на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости, стойкости к климатическим и механическим воздействиям. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200142999?ysclid=m9r6c0gujz976581802>. (дата обращения: 21.04.2025).
8. ГОСТ 33467-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы функционального тестирования устройства/системы вызова экстренных оперативных служб и протоколов передачи данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200143000?ysclid=m9r6dron80304156990>. (дата обращения: 21.04.2025).
9. ГОСТ 33468-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний устройства/системы вызова экстренных оперативных служб на соответствие требованиям к качеству громкоговорящей связи в кабине транспортного средства. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200143001?ysclid=m9r6fgo038910425310>. (дата обращения: 21.04.2025).

10. ГОСТ 33469-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний устройства/системы вызова экстренных оперативных служб на соответствие требованиям по определению момента аварии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200143250?ysclid=m9r6h1cy35270715084>. (дата обращения: 21.04.2025).
11. ГОСТ 33470-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний модулей беспроводной связи устройства/системы вызова экстренных оперативных служб. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200143251?ysclid=m9r6jue3pz645888224>. (дата обращения: 21.04.2025).
12. ГОСТ 33471-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний навигационного модуля устройства/системы вызова экстренных оперативных служб. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200143252?ysclid=m9r6l5o4jv47090263>. (дата обращения: 21.04.2025).
13. Проценко М. Б., Носенко С. А. Пять лет вместе с НИИР, осваивая новые технологии // Труды НИИР. 2019. № 1. С. 6—10.
14. Информационный бюллетень Коспас-Сарсат. 2023. Вып. 30. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/IB30RU.zip>. (дата обращения: 21.04.2025).
15. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Коваленко В. И. [и др.]. Подготовка к испытаниям одобрение типа АРБ (АРМ) 2-го поколения КОСПАС-САРСАТ // Электросвязь. 2019. № 9. С. 32—36.
16. C/S T.018: Specification for second-generation COSPAS-SARSAT 406-MHz distress beacons, Issue 1 – Revision 12, Oct. 2024. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/T018-24-OCT-2024--with-markup-.pdf>. (дата обращения: 21.04.2025).
17. C/S T.021: COSPAS-SARSAT second-generation 406-MHz distress beacon type approval standard, Issue 1 – Revision 5, Oct. 2024. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/T021-24-OCT-2024--with-markup-.pdf>. (дата обращения: 21.04.2025).
18. Проценко М.Б., Громоздин В.В., Коваленко В.И. Основные направления совершенствования натурных испытаний береговых объектов и центров СУДС и ГМССБ // Труды НИИР. 2019. № 1. С. 63—68.
19. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Иевлев К. В. [и др.]. Инструментальные методы измерения качества судовой ОВЧ радиосвязи // Труды НИИР. 2021. № 1. С. 25—32.
20. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Козуб М. С. Методика оценивания граничной дальности береговых радиостанций СОБМ в ОВЧ диапазоне для направления Берег-Судно // Труды НИИР. 2021. № 3. С. 40—45.
21. Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С. Анализ и учет ЭМС на береговой станции ГМССБ при прогнозировании дальности радиосвязи СЧ-диапазона // Труды НИИР. 2022. № 1. С. 48—52.
22. Громоздин В. В., Коваленко В. И., Иевлев К. В. [и др.]. Методика проведения натурных испытаний береговых объектов ГМССБ МР А1 // Электросвязь. 2022. № 3. С. 30—34.
23. Громоздин В. В., Коваленко В. И., Иевлев К. В. [и др.]. Методика проведения натурных испытаний береговых объектов ГМССБ МР А2 // Электросвязь. 2022. № 4. С. 21—27.
24. Громоздин В. В., Иевлев К. В., Козуб М. С. [и др.]. Опытнo-теоретический метод определения дальности действия береговой радиолокационной станции // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5. № 2. С. 236—246.

25. Проценко М. Б., Громоздин В. В., Коваленко В. И. [и др.]. Методика проведения натурных испытаний береговых объектов НАВТЕКС ГМССБ // Электросвязь. 2022. № 11. С. 12—17.
26. Козуб М. С., Громоздин В. В., Проценко М. Б. Новый подход к проведению натурных испытаний береговых объектов систем морской радиосвязи // Труды НИИР. 2024. № 1-2. С. 117—126.

Информация об авторах

Проценко Михаил Борисович, доктор технических наук, профессор, директор филиала НИЦ Телеком в г. Севастополе (ИЦ «Омега»), г. Севастополь; профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Громоздин Валентин Владимирович, кандидат технических наук, заместитель директора по техническому развитию филиала НИЦ Телеком в г. Севастополе (ИЦ «Омега»), г. Севастополь; доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Scientific and Practical Activities in Branch of the M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication in Sevastopol (TC “Omega”) for Creation and Development of New Competencies (for the 10th anniversary of the branch)

M. B. Protsenko^{1,2} and V. V. Gromozdin^{1,2}

¹*Branch of the National Research Centre for Telecommunications in Sevastopol
(TC “Omega”)*

29, Vakulenchuk str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
procenkomb@nic-t.ru, gromozdinvv@nic-t.ru

²*Sevastopol State University*

*Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation*

Received: May 12, 2025

Peer-reviewed: May 19, 2025

Accepted: May 19, 2025

Abstract: *The unique competencies mastered in branch of the M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication in Sevastopol (TC “Omega”) are in the paper briefly describes. These are certification tests of devices/systems of the ERA-GLONASS automated information system, satellite navigation equipment, tests for type approval of the international satellite system COSPAS-SARSAT distress beacon, full-scale tests of coastal radio-technical objects of vessel traffic services (VTS), the global maritime distress system (GMDSS) and the international automated warning system (NAVTEX). The basis of these competencies is the created and acquired new measuring instruments, testing and auxiliary equipment, developed and mastered testing methods in the TC “Omega”. Scientific and practical tasks that have already been solved, are currently being solved, and are planned to be solved within the framework of the creation and development of these competencies are separately noted.*

Keywords: *certification tests, type approval tests, full-scale tests, ERA-GLONASS device, COSPAS-SARSAT distress beacons; VTS, GMDSS, NAVTEX.*

For citation (IEEE): M. B. Protsenko and V. V. Gromozdin, “Scientific and Practical Activities in Branch of the M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication in Sevastopol (TC “Omega”) for creation and development of new competencies (for the 10th anniversary of the branch),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 454–473, 2025, doi: 10.21227/89gg-gr43. (In Russ.).

References

- [1] Technical Regulation of the Customs Union, “Electromagnetic compatibility of technical equipment,” (TR CU 020/2011), Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902320551?ysclid=m9r4rr2fh1854131309>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [2] Technical Regulation of the Customs Union, “On safety of low-voltage equipment,” (TR CU 004/2011), Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902299536?ysclid=m9r4va5k4o385855621> (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [3] Technical Regulation of the Customs Union, “On safety of wheeled vehicles,” (TR CU 018/2011), Available at: http://m-sertif.ru/sites/default/files/tr_ts_0182011_tehnicheskij_reglament_tamozhennogo_sojuza_o_bezopasnosti.pdf. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [4] GOST P 41.10-99. (UNECE Regulation No. 10). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200027764?ysclid=m9r518a1xz899175403>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [5] GOST 33464-2015. Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. In-vehicle emergency call device/system. General technical requirements. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200142997?ysclid=m9r572eckg434233032>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [6] GOST 33465-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Data exchange protocol between in-vehicle emergency call device/system and emergency response system infrastructure. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200142998?ysclid=m9r5a87ge0633985230>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [7] GOST 33466-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Compliance test methods for electromagnetic compatibility, environmental and mechanical resistance requirements of in-vehicle emergency call device/system. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200142999?ysclid=m9r6c0gujz976581802>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [8] GOST 33467-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Functional test methods for in-vehicle emergency call device/system and data transfer protocols. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200143000?ysclid=m9r6dron80304156990>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [9] GOST 33468-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Test methods for in-vehicle emergency call device/system on compliance with requirements for speakerphone quality in a vehicle. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200143001?ysclid=m9r6fg0o38910425310>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [10] GOST 33469-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Test methods for in-vehicle emergency call device/system crash detection feature. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200143250?ysclid=m9r6h1cy35270715084>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [11] GOST 33470-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Test methods for wireless communication module of in-vehicle emergency call device/system. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200143251?ysclid=m9r6jue3pz645888224>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).
- [12] GOST 33471-2015 Global navigation satellite system. Road accident emergency response system. Test methods for navigation module of in-vehicle emergency call device/system. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200143252?ysclid=m9r6l5o4jv47090263>. (Accessed 21 April 2025). (In Russ.).

- [13] M. Protsenko, and C. Nosenko, "Five years together with the Research Institute of Radio Engineering mastering new technologies," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 1, pp. 6–10, 2019. (In Russ.).
- [14] COSPAS-SARSAT Information Bulletin, no. 30, 2023.
- [15] M. Protsenko, V. Gromozdin, V. Kovalenko, [et al.], "Preparation for testing type approval of the second-generation COSPAS-SARSAT distress beacons," *Electrosvyaz Magazine*, no. 9, pp. 32–36, 2019. (In Russ.).
- [16] C/S T.018: Specification for second-generation COSPAS-SARSAT 406-MHz distress beacons, Issue 1 – Revision 12, Oct. 2024.
- [17] C/S T.021: COSPAS-SARSAT second-generation 406-MHz distress beacon type approval standard, Issue 1 – Revision 5, Oct. 2024.
- [18] M. Protsenko, V. Gromozdin, and V. Kovalenko, "Main directions for improving full-scale testing of VTS and GMDSS coastal facilities and centers," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 1, pp. 63–68, 2019. (In Russ.).
- [19] M. Protsenko, V. Gromozdin, K. Ievlev, [et al.], "Instrumental methods for measuring the quality of ship VHF radio communications," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 1, pp. 25–32, 2021. (In Russ.).
- [20] M. Protsenko, V. Gromozdin, and M. Kozub, "Methodology for assessing the limiting range of coastal radio stations of navigation safety systems in the VHF range for the Coast-Ship direction," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 3, pp. 40–45, 2021. (In Russ.).
- [21] V. Gromozdin, K. Ievlev, and M. Kozub, "Analysis and consideration of EMC at the GMDSS coast station when predicting the range of MF radio communications," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 1, pp. 48–52, 2022. (In Russ.).
- [22] V. Gromozdin, V. Kovalenko, K. Ievlev, [et al.], "Methodology for conducting full-scale tests of coastal GMDSS facilities MR A1," *Electrosvyaz Magazine*, no. 3 pp. 30–34, 2022. (In Russ.).
- [23] V. Gromozdin, V. Kovalenko, K. Ievlev, [et al.], "Methodology for conducting full-scale tests of coastal facilities of GMDSS MR A2," *Electrosvyaz Magazine*, no. 4, pp. 21–27, 2022. (In Russ.).
- [24] V. Gromozdin, K. Ievlev, M. Kozub, [et al.], "Experimental and theoretical method for determining the range of a coastal radar station," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 236–246, 2022. (In Russ.).
- [25] M. Protsenko, V. Gromozdin, V. Kovalenko, [et al.], "Methodology for conducting full-scale tests of coastal NAVTEX and GMDSS facilities," *Electrosvyaz Magazine*, no. 11, pp. 12–17, 2022. (In Russ.).
- [26] M. Kozub, V. Gromozdin, and M. Protsenko, "New approach to conducting full-scale testing of coastal facilities of marine radio communication systems," *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering*, no. 1–2, pp. 117–126, 2024. (In Russ.).

Information about the authors

Mikhail B. Protsenko, DSc (Engineering), Full Professor, Director of Branch of the National Research Centre for Telecommunications in Sevastopol (TC "Omega"); Professor at the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation..

Valentin V. Gromozdin, PhD (Engineering), Deputy Director for Technical Development, Branch of the National Research Centre for Telecommunications in Sevastopol (TC "Omega"); Associate Professor at the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

История развития средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002)

Ермолов П. П.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
ppyermolov@mail.sevsu.ru

Получено: 10 января 2025 г.

Отрецензировано: 17 февраля 2025 г.

Принято к публикации: 10 марта 2025 г.

Аннотация: На основе информации, рассеянной в различных источниках, в статье представлены: история развития оптического телеграфа, создание подводного телефона Е. В. Колбасьева, деятельность А. С. Попова на Черноморском флоте (ЧФ), инновации в развитии связанных технологий на ЧФ в 1993—2002 гг., а также сведения о работах в области радиоуправления и радиопеленгации на ЧФ. Результаты исследования изложены в формате компендиума, сведены в таблицу и проиллюстрированы инфографикой.

Ключевые слова: оптический телеграф, Е. В. Колбасьев, А. С. Попов, пейджинговая связь, станция «Nera», система «Globalstar», транкинговая радиосвязь.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П. История развития средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002) // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 474—494.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. История развития средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002) / П. П. Ермолов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 474—494.

1. Введение

Вопросам истории развития связи в отечественных вооруженных силах и на флоте посвящено достаточное количество публикаций^{1,2} и др.

¹ История военной связи / Под общ. ред. А. И. Белова. В 3 тт., 5 кн. Том 1. Становление и развитие военной связи в России. М.: Воениздат, 1983. 383 с.; Том 2. Военная связь в годы гражданской войны и

Однако в них, как правило, рассматриваются вопросы организации связи, управления и боевого применения (в отличие от публикаций, посвященных средствам радиолокации, РЭБ и др.). Кроме собственно средств связи, в статье рассмотрены также технологически «родственные» им средства радиоуправления и радиопеленгации.

Еще одной особенностью рассмотрения развития средств связи на Черноморском флоте является следующее. На первых этапах внедрения электромагнитного телеграфа эта технология использовалась на флоте совместно с «гражданским» телеграфным ведомством. Вот что отмечает в своей статье главный инженер предприятия связи Севастополя в 1940-е — 1970-е гг., историк П. А. Лунёв: «Севастопольский городской телеграф имел большое значение для обороны южных рубежей страны. Военное ведомство имело перед первой мировой войной ограниченные проводные связи на Кавказе и в районах северо-западного побережья Черного моря. Поэтому все расчеты по связи командование Черноморского флота строило, исходя из возможностей почтово-телеграфного ведомства. В начале первой мировой войны телеграфные аппараты, которые использовались службой связи и наблюдения Черноморского флота, размещались в почтово-телеграфной конторе, куда телеграммы доставлялись посыльными. И даже когда в 1915 г. была создана флотская телефонно-телеграфная станция «Графская пристань», ее обслуживали шесть чиновников и два механика из почтово-телеграфного ведомства»³.

2. Оптический телеграф

В 20-х гг. XIX в. в Севастополе для нужд Черноморского флота был оборудован семафорный телеграф. Этот телеграф использовался и в дни первой обороны города. Семафорная мачта была, в частности, установлена на высоте «Телеграфная горка» под Балаклавой. В музее Обороны и освобождения Севастополя есть данные, подтверждающие, что с «Телеграфной горки» в 1854—1855 гг. поддерживалась связь с командующим Крымской армией, которая после Альминского сражения отступила на север к Бахчисараю, а также с кораблями флота³. В некоторых исследованиях

строительства социализма в СССР. 1984. 367 с.; Том 3. Кн. 1. Военная связь в первом периоде Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. 1989. 319 с.; Том 3. Кн. 2. Военная связь во втором и третьем периодах Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. [с 19.11.1942]. 1990. 319 с. Том 3. Кн. 3. Военная связь в войне империалистической Японией. Развитие военной связи в послевоенный период. 1991. 224 с.

² Служба связи Черноморского флота. В кн. : 100 лет Службе связи Военно-Морского Флота. М. : ИРИАС, 2009. С. 233—254.

³ Лунёв П. А. Развитие связи в городе-герое Севастополе // Из истории энергетики, электроники и связи. 1979. Вып. 10. С. 95—113.

(напр., [1]) делается предположение о том, что на Черноморском флоте использовался семафорный телеграф системы И. П. Кулибина.

В 1826—1830 гг. по инициативе командующего Черноморским флотом адмирала А. С. Грейга была сооружена самая протяженная в России линия оптического телеграфа, соединяющая главный порт флота — Николаев — с Херсоном, Очаковым, Измаилом и Севастополем. Телеграфные станции строились в виде каменных башен на возвышенностях вблизи населенных пунктов, получая от них свои названия. В Севастополе такая станция была сооружена на нынешней Радиогорке и называлась «г. Телеграф», или «Севастопольская»².

Использование оптического телеграфа Крымской (Восточной) войне 1853—1856 гг. нашло отражение в обстоятельном описании обороны Севастополя, составленном вскоре после окончания войны руководителем инженерных работ в период обороны города, известным инженером-фортификатором Э. И. Тотлебенем: «...Для наблюдения за движением неприятельских судов вдоль берега от Эвпатории (Евпатории — П. Е.) до селения Мшатка на южном берегу Крыма, была устроена линия семафорных телеграфов... Кроме того были устроены телеграфы в городе, на Малаховом кургане и на хуторе Панютина, находившемся между Севастополем и Георгиевским монастырем» [1].

Другое устройство, но уже «мобильного» типа, которое применялось во время русско-турецкой (1827—1828 гг.) и Крымской (1853—1856 гг.) войн, было предложено капитан-лейтенантом П. Е. Чистяковым, впоследствии адмиралом. В этом устройстве применялись три шеста, на каждом из которых сверху было по два подвижных крыла. В ночное время на концах крыльев на специальных подвесах укреплялись фонари. Для передачи сообщений использовались два вида кодирования — цифровое и буквенное [2].

3. Подводный телефон Е. В. Колбасьева

Инициатором и пионером внедрения телефонной связи на боевых кораблях Российского военно-морского флота был известный изобретатель, морской офицер Евгений Викторович Колбасьев.

Изначально для связи в водолазном деле использовался сигнальный трос. В 1870-е гг. делались попытки применить для этих целей электрические средства сигнализации, но применение электрических звонков и кнопок не решило проблему несовершенства связи с использованием сигнального троса. Должное разрешение проблема получила только с появлением телефона.

Е. В. Колбасьев начал заниматься проблемами подводной телефонии в 1886 г., и только через 10 лет, в 1896 г., его работа была завершена, и система прошла в Севастополе успешные испытания [3].

В существовавших в то время телефонных линиях связи в канал поступал как полезный, так и паразитный сигнал (источником которого был окружающий шум от волн, работы машин, выстрелов артиллерии), что заметно снижало разборчивость речи. Для подавления паразитного сигнала Колбасьевым была предложена т. н. трехпроводная система, действие которой было основано на следующем. Паразитный сигнал, действующий на оба микрофона, подавлялся за счет встречного (противофазного) включения прямой и обратной цепи и наличия общего провода. Полезный же сигнал воздействовал только на один из микрофонов, и поэтому не подвергался такому подавлению. Колбасьевым на это устройство была получена привилегия [3].

4. Деятельность А. С. Попова на Черноморском флоте

В построенной периодизационной модели [4] именно опыты А. С. Попова 1899 г. взяты в качестве начала развития инфокоммуникаций и радиотехнологий на Черноморском флоте. Ввиду большого авторитета Попова его деятельность на Черноморском флоте нашла отражение в многочисленных крымских публикациях, приуроченных, как правило, к юбилеям ученого или первой демонстрации беспроводной связи в 1895 г. Мы в настоящей статье будем основываться на материалах Центрального государственного архива Военно-Морского Флота, опубликованных в [6].

4.1. Опыты телеграфирования 1899 г.

Прочитируем «Акт комиссии о производстве опытов телеграфирования без проводов по способу А. С. Попова на Черном море» от 13 октября 1899 г. [5].

«Приборы для телеграфирования без проводов были доставлены на суда эскадры 24 августа, накануне начала маневров, и были размещены следующим образом: на броненосцах “Георгий Победоносец” и “Три Святителя” — полные станции, т. е. приборы для отправления и для приема. На минном крейсере «Капитан Сакен» была установлена только станция отправления <...>

Телеграфное сообщение началось 25 августа на Севастопольском рейде, куда возвратилась эскадра вследствие бурной погоды. Были пущены в действие станции на броненосцах “Георгий Победоносец” и “Три Святителя”, при расстоянии в 4 кабельтовых, причем между станциями

стоял броненосец “Двенадцать апостолов”. 28 августа эскадра снова вышла в море, и в течение дня производились опыты телеграфирования между броненосцами “Георгий Победоносец” и “Три Святителя”. С крейсера “Капитан Сакен” также было принято несколько депеш, причем крейсер... находился при эскадре.

В следующий день... броненосцы стояли у Казачьей бухты. Крейсер “Капитан Сакен” был послан к месту первой высадки у реки Качи, причем от него было принято на телефон несколько депеш на броненосце “Три Святителя” и одна на броненосце “Георгий Победоносец”. Расстояние между Казачьей бухтой и рекой Качей — 9 миль. Вечером того же дня броненосец “Три Святителя” снялся с якоря и отделился от эскадры, идя навстречу десантных судов; при этом был сделан опыт передачи депеши на дальнюю дистанцию.

На броненосце “Георгий Победоносец” был пущен змей и отправлялись депеши, записываемые по часам в течение 2 часов 20 минут по снятии с якоря. Депеши были принимаемы на расстояниях до 14 миль. Из последней депеши, посланной с броненосца “Георгий Победоносец” на расстоянии около 16 миль, были разобраны два слова.

В последний день маневров приборы были испытаны во время непрерывной стрельбы с обоих судов в течение 2 часов (выделено мной — П. Е.). Хотя стрельба производилась холостыми выстрелами, однако вследствие помещения приборов на мостике ощущались чувствительные сотрясения. Несмотря на это, на броненосце “Георгий Победоносец” было принято 7 депеш, а на броненосце “Три Святителя” — 10 депеш, в среднем по 7 слов. Сотрясения от собственных выстрелов изредка отзывались на приемном приборе лишней точкой, но телеграфист всегда мог заметить эти точки <...>

Помещение станции внутри корпуса корабля не оказало влияния на передачу депеш при переговорах на рейде и на ходу эскадры при дальнейшем ее следовании из Севастополя в Ялту. <...>

2 сентября крейсер «Капитан Сакен» с другими мелким судами был отправлен в Балаклавскую бухту и остановился в глубине бухты, совершенно закрытый горами. Во время прохода эскадры мимо Балаклавы сигналы, посылаемые с крейсера “Капитан Сакен”, не достигали до броненосцев и обратно. Впрочем крейсер “Капитан Сакен” был почти на предельном расстоянии действия его приборов, так как на этот раз нельзя было воспользоваться змеем <...>

Во время стоянки эскадры в Ялте были сделаны испытания на быстроту передачи: наибольшая достигнутая быстрота получалась — 15 букв в минуту. При переходе эскадры из Ялты в Феодосию был установлен взаимный обмен депешами между тремя станциями по условным вызовам <...>

7 сентября был сделан опыт переговоров между броненосцами “Двенадцать апостолов” и “Георгий Победоносец”. Броненосец “Георгий Победоносец” оставался на Феодосийском рейде, а броненосец “Двенадцать апостолов” удалялся от него. Взаимный обмен депеш между ними без перерыва продолжался до расстояния в 6 миль в обе стороны <...>

Из опытов можно сделать следующее заключение:

1. Помещение для станции должно быть закрытое, не подверженное влиянию высокой температуры.

2. Относительно приемного провода (он же и отправительный) произведенные опыты указали, что высота подвешивания для увеличения района действия телеграфа имеет первостепенное значение. Вредное действие металлических снастей при соответствующем положении судов замечалось во время маневрирования, и необходимо удалить металлический такелаж стенок. Громоотвод должны сделать хорошо изолированным и взять его за приемный провод. Во время грозы его можно соединять с мачтой, так как телеграф во время грозы не может функционировать правильно. Стеньгу желательно повесить, насколько позволяют судовые условия каждого отдельного типа, причем высшая точка провода должна быть не ниже 100 футов от ватерлинии <...>

5. Правила для совместной работы на многих станциях, чтобы они не мешали друг другу, могут быть выработаны только при продолжительных опытах и при большем числе станций. Эта задача, как и выработка удобнейшего криптографа, должна быть предоставлена будущему» [5].

4.2. Опыты телеграфирования 1901 г.

Процитируем «Отчет А. С. Попова об опытах телеграфирования без проводов во время следования практической эскадры Черного моря из Севастополя в Новороссийск 19 и 20 августа 1901 г.» от 2 февраля 1902 г. [5].

Опыт I. На расстоянии 18 миль. Испытываемые станции были установлены на броненосце «Синоп» и «Георгий Победоносец». В 4 часа дня 19 августа броненосец «Георгий Победоносец» стал удаляться от эскадры и к девяти часам вечера был на расстоянии 18 миль. Обе станции одновременно на этом расстоянии стали плохо получать телеграммы на аппарат Морзе и одновременно перешли на телефонный приемник. В 10 часов вечера броненосец «Георгий Победоносец» получил по телеграфу приказание не удаляться, и оба судна до 11 часов шли параллельным курсом. Так как не удавалось снова получить телеграммы на ленту на этом расстоянии, то броненосец «Георгий Победоносец» после 11 часов вечера стал приближаться, и в 12 часов ночи, когда оба судна были на расстоянии 16

миль, на броненосце «Георгий Победоносец» стали снова принимать на ленту. На броненосце «Синоп» не знали об этом приближении и на нем продолжали принимать на телефон.

Опыт II. На расстоянии 41-й мили. В час ночи 20 августа, когда на броненосце «Георгий Победоносец» снова установился прием телеграмм на телеграфный аппарат, было решено во второй раз удаляться от эскадры. По-видимому, броненосец «Георгий Победоносец» теперь очутился в более благоприятном положении по отношению к броненосцу «Синоп» (он был значительно впереди него). Прием на телеграфную ленту не прекращался до 3 часов ночи. Последняя правильная телеграмма на ленту на броненосце «Георгий Победоносец» была получена в 3 часа на расстоянии 25 миль. Дальше обмен телеграмм производился по телефонному приемнику до половины седьмого утра 20 августа, когда с броненосца «Синопа» было получено приказание приближаться к эскадре. В это время на броненосце «Синоп» прием телеграмм стал ухудшаться. При приближении к эскадре броненосец «Георгий Победоносец» становится в неблагоприятные условия, и только к 9 часам утра, когда оба судна были на расстоянии 12 миль, на нем удавалось принимать телеграммы на ленту. Далее суда идут параллельными курсами на расстоянии 9 миль. В 11 часов утра 20 августа броненосец «Георгий Победоносец» получает приказание снова удаляться.

Опыт III. На расстоянии 80 миль. В 11 часов утра 20 августа броненосец «Георгий Победоносец» получил приказание удаляться до прекращения возможности переговоров. При передаче приказа направление курса было передано ошибочно вместо SO — SW, и первое время броненосец стал удаляться в неблагоприятном для опыта направлении. Около часа после переговоров и проверки был взят правильный курс, и броненосец не менял его до прекращения опыта. В этом опыте прием на телеграфную ленту прекратился на 16 милях на том же расстоянии, как и в первом опыте. Очевидно взаимное расположение судов и в этом случае не было благоприятно.

В 3 часа дня 20 августа эскадра подошла к Новороссийску и расположилась на его рейде. В это время броненосец «Георгий Победоносец» находился на расстоянии 50 миль, и на нем было заметно, что прием телеграмм на телефон стал ухудшаться. По-видимому, или мимо проходящие суда, или сама бухта в этом направлении затрудняли передачу... К 5 часам условия для передачи снова делаются благоприятными, и телеграммы стали получаться на этом расстоянии около 60 миль гораздо отчетливее. При дальнейшем увеличении расстояния взаимное расположение судов приблизительно оставалось одинаковым, и потому ослабление в передаче телеграмм, которое стало обнаруживаться в это время, нужно приписать только одному: очевидно броненосец стал приближаться к предельному

расстоянию. В 6 часов вечера на расстоянии 70 миль в телеграммах стали становиться неясными отдельные слова, а к 7 часам, когда расстояние увеличилось еще на 10 миль, передача еще более ухудшилась <...> Таким образом расстояние 80 миль нужно считать предельным для испытываемых станций [5].

4.3. Проект линии связи России и Болгарии 1903 г.

Протицируем «Докладную записку А. С. Попова о связи России с Болгарией в Главное управление почт и телеграфов» от 4 марта 1903 г. [6].

«1. Возможность устройства станций беспроволочного телеграфа для соединения России с Болгарией. При настоящем состоянии приборов беспроволочного телеграфа существует полная уверенность в возможности пользования им на тех расстояниях, которые должно иметь в виду, в предполагаемой установке. Наибольшая дальность, полученная с теми средствами, которыми мы располагаем в настоящее время, была 260 километров (с приборами Дюкрете во Франции). Но такое расстояние нельзя считать предельным — это был опыт, осуществленный между береговыми станциями, причем не были использованы все меры, могущие увеличить дальность, именно: усиление мощности источника электромагнитных волн и употребление сложной сети воздушных проводов, вместо простейшего устройства, употребляемого до сих пор на одиночных мачтах <...>

3. Выбор места для станции беспроволочного телеграфа. Намеченные Министерством иностранных дел места для станций Одесса и Варна наиболее отвечают коммерческим интересам в будущем, при развитии торгового обмена между Россией и Болгарией. Но существует много доводов за другой пункт для русской станции, именно — за Севастополь:

а) Расстояния между Одессой и Варной и между Севастополем и Варной почти одинаковы, но прямая линия, соединяющая Варну с Одессой, идет большей частью по суше, частью вдоль берега, линия же Севастополь — Варна идет по открытому морю. Случаи удачной передачи через сушу неоднократно осуществлялись, но все-таки не подлежит сомнению, что на море большие расстояния легче достигаются. Поэтому с технической точки зрения Севастополь следует предпочесть Одессе.

б) Так как предполагаемый телеграф будет служить и для обмена между правительствами обеих стран, то нужно иметь в виду, что при соединении Варны с Одессой между ними будет лежать румынская территория, и по свойству беспроволочного телеграфа нельзя защититься от подслушивания какою-либо промежуточной станцией, если она поставит себе такую задачу. Линия Варна — Севастополь лежит в стороне от Румынии,

и при больших расстояниях, такое подслушивание потребует более дорогих сооружений и вообще менее вероятно. В военное время, в случае враждебных отношений с Румынией, правильное сообщение между станциями может быть прекращено посредством посылки электромагнитных волн с промежуточных между Одессой и Варной пунктов. Вследствие большой отдаленности линии Севастополь — Варна такая помеха делается почти невозможной.

с) Станция большой мощности, установленная в Севастополе или вблизи него, может служить и военным целям. При ее помощи могут сообщаться с Севастополем почти на всем пространстве Черного моря специальные крейсера-разведчики, снабженные соответствующими приспособлениями и приборами, а в будущем может быть и все броненосцы черноморской эскадры.

Возможность иметь непрерывное сообщение с Севастополем как для наших военных судов, плавающих на всем пространстве Черного моря, так и для станций на его побережьях имеет первостепенную важность для обороны государства.

4. Заключение. Имея в виду все вышеизложенное, приходим к заключению, что устройство на Черноморском берегу станции беспроволочного телеграфа большой мощности для сообщения с Болгарией возможно, но для выполнения опытов необходимо прибегнуть к услугам военного судна Черноморского флота, а для обеспеченности этого сообщения и увеличения пользы, приносимой этой станцией, государству нужно установить ее в Севастополе.

Мое личное участие в опытах в качестве руководителя их возможно, так как в переписке о моем переходе на службу в Министерство внутренних дел со стороны Морского министерства была сделана оговорка о продолжении моих работ по беспроволочному телеграфу на флоте в течение летних вакаций. В настоящее время на усмотрение управляющего Морским министерством представлен проект устройства и дальнейшего развития беспроволочного телеграфа на флоте, в котором также ставится вопрос о необходимости устройства мощной станции беспроволочного телеграфа в Севастополе» [5].

5. Инновации в развитии связных технологий на Черноморском флоте в 1993—2002 гг.

Материал этой части статьи построен в формате цитирования доклада начальника управления связи Черноморского флота в 1991—2002 гг. контр-адмирала З. Г. Ляпина [6].

5.1. «Мобильный чемоданчик связи»

«В ноябре 1993 года у меня в кабинете два моих заместителя — капитаны 1 ранга Рябов Валерий Иванович, Елин Виктор Михайлович и я, отчаянно споря, не забывая спецтребований руководящих документов, теоретически “запихнули” все, что надо, в обыкновенный чемоданчик типа “дипломат”. Далее было выдано техническое задание на 771-й ремонтный завод средств связи, конструкторское бюро которого облагородило наши первичные чертежи. Через месяц у нас на руках был не просто дипломат, а мобильный мини-узел связи, в котором были размещены две радиостанции (передача-прием на разнесенных частотах), два комплекта спецаппаратуры и согласующие устройства с выходом на наружную антенну автомобиля. Вначале мы проверили из кабинета работу нашего устройства с узлом связи флота в симплексном режиме... а затем в дуплексном. Радиоканал выдавался на спецкоммутатор узла связи флота, с подключением на ряд флотских абонентов — спецтелефонные аппараты. Получив хорошие результаты, а также подстроив каналы связи по уровням сигналов, мы с В. М. Елиным проехали на служебном ГАЗ-2410 по городу и окрестностям Севастополя, проверяя качество и уровень сигнала, напряженность поля и нарисовав диаграмму направленности. Удовлетворившись результатами испытаний, мы решились на ходу из автомобиля позвонить в Москву — в Управление связи ВМФ. В отсутствие начальника связи исполнявший обязанности... был удивлен самим фактом — впервые в ВМФ по спецсвязи (не правительственной) велись переговоры с автомобиля и на таком удалении. Качество канала связи было на уровне 3—4 балла... Через несколько дней я говорил с Начальником связи ВМФ и, конечно, благословления на использование данного комплекса не получил. На все это нужны специспытания, длительные исследования, выполнение спецтребований, но главное — это все должно пройти через директивы, наставления, приказы вышестоящих штабов. Но получил приказание выслать чертежи, фото и сам образец в Москву. После доклада Командующему флотом о вышеизложенном он дал добро на испытания в его автомобиле. В целом он остался доволен качеством связи, но поскольку не было официального разрешения на использование этой аппаратуры — он не стал ею пользоваться. Хотя с учетом возможностей флотского пункта связи и ретрансляции на горе Ай-Петри зона покрытия связи с нашим чемоданчиком охватывала пол-Крыма. Аналог нашего устройства, более усовершенствованного с использованием космических каналов связи, появился в войсках России только в 1998 году в локальных боевых конфликтах в Чечне и Дагестане. Конечно, ни спасибо, ни поощрений в приказах,

ни премии нам не дали. Зато нас и не наказали за инициативу, за самоуправство и вольнодумство...» [6].

5.2. Пейджинговая связь на Черноморском флоте

«В июле 1996 года руководство компании “Югинфоком” обратилось ко мне с предложением провести опытовые испытания пейджинговой связи в системе связи Черноморского флота. Учитывая нестабильность финансирования флота, отсутствие централизованных поставок техники с 1991 года, а также потерю в результате раздела ЧФ 60 процентов узлов и центров связи, я согласился с этим предложением. К этому времени я уже знал о создании фирмой “Диада” в Севастополе сети пейджинговой связи, получившей лицензию Минсвязи Украины на право быть региональным оператором, оценил удобство, надежность и оперативность связи и, откровенно, как начальник связи завидовал им. И вполне естественно, ухватился за эту идею с пользой для флота, тем более, что никаких денег от флота не требовалось. Для проведения опытовых испытаний, а заодно и отработки системы вызова и оповещения должностных лиц флота была организована ведомственная сеть в регионе Севастополя и горы Ай-Петри на частоте 146,5 МГц, принадлежащей флоту. Для передачи сигналов использовалось оборудование флота, а пейджинговые приемники, компьютерное обеспечение, формирователь сигналов и два передатчика фирмы “Моторола” CP-900 были переданы в пользование компанией “Югинфоком”... Для исключения претензий спецорганов 10 пейджеров фирмы «Моторола» были проверены спецкомиссией отдела РЭБ ЧФ. Согласно их акту от 31.08.1996 года, в результате проверки в диапазоне частот 10—1000 МГц информационных паразитных излучений не выявлено и все приемники были допущены для обеспечения связи и оповещения на ЧФ. Кроме того, на мое обращение к начальнику государственной инспекции электросвязи по республике Крым и г. Севастополю г-ну Бутроменко А. И.. был получен ответ: Госинспекция электросвязи по республике Крым не имеет возражений по использованию радиочастот, закрепленных за Черноморским флотом в целях оповещения личного состава. После доклада Командующему флотом о готовности к началу опытовой работы в сети оповещения была подписана директива командующего флотом № ДК-24 от 9.09.1996 г. о создании на Черноморском флоте системы оповещения “Вызов”, предназначенной для вызова и передачи информации должностным лицам с командных пунктов. Затем были утверждены инструкция и список должностных лиц, включенных в систему. Были проведены тренировки по оповещению с фактическим сбором должностных лиц. Был достигнут норма-

тив передачи сигнала оповещения — 1 минута. Это была поистине революция в системе оповещения. Утверждаю ответственно: нигде, ни в одном крупном объединении, по крайней мере, в Военно-Морском Флоте, на то время такого не было. Система оповещения “Вызов” обеспечивала циркулярный и персональный вызов абонентов и доведение до них короткой оперативной информации по радиоканалу в зоне радиусом до 100 км от ретранслятора Ай-Петри. А это означало, что сеть пейджинговой связи охватывала города: Севастополь, Симферополь, Ялту, Евпаторию, а в перспективе и весь Крым. И уже ООО “Югинфоком” был подготовлен необходимый пакет документов для подачи в Минсвязи Украины с целью получения лицензии на вид деятельности. Вот это и обеспокоило руководство ООО “Диада”, монополиста пейджинговой связи в г. Севастополе, которое опасалось прецедента создания конкуренции в данной области. Срочно в адрес командующего ЧФ и военного прокурора Черноморского флота и ВМС Украины были направлены письма, в которых ЧФ РФ обвинялся в нарушении Закона Украины “О связи” и прав ООО “Диада”, имеющего лицензию Минсвязи Украины. Военный прокурор предписал Командующему ЧФ незамедлительно приостановить опытовые испытания пейджинговой связи ООО “Югинфоком” на частоте 146,5 МГц до получения соответствующей лицензии. В ответном письме Военному прокурору и главному инженеру ООО “Диада”... были даны подробные разъяснения, что система оповещения проходит испытания в ведомственной сети Черноморского флота, эксплуатируется для собственных нужд и законодательства Украины не нарушаются, т. к. сеть в коммерческих целях не используется. В числе абонентов этой сети, кроме должностных лиц флота, были только сотрудники УМВД г. Севастополя, прокуратуры, военкомата и технический персонал, проводящий испытания. Но в дальнейшем командующий флотом, не желая обострять отношения и сориться с Военным прокурором, приказал мне прекратить работу этой перспективной и так нужной флоту пейджинговой системы связи... Как обычно, ни я, ни мои подчиненные кроме головной боли от внедрения этой новой для флота системы связи не получили. А начальниками связи Вооруженных Сил РФ и ВМФ этот эпизод из жизни Черноморского флота вообще не был замечен, его просто не было в планах и денег на это не выделялось...» [6].

5.3. Мини-станция спутниковой связи «Nera»

«10 декабря 1997 года делегация правительства Москвы во главе с мэром Ю. М. Лужковым прибыла в город Николаев для решения вопроса... окончания сроков и финансирования флагмана Черноморского Фло-

та РФ — ГРКР “Москва”... С разрешения командующего флотом я как начальник связи вместе с начальником пресс-центра капитаном 1 ранга Грачевым А. М. обратились к Ю. М. Лужкову с просьбой закупить для флота переносной комплекс космической связи, чтобы обеспечить надежную связь командующему флотом в любое время, где бы он ни находился. Через некоторое время помощник Ю. М. Лужкова... передал на флот станцию спутниковой связи *Nera* стандарта “Инмарсат” производства Франции, уместающуюся в маленьком чемоданчике-кейсе. Ресурс использования был оплачен примерно на 1 год. Наведение на спутник осуществлялось антенной, вмонтированной в крышку кейса по максимальному уровню сигнала от спутника, а дальше по спецкодам осуществлялась синхронизация канала связи и можно было звонить в любую точку мира. В тот же день, наспех изучив инструкцию, мне пришлось на этой станции обеспечить срочные переговоры заместителя Главкома... с Главкомом ВМФ. Эффективность действия этого комплекса была неоднократно проверена и с моря, и на полевых выходах Командующего флотом.

К сожалению, оплаченный ресурс времени закончился в марте 1999 года. А для продления оплаты наши финансисты не могли найти денег, правительство Москвы такой мелочью заниматься не стало, а управление связи ВМФ на нештатную технику денег не выделяет [6].

5.4. Спутниковый абонентский терминал системы «Globalstar»

«В связи и вышеизложенным я обратился к начальнику связи Вооруженных сил РФ генерал-полковнику Залогину Ю. М. Он пообещал помочь и примерно через год мы получили на флот... спутниковый абонентский терминал системы “Глобалстар” (трубка с телескопической антенной). Система предназначена для передачи речи и данных, организации пейджинговой связи, определения местонахождения подвижных объектов, передачи коротких сообщений и экстренных вызовов. Местоопределение объектов с точностью до 300 метров производится с вероятностью 0,95 менее чем за 10 секунд. Идеология построения системы “Глобалстар” состоит в использовании методов сотовой связи при выносе в космическое пространство ретрансляторов базовых станций. Центр управления и контроля орбитальной группировкой размещен в Сан-Хосе шт. Калифорния (США), все соединения с абонентами осуществляются через наземные станции сопряжения... Мощность абонентского портативного терминала — 0,6 Вт. Командующий флотом... успешно использовал эту трубку в своей повседневной деятельности за пределами штаба флота [6].

5.5. Система транкинговой радиосвязи на Черноморском флоте

«На флоте давно назрела проблема обеспечения связью руководства флотом, командующего авиацией, командиров соединений и баз мобильными средствами связи, когда они находятся в частях и на переезде при выполнении функциональных обязанностей. Мобильные телефоны сотовой связи в то время только появились в продаже и были еще довольно дорогими. Система связи с подвижными объектами “Алтай-3М” была морально и физически устаревшей, к тому же на флоте была уже списана и демонтирована... И вот тогда мы обратили внимание на возможности системы транкинговой связи, которая позволяет при наличии ограниченного количества каналов связи обеспечить надежной связью большое число корреспондентов, при этом, она намного дешевле сотовой системы связи. Ее возможности:

- системы могут иметь от 1 до 16 каналов связи;
- обеспечивают обслуживание до 1100 абонентов (из расчета по 80—100 абонентов на каждый канал);
- могут работать в любом разрешенном диапазоне частот: 150—174 МГц, 450—700 МГц (наиболее предпочтительные диапазоны), а также на 800 и 900 МГц;
- в качестве абонентских станций позволяют использовать как обычные полудуплексные, так и дуплексные радиостанции, оснащенные дополнительными логическими модулями;
- обеспечивают связь “абонент — город” и «город — абонент» с использованием линий городской АТС;
- обеспечивают связь “абонент — абонент” по радиоканалу без использования телефонных линий, а также конференц-связь и циркулярную связь радиоабонентов;
- гарантируют приватность связи (невозможность прервать или подслушать разговор);
- позволяют иметь “приоритетных” абонентов, которым каналы связи предоставляются по первому требованию...

Заместитель командующего флотом контр-адмирал Ковшарь А. В... сразу же оценил перспективность и необходимость развития этой системы на флоте. Управляя территориально далеко размещенными объектами (заводы, арсеналы, базы, склады и др.), он должен был постоянно находиться на надежной связи со штабом флота и подчиненными. Александр Васильевич безоговорочно поддержал меня, когда мы вместе докладывали командующему флотом. В итоге, несмотря на хроническую нехватку денег на флоте, было принято решение о выделении внебюджетных средств на

закупку трех одноканальных и одной двухканальной баз, а также около 20 трубок (мобильных радиостанций) типа “Моторола” и “Кенвуд”. Кроме того, в 5 автомобилях руководства флотом были смонтированы мобильные варианты радиостанций...

Состав базовой станции:

- репитер (ретранслятор), выходная мощность — 60 Вт;
- контроллер — центральный процессор транкинговой системы, управляющий входящими и исходящими телефонными звонками на двух подсоединенных телефонных линиях;
- дуплексор, обеспечивающий возможность работы в дуплексном режиме;
- блок питания;
- приемо-передающая 2-дипольная антенна.

Одноканальные базы были установлены:

- 1) на горе Ай-Петри (высота 1240 м над уровнем моря), линия АТС “Квант” была организована по радиорелейному каналу на аппаратуре Р-405-КБ. Частота на передачу 140,675 МГц, на прием 147,650 МГц;
- 2) на 771 ремонтном заводе средств связи (высота 146 м). Выход на АТС “Квант” по телефонному каналу. Разнос частот на передачу и прием соответственно 137,875 МГц и 146,150 МГц;
- 3) на юстировочной вышке арсенала в р-не пос. Голландия (высота ок. 90 м).

Выход на АТС “Квант” [осуществлялся] по телефонному каналу. Разнос частот на передачу и прием соответственно 136,350 МГц и 141,650 МГц. Двухканальная база была смонтирована в р-не пл. Толстого на крыше флотского здания (высота ок. 70 м). Выход на АТС “Квант” по двум телефонным каналам. Частоты на передачу 139,550 МГц и 140,425 МГц, на прием 147,900 МГц и 147,675 МГц.

Итого было выделено пять номеров ведомственной АТС “Квант” с возможностью звонить по городским телефонам. Мы не использовали номера телефонов АТС г. Севастополя по двум причинам: для согласования цифровых (импульсных) каналов транкинговой системы с аналоговыми входами АТС нужно было дополнительно закупать согласующие устройства... кроме того, возникли бы организационные вопросы... Новая система мобильной связи эффективно заработала на флоте. Повторюсь — только на Черноморском флоте, так как только наш командующий адмирал Комоедов В. П. реально оценил все преимущества транкинговой связи:

1. С учетом специфического рельефа местности города Севастополя и его окрестностей и за счет географического и высотного разноразноса базовых станций было достигнуто расширение зоны уверенного приема сигналов.

2. Базовая станция, смонтированная на горе Ай-Петри, увеличила дальность связи по Крыму в радиусе до 200 км — этого не было ни на одном флоте в ВМФ.

3. Количество каналов, включенных в систему связи, позволяет иметь в сети и комфортно обслуживать до 300 абонентов.

В дальнейшем это позволило включить в нашу систему еще около 20 трубок, закупленных командирами частей дополнительно, а, кроме того... мы перепрограммировали 12 уже имеемых радиостанций береговых войск» [6].

6. Радиоуправление и радиопеленгация

6.1. Радиоуправление

В Севастополе проводились работы по радиоуправлению. Россия на заре развития радиотехники не отставала от других стран в области радиоуправления, при этом начало работ связано с Черным морем. Впервые в России возможность практического использования радиоволн для дистанционного управления начал исследовать один из зачинателей телеграфии без проводов выдающийся русский физик Н. Д. Пильчиков. В марте и октябре 1898 г. он демонстрировал опыты по радиоуправлению. Ученый разработал специальные устройства — «протекторы», — в современном понимании — фильтры, которые выделяли посылаемые сигналы управления, отфильтровывая их от мешающих сигналов. Ученому удалось заинтересовать Морское министерство и в 1902 г. были выделены средства для проведения опытов на море. С 31 августа по 4 сентября 1903 г. на Черном море происходили испытания устройства. Сигналы управления посылались передающей радиостанцией Херсонесского маяка, а принимались приборами, установленными на транспорте «Днестр». На радиопередатчике Херсонесского маяка была установлена катушка Румкорфа, дававшая искру 45 сантиметров. Камертонный прерыватель обеспечивал возбуждение колебаний требуемой частоты. На приемной радиостанции резонансные фильтры «протектора» выделяли эти колебания. При испытании присутствовали заведующий Черноморскими береговыми радиостанциями лейтенант Кедрин и заведующий судовым телеграфом лейтенант Степанов. Опыты прошли успешно — нормальная работа обеспечивалась на 60 миль. Главный командир Черноморского флота и портов Черного моря отмечал большую пользу приборов Пильчикова в отчете, направленном в Морской технический комитет [7].

Эксперименты по радиоуправлению объектами на расстоянии в апреле 1924 г. провели на Черном море сотрудники Остехбюро НТО ВСНХ профессор В. Ф. Миткевич и Н. Н. Циклинский⁴.

⁴ Радиолокационное вооружение Военно-Морского Флота России : сборник статей / Под ред. И. И. Тынянкина и В. Ф. Измайлова. М. : Научтехлитиздат, 2005. 446 с.

В 1933 г. в составе Черноморского флота находилась группа кораблей т. н. «волнового управления», которые в дальнейшем в основном использовались в качестве мишеней⁵.

6.2. Радиопеленгация

Осенью 1914 г. на вооружение российского флота стали поступать радиопеленгаторы конструкции И. И. Ренгартена. Первый на Черноморском флоте радиопеленгатор был установлен в Севастополе на Мекензиевых горах. Второй пеленгатор в Крыму планировалось установить в Керчи в 1915 г. Но географические особенности театра затрудняли производить пеленгацию в любой части Черного моря. Поэтому подчиненными В. Н. Кедрина в дополнение к пеленгованию широко применялось определение местоположения объектов по т. н. способу шунтов. Он заключался в одновременном измерении уровня сигнала от объекта на нескольких радиостанциях и получении при этом данных, необходимых для определения местоположения объекта с вполне удовлетворительной точностью⁶.

7. Заключение

Оптический телеграф успешно использовался на Черноморском флоте с 20-х гг. XIX в. до Крымской войны 1853—1855 гг. На Черноморском флоте впервые был испытан подводный телефон конструкции Е. В. Колбасьева. Опыты беспроводного телеграфирования 1899 г., произведенные на Черноморском флоте под руководством А. С. Попова, впервые в мировой практике были проведены в условиях практической эскадры (во время стрельбы с обоих судов, между которыми поддерживалась связь). В результате опытов беспроводного телеграфирования 1901 г., произведенных на Черноморском флоте под руководством А. С. Попова, и использования т. н. «сложных схем» (схем с согласованием) была достигнута дальность связи 80 миль (около 150 км). Черноморский флот в 90-е гг. XX в. являлся инициатором многих инноваций, которые впоследствии были внедрены на Военно-Морском Флоте Российской Федерации. Анализ инфографики (рис. 1), выполненной на основе рекомендаций [8], показывает, что развитие средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте в советский период практически не нашло отражения в открытых источниках.

⁵ Вальданов А. В. Краткая история создания радиоэлектронных средств ВМФ. В сб. : Служим отечеству. Ч. 4. Севастополь, 2005. С. 468—481.

⁶ Биккенин Р. Р., Глущенко А. А., Партала М. А. В. Н. Кедрин — первый начальник Службы связи Черного моря. В сб. : Очерки о связистах российского флота. СПб., 1998. С. 91—120.

Список литературы

1. Бренев И. В., Лунёв П. А. Новые сведения о телеграфе Кулибина // Вопросы истории естествознания и техники. 1980. № 1. С. 121—125.
2. Родионов В. М. Зарождение радиотехники. М. : Наука, 1985. 239 с.
3. Головин Г. И., Эпштейн С. Л. Пионер телефонии в русском флоте // Морской сборник. 1948. № 10. С. 79—84.
4. Ермолов П. П. Периодизация и основные объекты в истории исследований по радиотехнологиям в Крыму. В сб. : 17-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007) : материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 10—14 сент. 2007). — Севастополь : Вебер, 2007. Т. 1. С. 39—44.
5. А. С. Попов. Сборник документов к 50-летию изобретения радио / Сост. Г. И. Головин, Р. И. Карлина ; под ред. М. А. Шателена, И. Г. Кляцкина, В. В. Данилевского. Л. : Газетно-журнальное и книжное изд-во, 1945. 253 с.
6. Ляпин З. Г. Инновации в развитии связных технологий на Черноморском флоте (1993—2002 гг.). В сб. : 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010) : материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 13—17 сент. 2010). Севастополь : Вебер, 2010. Т. 1. С. 85—88.
7. Лунёв П. А. Севастополь и Черноморский флот в отечественной радиотехнике // Из истории энергетики, электроники и связи. 1984. Вып. 14. С. 178—185.
8. Ермолов П. П. Инфографика — важный инструмент визуализации и снижения размерности контента в историографии науки и техники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 124—151.

Сведения об авторе

Ермолов Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, профессор Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ СВЯЗИ, РАДИОУПРАВЛЕНИЯ И РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ФЛОТЕ

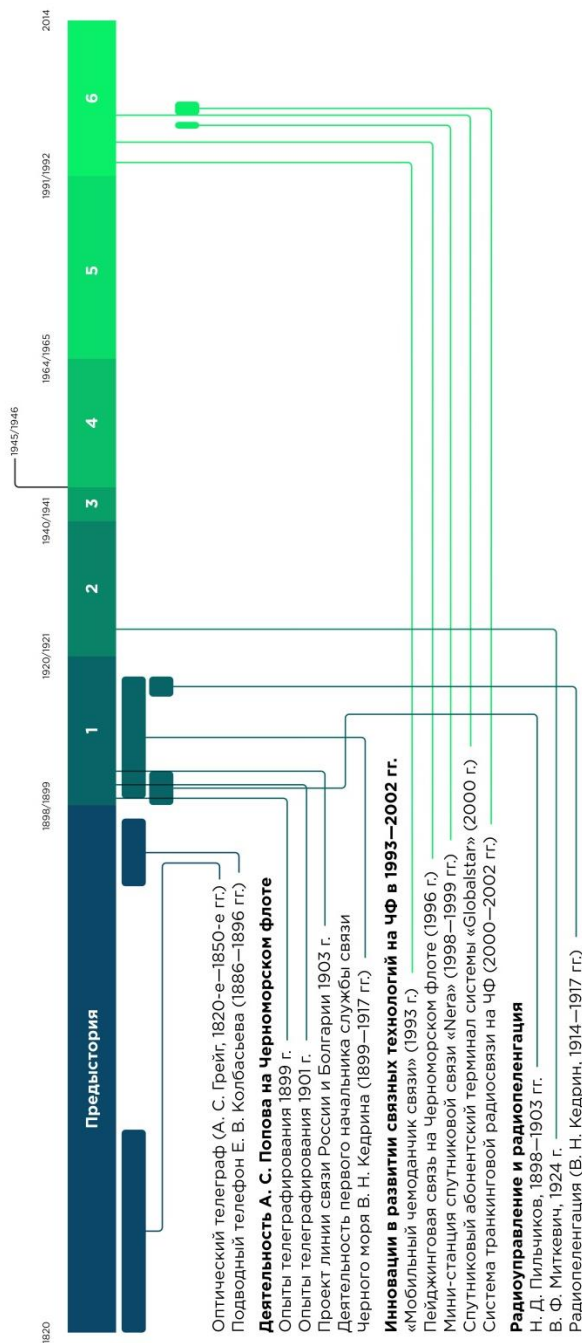


Рис. 1. – Fig. 1.

History of the Development of Communications, Radio Control and Radio Direction Finding in the Black Sea Fleet (1826–2002)

P. P. Yermolov

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

ppyermolov@mail.sevsu.ru

Received: January 10, 2025

Peer-reviewed: February 17, 2025

Accepted: March 10, 2025

Abstract: Based on information scattered in various sources, the article presents: the history of the development of the optical telegraph, the creation of the underwater telephone by Ye. V. Kolbasyev, the activities of A. S. Popov in the Black Sea Fleet (BSF), innovations in the development of communication technologies in the BSF in 1993–2002, as well as information on work in the field of radio control and radio direction finding in the BSF. The results of the study are presented in the compendium format, summarized in a table and illustrated with info graphics.

Keywords: optical telegraph, Ye. V. Kolbasyev, A. S. Popov, paging communication, “Nera” station, “Globalstar” system, trunking radio communication.

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, “History of the Development of Communications, Radio Control and Radio Direction Finding in the Black Sea Fleet (1826–2002),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 474–494, 2025, doi: 10.21227/w7v2-2j58. (In Russ.).

References

- [1] I. V. Brenev and P. A. Lunev, “New information about Kulibin’s telegraph,” *Studies in the History of Science and Technology*, no. 1. pp. 121–125, 1980. (In Russ.).
- [2] V. M. Rodionov, *The origin of radio engineering*, Moscow: Nauka, 1985. (In Russ.).
- [3] G. I. Golovin and S. L. Epshteyn, “A pioneer of telephony in the Russian fleet,” *Morskoy sbornik*, no. 10, pp. 79–84, 1948. (In Russ.).
- [4] P. P. Yermolov, “Periodization and main objects in the history of research on radio technology in Crimea,” in *17th International Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology” (CriMiCo’2007)*, Sevastopol, September 10–14, 2007, Sevastopol: Weber, pp. 39–44, 2007. (In Russ.).
- [5] A. S. Popov. *Collection of documents for the 50th anniversary of the invention of radio*, Leningrad: Newspaper, magazine and book publishing house, 1945. (In Russ.).
- [6] Z. G. Lyapin, Innovations in the development of communications technologies in the Black Sea Fleet (1993–2002), in *20th Int. Crimean Conf. “Microwave Technology and Telecommunication Technologies” (CriMiCo’2010)*, Sevastopol, September 13–17, 2010, Sevastopol: Weber, pp. 85–88, 2010. (In Russ.).

- [7] P. A. Lunev, “Sevastopol and the Black Sea Fleet in Domestic Radio Engineering,” *From the History of Power Engineering, Electronics and Communications*, iss. 14, pp. 178–185, 1984. (In Russ.).
- [8] P. P. Yermolov, “Info Graphics Are an Important Tool for Visualization and Dimensionality Reduction in the Historiography of Science and Technology,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 124–151, 2025. (In Russ.).

Information about the author

Pavel P. Yermolov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

УДК 621.37-621.39(091)

Функциональные особенности газонаполненных ламповых триодов 20-х годов XX века

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 10 декабря 2024 г.

Отрецензировано: 14 декабря 2024 г.

Принято к публикации: 15 декабря 2024 г.

Аннотация: В начале 20-х годов XX века возникла потребность в радиолампе, которая бы обладала высокой чувствительностью без использования регенерации. С этой целью рядом ученых были проведены экспериментальные исследования по влиянию газовых сред на функционирование лампового триода в качестве детектора. Лампы такого типа называются «мягкими лампами» и часто используются в детекторных каскадах радиоприемников. В работе показано, что после большого числа экспериментов с разными газами было установлено, что результат может быть достигнут, если в лампах использовать пары легко испаряющихся металлов вместо газов. В этом случае необходимо в лампе обеспечить газообразную среду, обладающую чрезвычайно низким ионизирующим потенциалом. Это позволяет лампе эффективно функционировать в качестве детектора при минимальном напряжении на аноде от 8 до 10 В. Для таких детекторов подходящей средой оказался сплав натрия и калия.

Ключевые слова: мягкие лампы, газонаполненный ламповый триод, газы, ионизация, пары легко испаряющихся металлов, сплав натрия и калия.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Функциональные особенности газонаполненных ламповых триодов 20-х годов XX века // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 495—511.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Функциональные особенности газонаполненных ламповых триодов 20-х годов XX века / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 495—511.

1. Введение

подавляющее количество радиоламп, используемых в радиотехнике, имеют горячие катоды и откачиваются до настолько высокого вакуума,

насколько это возможно, чтобы использовать «чисто электронный разряд». На рынке, тем не менее, имеется значительное разнообразие ламп. Присутствуют некоторые лампы с горячими, а некоторые с холодными катодами, в которые введено достаточное количество газа или какого-либо пара, чтобы фундаментальным образом изменить характеристики лампы. Анодный ток в таких лампах в основном представляет собой ток ионизации газа.

Чистый электронный разряд высоковакуумных радиоламп типов 201A и 301A¹, будучи легко и точно управляемым, делает эти лампы весьма пригодными для работы по усилению, при котором отсутствие искажений сигналов является основным требованием. Однако такие лампы как детекторы имеют сравнительно очень низкую чувствительность. В 20-е годы XX века важность получения какого-либо устройства с более высокой чувствительностью обнаружения сигнала (в дальнейшем — обнаружения), чем у высоковакуумных трехэлектродных ламп, была очень велика. Популярное использование радио в то время было связано с повсеместным внедрением «регенеративного приема», который, в принципе, представляет собой схему для увеличения чувствительности обнаружения трехэлектродных ламп. Лампа, включенная в регенеративную схему, имеет высокую эффективность, но здесь чувствительность достигается за счет близкого приближения к созданию автоколебаний в устройстве, которые, если не принять специальные меры, могут создавать деструктивные помехи соседним приемникам за счет повторного излучения. Поэтому в тот период времени требовалась лампа, имеющая более высокую чувствительность сама по себе без использования регенерации. Такое устройство было необходимо для продолжения роста популярности и обслуживания радиовещания.

2. Газонаполненные радиолампы

Чувствительность обычных ламп можно значительно повысить, если ввести в лампы небольшое количество газа, который, ионизируется при определенном напряжении на аноде и вызывает резкое увеличение анодного тока, отчасти из-за новых электронов (отрицательные ионы), высвобождающихся таким образом, и частично из-за нейтрализации отрицательного пространственного заряда положительными ионами газа. Лампы такого типа называются «мягкими лампами» и часто используются в детекторных каскадах радиоприемников. Радиолампа UV-200² относится к этому типу (рис. 1).

¹ Ламповые триоды RCA под торговой маркой *Radiotron*.

² Первыми лампами, которые RCA начала продавать в 1920 году, являются детекторная лампа триод UV200 с наполнением аргон и усилительная лампа триод UV201 ($\mu = 8$). Производитель — General Electric (GE). Обе лампы работают при токе накала 1 А при напряжении 5 В. Лампы имеют



Рис. 1. Радиолампы RCA Radiotron «мягкого типа»: а — детекторная лампа триод GE UV200 с наполнением аргоном, б — усилительная лампа триод Westinghouse UV201 без наполнения газом (справа). 1920 г. Варианты цоколей: в — латунное основание UV с керамической изолирующей вставкой и короткими штифтами (1921—1924), г — бакелитовое короткое основание UV (1924—1925).

Fig. 1. RCA Radiotron “soft type” radio tubes: а – GE UV200 triode detector tube with argon filling and Westinghouse: б – UV201 triode amplifier tube without gas filling (1920).

Base options: в – brass UV base with ceramic insulating insert and short pins (1921–1924), г – bakelite short UV base (1924–1925)

Однако для практической реализации «мягкие лампы» должны содержать газ только при очень низком давлении. Если давление газа увеличить до точки, при которой чувствительность обнаружения будет максимальной, устройство станет нестабильным из-за практически неизбежных изменений давления газа и постоянного поглощения, а также выделения газа металлическими частями и стеклянными стенками ламп при изменении температуры. Неустойчивая лампа требует постоянной регулировки потенциала смещения на сетке и на практике бесполезна.

Неустойчивое функционирование было устранено в некоторых экспериментальных лампах с газовым содержанием, стабильность была достигнута благодаря тщательному изготовлению ламп и использованию критического давления газа, но такие лампы не показали свою эффективность и не производились. Под этим подразумевается невозможность разработать практическую производственную процедуру для изготовления большого количества таких ламп точно или даже почти одинаково. Каждая лампа требует индивидуального внимания специалиста и настройки при изготовлении.

Эти замечания показывают, что практическая радиолампа при работе должна быть чувствительной, стабильной и воспроизводимой в промышленном масштабе.

грушевидную форму с кончиком наверху баллона. Цоколь имеет латунную оболочку с керамической вставкой, в которую вставлены штифты. Каннингем (*Cunningham*) при производстве дал этим лампам другое название C-300 и C-301.

Лампы, в которых используется ионизация, имеют еще одно преимущество перед лампами с чисто электронным разрядом помимо более высокой чувствительности. После прохождения точки ионизации ток анода таких ламп становится очень большим, возможно, даже несколько сотен миллиампер в лампах обычного размера детектора. Эти значения достигаются при напряжениях на аноде порядка 18 или 20 В. С другой стороны, чтобы пропускать такие токи через высоковакуумную лампу, полностью зависящую от термоэлектронной эмиссии, необходимо использовать гораздо более высокие напряжения на анодах — в обычной практике от 90 В и выше.

Конечно, из соображений удобства и затрат выгодно поддерживать требуемое напряжение на аноде как можно более низким. Однако ни одно из упомянутых преимуществ не может перевесить неустойчивое поведение лампы. Чтобы воспользоваться этими преимуществами, прежде всего необходимо обеспечить стабильность работы. Этот результат может быть достигнут при использовании в лампах паров металлов вместо газов.

Когда в детекторной лампе должен использоваться газ, почти всегда выбирают один из так называемых «благородных газов» («редких атмосферных газов»): гелий, аргон, криптон, неон или ксенон. На практике используются только гелий, аргон и неон. Эти газы очень инертны и поэтому не вступают в реакцию с электродами или другими частями ламп. Они одноатомны, то есть каждая молекула состоит только из одного атома, что заставляет их ионизироваться, то есть распадаться под электронной бомбардировкой более простым способом, чем многоатомные молекулы. Их точки ионизации относительно высоки: для гелия от 25 до 17 или 18 В.

Это значение напряжения представляет собой барьер, через который должен пройти электрон для получения достаточной энергии, чтобы разбить атом конкретного газа на отрицательный и положительный ион. Это напряжение, по-видимому, является критическим напряжением «В», которое в цепи детекторной лампы должно быть подано на лампу, чтобы она работала как чувствительный детектор. Фактически, лучшее напряжение для батареи «В» обычно оказывается в несколько вольт, например, от 2 до 5 В, что выше потенциала ионизации содержащегося в лампе газа. Следует заметить, что эти необходимые напряжения «В» намного ниже, чем те, которые используются в обычных высоковакуумных лампах.

3. Использование паров металла в радиолампах

Физики, стремясь улучшить характеристики газосодержащих ламп, естественным образом перешли от благородных газов к парам легко испа-

ряющихся металлов, таких как натрий, калий, цезий или ртуть, поскольку, во-первых, пары этих металлов одноатомны, во-вторых, в одном месте они не поглощаются стеклом или металлом так широко и неравномерно, как газы, и, в-третьих, они имеют очень низкое напряжение ионизации, в некоторых случаях значительно ниже пяти вольт.

Без сомнения, каждая лаборатория, заинтересованная в производстве электронных ламп, в начале 20 годов XX века более или менее широко экспериментировала с этими металлами в качестве наполнителей для ламп. Некоторые результаты были опубликованы, некоторые держались в секрете. В некоторых случаях пары попали в лампы, содержащие регулирующие металлические детали, в других случаях использовались совершенно новые металлические детали и новые принципы работы ламп.

Рассмотрим процесс регулирования лампы, в которую введены пары металла. Для этой цели можно использовать обычную лампу типа 201А (рис. 1б) или 301А. Наконечник стеклянного баллона лампы сбивается и приваривается новая стеклянная выпускная трубка. Этот выход соединяется с боковой трубкой, содержащей выбранный металл, а другой конец трубки — с набором высоковакуумных насосов. Когда во всем устройстве создается высокий вакуум (нить накаливания и все стеклянные части хорошо нагреты для удаления воздуха и водяного пара), капле жидкого металла дают стечь в трехэлектродную лампу, которая затем герметично запаивается. Теперь лампу можно использовать как любую обычную лампу в приемном наборе, однако ее характеристики через короткий промежуток времени сильно изменятся. На рис. 2 показана необходимая аппаратура для заполнения лампы металлическими парами в лабораторных условиях [1].

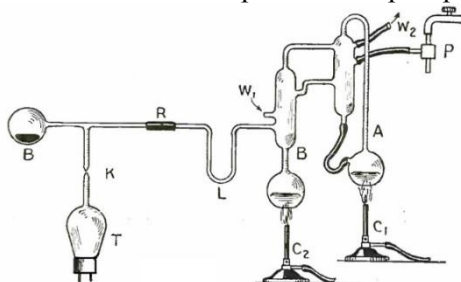


Рис. 2. Аппарат для вакуумирования ламп: P — аспирационный водяной насос; A и B — ртутные диффузионные вакуумные насосы, установленные в тандеме; C_1 и C_2 — горелки Бунзена; W_1 и W_2 — вход и выход воды; R — гибкое резиновое соединение; K — сужение для уплотнительной трубки; B — резервуар с жидким металлом; T — вакуумная лампа [1].

Fig. 2. The apparatus for exhausting tubes: P — the water aspirator pump; A and B — mercury diffusion vacuum pumps in tandem; C_1 and C_2 — Bunsen burners; W_1 and W_2 — water inlet and outlet; R — flexible rubber connection; K , constriction for sealing tube; B — reservoir with liquid metal; T — vacuum-tube [1]

В условиях эксперимента для заполнения лампы металлическими парами следует принять во внимание, что потребуется определенное количество опытных стеклодувов, а также необходимые вакуумные насосы, которые относительно дорогие.

4. Жидкие металлы

Для максимального облегчения заполнения ламп металлом следует использовать жидкий металл. Это требование ограничивается двумя вариантами: один — ртуть, второй — сплав натрия и калия, оба являются подвижными жидкостями. Из них этот сплав более подходит для настоящей цели, поскольку его напряжение ионизации менее 4 В, тогда как напряжение ионизации ртути составляет около 10,5 вольт.

Сплав натрия и калия можно получить, сплавив 24 части металлического натрия и 40 частей металлического калия. Эти металлы легко и самопроизвольно воспламеняются во влажном воздухе, образуя взрывоопасную смесь. Поэтому сплав должен изготавливаться в лампе, из которой удален воздух. Чем больше воды положить в такой калиевый огонь, тем сильнее он горит, поскольку вода разлагается металлом, выделяя водород, который воспламеняется от тепла реакции. С этими металлами следует обращаться только с величайшими мерами предосторожности. По этим причинам подобные эксперименты рекомендуется проводить при наличии полного лабораторного оборудования.

После того, как лампа подготовлена описанным способом, ее можно использовать в обычном приемном комплекте. Зажженная нить накаливания значительно нагревает лампу, испаряя часть сплава и увеличивая плотность пара, состоящего из атомов натрия и атомов калия, который занимает лампу. После достижения определенной рабочей температуры плотность этого пара остается постоянной, то есть количество атомов металла в каждом кубическом сантиметре остается фиксированным. Электроны из нити проходят через сетку на анод под совместным воздействием напряжений анода и сетки. Эффективное напряжение, притягивающее электроны, изменяется в зависимости от потенциала сетки, а напряжение анода остается постоянным. Прежде чем электроны, проходящие через этот перепад напряжения, приобретут определенную минимальную энергию — энергию ионизации, — они отскакивают от таких атомов металла, с которыми могут удариться, никак не затрагивая их. После того как электрон достигнет критической энергии ионизации, он разобьет любой атом, с которым столкнется. Как уже указывалось, это ионизирующее действие объясняет, как в этих лампах достигаются высокие значения тока анода при более низких напряжениях, чем в высоковакуумных лампах.

Некоторые данные, взятые из реальных испытаний ламп из натриево-калиевого сплава, показали, что они являются отличными детекторами. При эксплуатации их чувствительность в три-четыре раза выше, чем у первоклассных газонаполненных ламп, работающих в лучших условиях. Они не критичны в настройке по приложенному напряжению, и наилучшие результаты достигаются при напряжении на аноде всего 10 В. Эти лампы обеспечивают удовлетворительную работу при использовании в схеме с резистором утечки сетки 2 МОм и конденсатором 0,0003 мкФ. Эти элементы имеют довольно длительный срок службы и стабильны.

Лампы такого типа также хорошо усиливают не внося искажений и могут использоваться в схемах усилителей, давая результаты от 10-вольтовой батареи, равные результатам усилителя с жесткими лампами на 45 или 90 В. Использование сплава приводит к явному улучшению ламп во всех отношениях. Конечно, такие лампы при использовании в регенеративной схеме будут колебаться и производить переизлучение, но в этом отношении они не хуже обычных радиоламп. Однако, рассматривая эти лампы с коммерческой точки зрения, следует сказать, что их производство включает в себя дорогостоящую и в некоторой степени опасную операцию, в отличие от изготовления обычных ламп.

5. Преимущества ламп с металлическими парами

Преимущества ламп с металлическими парами были известны в 1923 г. во многом благодаря работам профессора Чарльза Книппа (*Charles Tobias Knipp*, 13.08.1869—06.07.1948) и доцента Х. А. Брауна (*Hugh A. Brown*) из Университета Иллинойса (*University of Illinois*). Их результаты, несомненно, получили бы более широкое применение, если бы не особенность, связанная с дополнительными проблемами и затраты на производство таких ламп.

В работе [2] этих авторов представлены результаты экспериментального исследования о влиянии различных остаточных газов в трехэлектродных электронных лампах на их характеристики и работу в качестве детекторов и демодуляторов. Было обнаружено, что введение некоторых газов в трехэлектродную лампу позволяет улучшить ее чувствительность как детектора. Аргон при давлении 0,005 мм рт. ст. дает наибольшее улучшение детектора. В результате экспериментов авторами было установлено влияние газов на критические характеристики детекторных ламп. Данные, относящиеся к этим экспериментам, обобщены в виде кривых на рис. 3 [3].

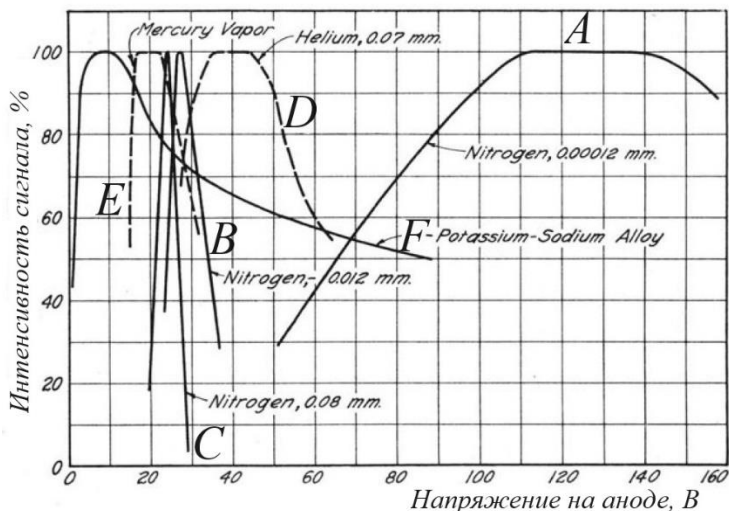


Рис. 3. Кривые зависимости интенсивности сигнала в зависимости от напряжения на аноде ламп при содержании в них различных паров при разных давлениях. Следует отметить, что лампы, содержащие калий-натриевый сплав, дают максимальную интенсивность сигнала при сравнительно низком напряжении на аноде [3].

Fig. 3. Curves of signal intensity versus voltage at the anode of lamps containing various vapors at different pressures. It should be noted that uses containing a potassium-sodium alloy give maximum signal intensity at a relatively low anode voltage [3]

Кривые на рис. 3 показывают, насколько критичной становится регулировка напряжения на аноде для воздуха, азота, неона и т. д. при повышении давления внутри лампы. Следует отметить, что гелий, имеющий более высокий ионизирующий потенциал, чем только что упомянутые газы, обеспечивает наилучшую работу детекторной лампы при соответственно более высоких напряжениях на аноде, в то время как пары ртути из-за своего более низкого ионизирующего потенциала заставляют лампу работать лучше всего при соответственно более низких напряжениях на аноде. Однако допустимое процентное изменение напряжения на аноде для паров ртути без изменения слышимости оказалось больше, чем для других газов, за исключением гелия.

Кривые на рис. 3 лучше всего отображают некоторые результаты большого числа проведенных авторами [4] экспериментов, и позволяют сделать некоторые интересные выводы. Когда вакуум очень высок, то для получения максимального отклика на принимаемые сигналы необходимо высокое напряжение на аноде, как показано кривой А. Обращает на себя внимание то, что при давлении 0,00012 мм рт. ст. напряжение на аноде

может составлять от 110 до 140 В без изменения слышимости отклика в приемнике. Когда давление увеличивается до 0,012 мм рт. ст. (газ азот), напряжение на аноде для максимального отклика сигнала снижается с 110 до 28 В. Кроме того, характеристические кривые напряжения сетки и тока анода более крутые для давления кривой *B*, чем для давления *A*. Это означает, что ток анода и, следовательно, отклик сигнала больше при небольшом изменении напряжения сетки для более низкой степени вакуума. Авторы [4] обнаружили, что наилучшее обнаружение достигается при давлении около 0,005 мм рт. ст. и что чувствительность лампового детектора падает при повышении или понижении давления от этого значения. На рис. 3 представлены полученные из эксперимента зависимости интенсивности сигнала в процентах от величины напряжения на аноде, состава и давления паров в баллоне лампы.

Кривые *A*, *B* и *C* показывают, что по мере снижения давления для достижения наилучшего отклика лампа становится все более «критической» при регулировке напряжения на аноде. Однако кривая *D* показывает, что при использовании гелия давление может быть намного выше и лампа будет гораздо менее критичной, но напряжение на аноде должно быть выше, чем для паров ртути. В случае паров ртути лампа менее критична, и напряжение на аноде ниже, чем у *C* или *B*. Очень своеобразное и интересное свойство газа называется его «ионизирующим потенциалом», при котором газ впадает в своего рода резонанс. Этот ионизирующий потенциал у гелия на 10 В выше, чем у азота или воздуха, и на 7 В ниже у паров ртути. Этот факт, кривые *C*, *D* и *E* и многие другие кривые привели авторов исследования к выводу, что, если в вакуумную лампу ввести пар металла, имеющий очень низкий ионизирующий потенциал, она будет функционировать как детектор с минимальным анодным напряжением и будет обладать некритическими характеристиками.

В несколько ламп был введен сплав калия с ионизирующим потенциалом 4 В, и результаты далеко превосходили все ожидания. Для достижения наилучших результатов напряжение на аноде составляло от 8 до 10 В, и его можно было изменять в гораздо большем диапазоне, чем для любой другой лампы, содержащий газ. Это наглядно показано на кривой *F*, рис. 3.

Кроме полученных выше результатов было обнаружено, что по мере увеличения давления остаточного газа напряжение на аноде, необходимое для наилучшей слышимости отклика сигнала, которое называют «рабочим напряжением», изменяется в виде кривой обратной зависимости, как показано на рис. 4 [3].

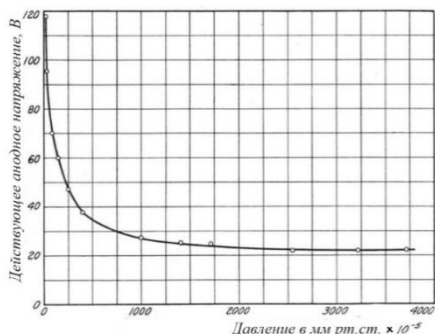


Рис. 4. Изменение величины напряжения на аноде для наилучшей слышимости отклика сигнала в зависимости от давления остаточного газа [3, с. 8].

Fig. 4. Changing the voltage at the anode for better audibility of the signal response depending on the pressure of the residual gas [3, p. 8]

Исследователи установили, что если в лампе обеспечить газообразную среду, обладающую чрезвычайно низким ионизирующим потенциалом, то лампа может эффективно функционировать как детектор при минимальном напряжении на аноде.

Насколько чувствителен такой ламповый детектор, показали сравнительные испытания, которые были тщательно проведены на ряде щелочных ламп. Было обнаружено, что они дают в $3\frac{1}{2}$ —5 раз более громкий отклик в телефоне при слабом зуммере, модулирующем принимаемые токи и затухающие волновые токи, чем аналогичные лампы, используемые в качестве детекторов, содержащих газы. В случае ламп, содержащих газ, это сравнение было проведено при напряжении на аноде в диапазоне от 8 до 10 В (обратная связь цепи анода к отрицательной нити) для каждой из ламп с парами щелочных металлов для напряжений на анодах, тщательно отрегулированных для достижения наилучших результатов. Непосредственно измеренная слышимость принимаемых токов была в 5,5 раз выше стандартной лампы при приеме довольно слабого сигнала.

6. Эффект повышения температуры нити накала

Если в лампе содержится большое количество газа, появляются характерные «горбы» характеристических кривых газосодержащих ламп. Если же температура нити существенно увеличивается, эти горбы исчезают, и точки насыщения не достигаются до тех пор, пока напряжения на сетке не достигнут положительных значений. Эти результаты показаны на рис. 5а и 5б. при увеличении напряжения накала с 4,5 до 5 В (кривая для 60 В на пластине остается прямой до положительного потенциала сетки 7 В).

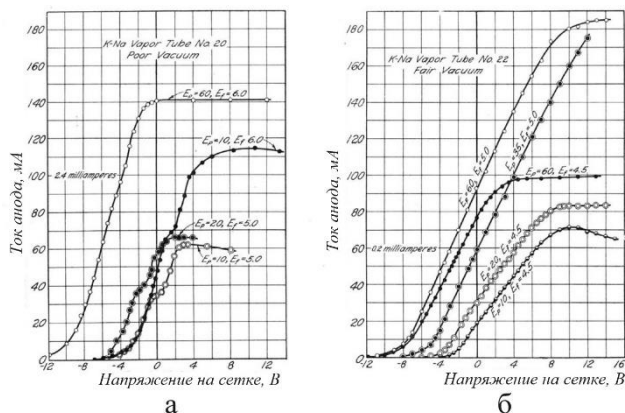


Рис. 5. Анодно-сеточные характеристики в зависимости от повышения напряжения нити накала E_f лампового триода, заполненного парами калия-натрия для образцов: а — No. 20 ($E_f = c$ 5В до 6В), б — No. 22 ($E_f = c$ 4,5В до 5В) [3, с. 16].

Fig. 5. Anode-grid characteristics depending on the increase in filament voltage E_f of a lamp triode filled with potassium-sodium vapor for samples: а – No. 20 ($E_f = c$ 5V до 6V), б – No. 22 ($E_f = c$ 4,5V до 5V) [3, p. 16]

На рис. 6а для той же лампы напряжение накала было увеличено до 5,5 В при потенциале анода 100 В. Это замеченное свойство было дополнительно исследовано путем получения дополнительных характеристических кривых нескольких других ламп, таких как на рис. 6б, в которых потенциал анода составлял 350 В.

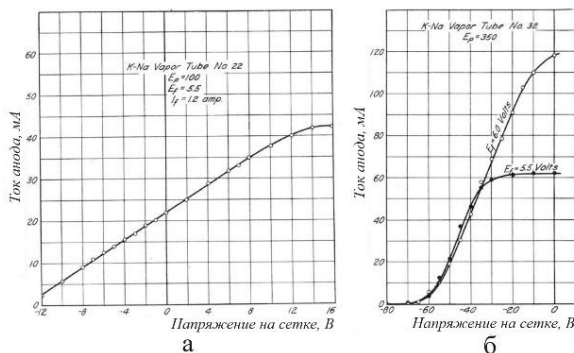


Рис. 6. Анодно-сеточные характеристики в зависимости от повышения напряжения нити накала E_f лампового триода, заполненного парами калия-натрия для образцов: а — No. 20 ($E_f = 5,5$ В; $E_p = 100$ В), б — No. 22 ($E_f = c$ 5,5В до 6В; $E_p = 350$ В) [3, с. 17].

Fig. 6. Anode-grid characteristics depending on the increase in filament voltage E_f of a lamp triode filled with potassium-sodium vapor for samples: а – No. 20 ($E_f = 5,5$ V; $E_p = 100$ V), б – No. 22 ($E_f = c$ 5,5V до 6V; $E_p = 350$ V) [3, p. 17]

Кривая анодно-сеточной характеристики для лампы *Radiotron* мощностью 5 Вт показана для сравнения на рис. 7. Можно заметить, что эта кривая имеет примерно такой же наклон, как ранее рассмотренные лампы. Это указывает на то, что повышенная температура нити накаливания делает пары щелочи более активными и эффективными и, следовательно, вакуумные лампы, содержащие пары щелочи при высоких давлениях пара, обладают характеристиками ламп усилителей с высоким вакуумом.

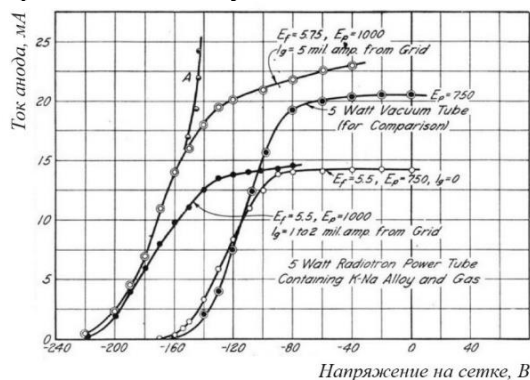


Рис. 7. Анодно-сеточные характеристики 5 Вт лампового триода *Radiotron*, заполненного парами натрия [3, с. 18].

Fig. 7. Anode-grid characteristics of a 5 W Radiotron tube triode filled with sodium vapor [3, p. 18]

Лампу *Radiotron* мощностью 5 Вт с очень горячей нитью накала заполнили парами щелочи, после этого было получено несколько характеристических кривых, как показано на рис. 7. Ожидалось, что повышенная температура нити накала даст еще лучшие кривые при высоких напряжениях на пластине, но, как показано, насыщение достигалось при значительных отрицательных напряжениях сетки. Кроме того, ток накала должен был быть уменьшен до уровня ниже нормального при высоких напряжениях на анодах, иначе ток на них ниже критического отрицательного напряжения сетки будет постепенно увеличиваться, вызывая перегрев анодов, как показано на кривой *A* (рис. 7). При высоких температурах нити накала ток вытекал из сетки при отрицательных потенциалах сетки, но ток сетки был равен нулю при более низких температурах нити накала и тек в сетку при ее нулевом и положительном напряжениях. Вакуум в этой лампе был настолько низким, что можно было получить тлеющий разряд при напряжении 300 В и с холодной нитью накала. Но при использовании нити накаливания действие паров щелочи даже при ее высоком давлении было достаточно сильным, чтобы устранить тлеющий разряд и обеспечить сносную работу лампы при использовании достаточно высо-

ких отрицательных потенциалов сетки. В случаях кривых на рис. 6а и 6б вакуум был от удовлетворительного до хорошего, а действие паров щелочи было таким, что обеспечивало высокие характеристики усилителя. Реальные характеристики этих ламп в высоковольтных речевых усилителях авторами работы [3] не анализировались. Значительные анодные токи, полученные при низких напряжениях анода, и крутой наклон этих кривых низкого напряжения указывают на то, что лампы будут функционировать как детекторы при низких потенциалах анодов. Установлено, что для получения ламп с плавными характеристическими кривыми при нормальной и ниже нормальной температуре накала вакуумирование необходимо производить как можно более полное, как и при изготовлении ламп усилителя высокого вакуума.

7. Особенности газовой детекторной лампы

Характеристическая кривая паров ртути на рис. 3 показывает, что металлические пары, обладающие очень низким ионизирующим потенциалом, не только будут работать при низких потенциалах анода, но также не будут иметь решающего значения с точки зрения регулировки напряжения на аноде. Пары некоторых щелочных металлов, а также некоторых сплавов этих металлов имеют очень низкий ионизирующий потенциал. Среди них выделяется сплав калия и натрия, пары которого имеют ионизирующий потенциал 4 В или меньше. Небольшое количество этого материала было введено в несколько вакуумных ламп. Кривая E на рис. 3 типична для полученных результатов. Помимо этих результатов были получены и другие, совершенно неожиданные.

Одной из наиболее важных особенностей детекторной лампы является степень критической регулировки напряжения на аноде и тока накала [3]. Известно, что низковакуумные лампы, содержащие азот, воздух и т. п. (см. рис. 3) весьма критичны. Было обнаружено, что лампы с парами щелочей гораздо менее критичны, несмотря на низкое напряжение на аноде, необходимое для достижения наилучшего КПД. Тщательные испытания были проведены на нескольких лампах, используемых в качестве детекторов в лабораторных схемах и принимающих модулированные незатухающие волны от передатчика. Измерения интенсивности отклика телефона производились путем сопоставления интенсивности принимаемого сигнала с другим сигналом, который можно было ослабить в определенных пропорциях. На основе этого можно рассчитать сравнительную слышимость [5, с. 337, 347]. Соединения для модифицированного метода проведения этих сравнений показаны на рис. 8 и использовались в тестах на ра-

ботоспособность детектора. В этом случае термин «рабочее напряжение» будет означать напряжение на аноде, при котором лампа дает наиболее громкий отклик в качестве детектора затухающих или незатухающих колебательных токов, аналогичных тем, которые возникают в приемных цепях. Генератор на вакуумной лампе О (рис. 8) генерирует незатухающие колебательные токи, модулируемые зуммером в лабораторных контурах. Детекторная лампа помещается в схему тестирования, как показано на рис. 8. Дроссельная катушка *A* с очень высоким импедансом и конденсатор *C* емкостью 1 мкФ используются для обеспечения потенциала постоянного тока на аноде лампы. Измерители слышимости *M* и *N* относятся к типу с постоянным импедансом. Дроссель необходим, поскольку несмотря на то, что полное сопротивление измерителя слышимости и телефонов является постоянным, омическое сопротивление таковым не является. Непосредственные измерения «времени слышимости» можно выполнить либо на лампе *D*, либо на лампе *D_s*, поворачивая шкалу на *M* до тех пор, пока сигнал не станет просто неслышным, а затем зафиксировать «время слышимости» на калиброванном циферблате.

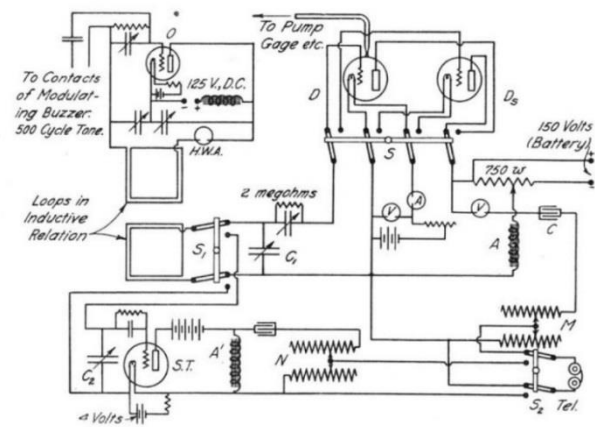
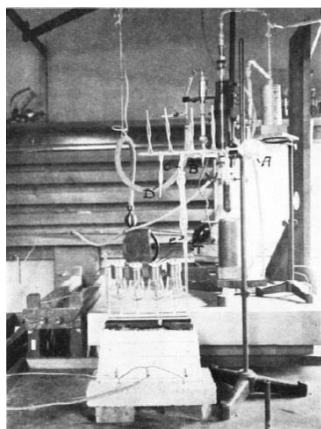


Рис. 8. Устройство для откачки и заполнения ламп (слева).

Стандартная схема для сравнительных тестов слышимости [3, с. 11, 23].

Fig. 8. A device for pumping and refilling tubes (on the left). Arrangement of apparatus for evacuating and priming tubes. Standard circuit for audibility comparison tests [3, p. 11, 23]

Однако этот метод измерения неудовлетворителен по нескольким причинам. Трудно получить последовательные результаты из-за посторонних шумов, которые вызывают затруднения в отличии двух последовательных измерений при незначительном изменении слышимости. Большое изменение слышимости можно обнаружить с уверенностью, но изменение на

20 % или 30 % — нет. Поэтому необходимо пользоваться другими средствами измерения сравнительной эффективности детектора при изменении различных других величин. Это можно сделать двумя основными способами:

1. Произвести абсолютное измерение эффективности обнаружения δ через отношение выходной мощности звуковой частоты к входному радиочастотному напряжению, используя соотношение [5, с. 345]:

$$\delta = a^2 \cdot r_0,$$

где a — коэффициент обнаружения, r_0 — сопротивление цепи на выходе детектора.

2. Сравнить слышимую интенсивность принимаемого сигнала со стандартным сигналом, который можно увеличить или уменьшить точно в известной пропорции.

8. Заключение

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы, касающиеся влияния газов на работу детектора [3, с.36, 37]:

1. Степень вакуума в детекторной лампе: давление от 0,0025 до 0,005 мм рт. ст. дает на 50—100 % более громкий отклик, чем давление 0,05 мм рт. ст.

2. Рабочее напряжение для давления от 0,0025 до 0,005 мм рт. ст. составляет 40—50 В.

3. При указанных в п. 1 давлениях значительно проще осуществляется регулировка наилучшего анодного напряжения и тока накала. Этот факт при увеличении интенсивности полностью оправдывает обеспечение более высокого напряжения пластины. Ради низкого рабочего напряжения в некоторых детекторах, содержащих газы, приносят в жертву указанные выше желательные характеристики.

4. Рабочее напряжение изменяется в зависимости от давления в лампе по логарифмической кривой вида

$$E_0 = e_i a^{-p},$$

где E_0 — рабочее напряжение, e_i — потенциал ионизации газа, a — константа, p — давление газа в лампе.

5. Наилучшее действие детектора достигается вблизи изгиба приведенной выше кривой (рис. 3) или при давлениях от 0,003 до 0,005 мм рт. ст., что соответствует рабочему напряжению от 40 до 50 В. Справа от изгиба этой кривой (повышенное давление) регулировка становится все более критичной.

6. Введение неона или азота не изменяет интенсивность отклика сигнала по сравнению с сигналом, полученным при наличии воздуха в лампе. Аргон дает немного более громкий отклик, чем другие.

7. Водород дает гораздо более слабую интенсивность сигнального отклика.

8. Степень критической регулировки анодного напряжения и тока накала для достижения наилучшего отклика примерно одинакова для воздуха, азота, неона и углекислого газа. Водородные лампы более критичны.

9. Рабочее напряжение примерно на 30 % выше для ламп, наполненных гелием, чем для ламп, наполненных упомянутыми выше газами, при тех же степенях низкого вакуума.

10. Напряжение на аноде и ток накала в лампах, наполненных гелием, значительно менее критичны, чем для любых других газов, за исключением ламп с хорошим вакуумом.

11. Пары ртути дают лучшую интенсивность сигнала, чем другие газы, а рабочее напряжение ниже, чем у других газов. Для ртутных ламп оно колеблется от 16 до 20 В в зависимости от давления пара и, следовательно, от температуры боковых стенок лампы. Рабочее напряжение и лучший ток накала для этого менее важны, чем для неона, азота, аргона, углекислого газа и т. д. при условии, что стенки ртутных ламп остаются прохладными.

Аргон или гелий, вероятно, лучше всего было бы использовать в вакуумных лампах, но ни одно из газовых испытаний не дало результатов, которые были бы заметно лучше, чем те, которые были получены с помощью обычной лампы для определения содержания газа, в которой остаточным газом предположительно является воздух, с учетом затрат на анодные батареи, критических регулировок и т. д.

Список литературы

1. Bazzoni C. B. Hot Cathode Metal Vapor Tubes // Radio News for November. 1925. Vol. 7, No. 5. P. 604, 728, 729, 731, 732, 733.
2. Brown H. A., Knipp C. T. The Effect of Pressure and Gas Content on the Action of Vacuum Tube Detectors // The Physical Review. 1922. Vol. 19, No. 3. P. 278–280.
3. Brown H. A., Knipp C. T. Alkali-vapor detector tubes // Bulletin University of Illinois. November, 1923. No. 138. P. 7–40.
4. Brown H. A., Knipp C. T. Alkali Vapor Detector Tubes // Radio News. 1923. No. 2. P. 1456, 1566, 1568.
5. Bijl H. J. Van der. The thermionic vacuum tube and its applications. New York ; London : McGraw-Hill book company, Inc. 1920. 391 p.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Functional Features of Gas-Filled Tube Triodes of the 20s of the XX Century

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: December 10, 2024

Peer-reviewed: December 14, 2024

Accepted: December 15, 2024

Abstract: *In the early 20s of the 20th centuries, a need arose for a radio tube that would have high sensitivity without the use of regeneration. To this end, a number of scientists conducted experimental studies on the influence of gaseous media on the functioning of a tube triode as a detector. Tubes of this type are called “soft tubes” and are often used in the detector stages of radio receivers. The work shows that after a large number of experiments with different gases, it was found that the result can be achieved if vapors of easily evaporating metals are used in tubes instead of gases. In this case, it is necessary to provide a gaseous environment in the tube with an extremely low ionizing potential. This allows the tube to effectively function as a detector with a minimum anode voltage of 8 V to 10 V. An alloy of sodium and potassium turned out to be a suitable medium for such detectors.*

Keywords: *soft tubes, gas-filled tube triode, gases, ionization, vapors of easily evaporating metals, sodium and potassium alloy.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, “Functional Features of Gas-Filled Tube Triodes of the 20s of the XX Century,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 495–511, 2025, doi: 10.21227/bf5n-4937. (In Russ.).

References

- [1] C. B. Bazzoni, “Hot Cathode Metal Vapor Tubes,” *Radio News for November*, vol. 7, no. 5, pp. 604, 728, 729, 731, 732, 733, 1925.
- [2] H. A. Brown and C. T. Knipp, “The Effect of Pressure and Gas Content on the Action of Vacuum Tube Detectors,” *The Physical Review*, vol. 19, no. 3, pp. 278–280, 1922.
- [3] H. A. Brown and C. T. Knipp, “Alkali-vapor detector tubes,” *Bulletin University of Illinois*, no. 138, pp. 7–40, November, 1923.
- [4] H. A. Brown and C. T. Knipp, “Alkali Vapor Detector Tubes,” *Radio News*, no. 2, pp. 1456, 1566, 1568, 1923.
- [5] H. J. Bijl Van der. *The thermionic vacuum tube and its applications*. New York; London: McGraw-Hill book company, Inc. 1920.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Организатор Крымских микроволновых конференций и историк науки и техники (к 75-летию П. П. Ермолова)

¹Афонин И. Л., ²Пестриков В. М.

¹Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, д. 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru

Получено: 5 мая 2025 г.

Отрецензировано: 12 мая 2025 г.

Принято к публикации: 12 мая 2025 г.

Аннотация: В статье рассмотрены основные этапы жизни, научной деятельности и основные научные достижения, издательские проекты и инициативы, общественная деятельность, награды и почетные звания известного российского ученого Павла Петровича Ермолова. Приведена библиография его работ за 2020—2025 гг. Статья проиллюстрирована фотографиями 2007 и 2020 гг.

Ключевые слова: история радиоэлектроники, биобиблиографический указатель.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Афонин И. Л., Пестриков В. М. Организатор Крымских микроволновых конференций и историк науки и техники (к 75-летию П. П. Ермолова) // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2025. Т. 8, № 3. С. 512—524.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Афонин, И. Л. Организатор Крымских микроволновых конференций и историк науки и техники (к 75-летию П. П. Ермолова) / И. Л. Афонин, В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2025. — Т. 8, № 3. — С. 512—524.

1. Введение

Павел Петрович Ермолов известен в Севастопольском государственном университете и за его пределами в первую очередь тем, что является автором проекта проведения в Севастополе конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» и в течение 35 лет является бессменным руководителем Организационного комитета этой конфе-

ренции. Одной из особенностей этой конференции является издание (под редакцией Ермолова) аннотированных библиографических указателей материалов конференций за 1991—2010 гг. и 2011—2015 гг. Из этих указателей, в частности, можно судить о масштабах конференции. Так, в первый указатель включены 5282 записи 5464 авторов, которые представляли 774 университетов и предприятий 43 стран, во второй — 2729 записей 3487 авторов, которые представляли 496 университетов и предприятий 28 стран.¹ В течение 2015—2019 гг. конференция поддерживалась грантами Российского фонда фундаментальных исследований.

В вышедшем к 70-летию биобиблиографическом указателе² — 272 записи, в которых приведены опубликованные труды, предисловия, неопубликованные труды, авторские свидетельства, авторефераты диссертаций П. П. Ермолова и в которых П. П. Ермолов выступал официальным оппонентом, научно-популярные работы, публицистика и эпиграммы, публикации о П. П. Ермолове, именной указатель, а также отражена его редакторская деятельность. В настоящей статье приведены актуальные сведения о научной, педагогической и общественной деятельности Павла Петровича Ермолова, а также библиография его работ за 2020—2025 гг.

2. Основные этапы жизни и деятельности

П. П. Ермолов родился 28 июля 1950 г. в селе Греково-Александровка Тельмановского района Сталинской области (в настоящее время — Донецкой Народной Республики) в семье служащих, участников Великой Отечественной войны. Мать — Резникова Мария Акимовна (1918—2007), старший лейтенант медицинской службы, после войны была направлена в Греково-Александровку заведовать аптекой. Отец — Ермолов Петр Иванович (1907—1980), старший лейтенант административной службы, работал вместе с Марией Акимовной.

В 1967 г. окончил Греково-Александровскую среднюю школу и поступил в Таганрогский радиотехнический институт, радиотехнический факультет которого окончил в 1973 г. В этом же году был призван на срочную военную службу, которую проходил на космодроме Байконур в

¹ Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : 1991—2010 : аннотир. библиогр. указатель / Севастоп. нац. техн. ун-т, Науч. б-ка ; под ред. к. т. н. П. П. Ермолова ; [отв. сост. Н. Л. Ржевцева ; авт. предисл. М. П. Батура, М. Е. Ильченко, В. А. Шевцов]. — Севастополь : Вебер, 2014. — 640 с. ; Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : 2011—2015 : аннотир. библиогр. указатель / Севастоп. гос. ун-т, Науч. б-ка ; под ред. к. т. н. П. П. Ермолова ; [отв. сост. Н. Л. Ржевцева]. — Севастополь, 2017. — 356 с.

² Ермолов Павел Петрович (к 70-летию со дня рождения) : биобиблиографический указатель / Сост. Е. В. Синковская, И. Н. Макиенко. М. : ИНФРА-М, 2020. 64 с.

должности начальника станции обработки информации радиодальномера — элемента сети измерений траекторий космических аппаратов. С 1975 по 1985 гг. — в Севастопольском приборостроительном институте на должностях инженера, аспиранта, ассистента, младшего научного сотрудника. Кандидатская диссертация посвящена исследованиям элементов и узлов миллиметрового диапазона на основе микрополоскового волновода с волной E_{11} . Работа защищена в Московском институте электронного машиностроения в 1986 г.³



Рис. 1. Павел Петрович Ермолов (2020)

Fig. 1. Pavel P. Yermolov (2020)

В 1985 г. был приглашен в Специальное конструкторско-технологическое бюро Морского гидрофизического института АН Украины для участия в работах по созданию 12-канального спутникового радиометра сантиметрового диапазона, предназначавшегося для установки на космическом носителе «Океан». Ведущий конструктор по СВЧ-тракту радиометра и его калибровкам. В 1988—1991 гг. руководитель НИОКР «Разработка экспериментальных образцов малошумящего усилителя и смесителя сантиметрового диапазона с расширенным динамическим диапазоном» (заказчик — НПО измерительной техники, г. Калининград Моск. обл.), в 1992—1998 гг. — НИР «Создание и внедрение пакета программ технологической оптимизации управляющих и приемных СВЧ-устройств в сантиметровом диапазоне волн» (заказчик — НИИ «Орион», Киев).

³ Ермолов П. П. Теоретическое и экспериментальное исследование микрополоскового волновода с волной E_{11} : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.07. Севастополь, 1985. 164 с.

В 1993—2002 гг. — руководитель редакционно-издательской группы издательства «Вебер».

В 2002—2007 гг. — на руководящих должностях ряда предприятий телекоммуникационного профиля. В этот период исполнял обязанности председателя Государственной экзаменационной комиссии по защите выпускных квалификационных работ выпускников кафедры радиотехники и телекоммуникаций Севастопольского национального технического университета.



Рис. 2. Заседание государственной экзаменационной комиссии кафедры радиотехники и телекоммуникаций Севастопольского национального технического университета. Слева направо: Е. В. Коваль, И. В. Шуститский, А. А. Савочкин, Ю. Б. Гимпилевич, П. П. Ермолов, И. Л. Ветров, А. Д. Плоткин, С. Р. Зиборов. 12 июня 2007 г. Фото Е. А. Редькиной.

Fig. 2. Meeting of the State Examination Committee of the Department of Radio Engineering and Telecommunications of the Sevastopol National Technical University. From left to right: Ye. V. Koval, I. V. Shustitsky, A. A. Savochkin, Yu. B. Gimpilevich, P. P. Yermolov, I. L. Vetrov, A. D. Plotkin, S. R. Ziborov. June 12, 2007. Photo by Ye. A. Redkina

В 2007—2008 гг. — старший научный сотрудник Харьковского национального университета радиоэлектроники.

В 2008—2020 гг. — старший преподаватель, доцент (кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации») Севастопольского государственного университета. В 2018—2023 гг. — заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» и член ученого совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности СевГУ.

С 2023 г. — профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» СевГУ. Основное направление исследований — история и методология науки и техники [4—40].

Стажировался на кафедре истории науки и техники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (2011) и кафедре истории науки и техники Уральского федерального университета (2013).

3. Этапы научной деятельности и основные научные достижения

Научную деятельность П. П. Ермолова можно разделить на 4 периода.

1.1972—1985 гг.: исследование полосковых и микрополосковых структур в дециметровом (ранние работы) и миллиметровом (поздние работы) диапазонах волн. Впервые исследована микрополосковая линия передачи с волной E_{11} в миллиметровом диапазоне волн и некоторые элементы на ее основе. По результатам исследований защищена кандидатская диссертация.

2.1986—1992 гг.: исследования в таких областях, как микроволновая радиометрия, разработка экспериментальных образцов малошумящего усилителя и смесителя сантиметрового диапазона с расширенным динамическим диапазоном, технологическая оптимизация управляющих и приемных СВЧ-устройств в сантиметровом диапазоне волн. Впервые предложено использование микроволнового излучения для оценки мелкомасштабных изменений параметров морской воды [1].

3.1993—2006 гг.: технологическая оптимизация и повышение выхода годных при разработке и производстве СВЧ-устройств, оптимизация разработки электронных устройств на основе метода анализа допусков. Впервые предложен подход, основывающийся на анализе результатов многовариантных испытаний опытной партии устройств с последующей идентификацией параметров эквивалентной схемы каждого устройства из опытной партии [2]. В свое время этот подход не нашел понимания у конструкторов и технологов, но в дальнейшем, с развитием компьютерных технологий, был развит другими исследователями и получил название «Метод экстракции параметров».

4.2007—2025 гг.: впервые на основе общей теории систем проф. В. Н. Садовского обоснованы эмпирические закономерности и методологические рекомендации, касающиеся вопросов систематизации (периодизации и классификации) историко-научных исследований, с использованием которых проведен глубокий анализ истории развития инфокоммуникаций и радиотехнологий на Черноморском флоте и в Крыму [3].

4. Издательские проекты и инициативы

Среди издательских проектов и инициатив П. П. Ермолова следует выделить следующее.

1. Проект издания научно-производственного журнала «Мультисервисные сети кабельного телевидения» (в 2001—2003 гг. вышло пять номеров журнала).

2. Неосуществленный проект издания энциклопедического словаря «СВЧ-техника и телекоммуникации» (проект был инициирован в 2003—2004 гг.).

3. Проект издания литературно-публицистического альманаха «СЕВА» (в 2007—2011 гг. вышли пять выпусков альманаха).

4. Инициатива издания словаря эпонимов в области инфокоммуникаций и радиотехнологий (с 2018 г.). Создание такого словаря должно способствовать формированию у будущих специалистов таких компетенций, как способность уважительно и бережно относиться к историческому наследию и способность осуществлять свою деятельность на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории науки и техники.

5. Продолжающийся в настоящее время проект издания научного журнала «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» (начат в 2018 г., к настоящему времени вышло 30 номеров журнала).

4. Общественная деятельность. Награды и почетные звания

Кроме руководства оргкомитетом Крымской микроволновой конференции и должности заместителя главного редактора журнала «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» П. П. Ермолов — член президиума Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова (РНТОРЭС), председатель Крымской региональной организации РНТОРЭС. Награжден грамотой Министерства образования и науки Украины (2010), медалями «150 лет РТО» (2016), «За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи» (2020) и «70 лет космодрому Байконур» (2025). Почетный гражданин Греково-Александровки (1994). Почетный радист (2024).

5. Заключение

Научная деятельность известного российского организатора научных мероприятий и историка науки и техники Павла Петровича Ермолова достойна более полного исследования.

Список литературы

1. Ермолов П. П. Контактная сверхвысокочастотная радиометрия — новый инструмент для морских исследований. Киев : Знание, 1986. 20 с.
2. Ермолов П. П., Юрасов П. С. Технологическая оптимизация : методологические аспекты повышения выхода годных при разработке и производстве СВЧ-устройств. В сб. : 4-я Крымская конференция и выставка «СВЧ-техника и спутниковый прием». Севастополь, 26—28 сент. 1994 г. Севастополь, 1994. Т. 2. С. 312—316.
3. Ермолов П. П. История развития инфокоммуникаций и радиотехнологий на Черноморском флоте и в Крыму (1899—2014 гг.). М. : ИНФРА-М, 2022. 390 с.
4. Ермолов П. П., Коломийченко В. П. Доклады по истории науки и техники на Крымской микроволновой конференции в 2016—2019 гг. В сб. : Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2020. № 1 (75). С. 295—298.
5. Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Кондратова Е. В. Доклады сотрудников Уральского федерального университета им. первого президента России Б. Н. Ельцина по истории науки и техники на Крымских микроволновых конференциях в 2013—2019 гг. (к 100-летию УрФУ). В сб. : Урал индустриальный. Бакунинские чтения. Материалы XIV Всероссийской научной конференции. В 2 тт. 2020. С. 202—211.
6. Присяжнюк С. Н., Ермолов П. П. К 70-летию профессора Гимпилевича Юрия Борисовича // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2020. № 3. С. 232—233.
7. Лукьянченко Н. К., Афонин И. Л., Ермолов П. П., Коломийченко В. П. Памяти профессора Сергея Михайловича Смольского (1946—2020) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2020. № 3. С. 238.
8. Ермолов П. П. Космополитизм С. М. Рытова в некрологе, посвященном академику Папалекси // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 508—514.
9. Поляков А. Л., Ермолов П. П. Радиосистемы на страже аэрокосмических рубежей России. К 10-летию создания Главного центра предупреждения о ракетном нападении // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-1. С. 562—563.
10. Гимпилевич Ю. Б., Афонин И. Л., Ермолов П. П. История кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета (К 60-летию основания) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 3—8.
11. Афонин И. Л., Ермолов П. П. Юрий Борисович Гимпилевич — ученый и организатор науки (К 70-летию со дня рождения) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 477—478.
12. Ермолов П. П., Свиридова Е. И., Коломийченко В. П., Кондратова Е. В. Двойной юбилей в АО «Микроволновые системы» // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 483—484.
13. Ермолов П. П., Яковлева Т. В. Севастопольский топоним «Радиогорка» : мифы и факты // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 491—492.
14. Ермолов П. П., Коломийченко В. П. Главный теоретик «Истока» Вилиор Павлович Сазонов (1931—2014) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 493—494.
15. Ермолов П. П., Свиридова Е. И., Кондратова Е. В. Об авторах докладов по истории радиотехники, представленных на XIII Международном конгрессе по истории науки (к 50-летию конгресса) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 495—496.

16. Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Кондратова Е. В. Крымские страницы биографии академика Папалекси. В сб. : Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий. Материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию со дня рождения выдающегося физика и создателя первой русской усилительной радиолампы Н. Д. Папалекса. В 2 ч. Санкт-Петербург, 2021. С. 168—170.
17. Ермолов П. П., Яковлева Т. В. Эпоним «Фильтр Чебышева» (К 200-летию российского математика и механика) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 231.
18. Ермолов П. П., Яковлева Т. В. Эпоним «Модель Эберса — Молла» (к 100-летию соавторов модели биполярного транзистора) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 232.
19. Pestrikov V. M., Yermolov P. P., Slyozkin G. V. Valentin Vologdin – The creator of the first Russian machine radio stations. In : HISTELCON 2021 – Selected Papers of 2021 7th IEEE History of Electrotechnology Conference Proceedings. 2021. P. 85–90.
20. Самсонов Г. А., Ермолов П. П. VII съезд РНТОРЭС им. А. С. ПОПОВА // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 378—394.
21. Ермолов П. П., Иванюк Т. А., Кондратова Е. В. Первый академик в Таганроге (к 100-летию со дня рождения А. В. Каляева) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 359—361.
22. Ермолов П. П., Коломийченко В. П. К 90-летию со дня рождения Евгения Ивановича Нефёдова (1932—2020) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 362—365.
23. Ермолов П. П., Свиридова Е. И. Почетный член Академии военных наук, адмирал, связист Зинур Гусейнович Ляпин (к 75-летию со дня рождения) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 366—368.
24. Ермолов П. П., Папуловская Н. В. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: взгляд в будущее (обзор 32-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии») // Ural Radio Engineering Journal. 2022. Т. 6, № 4. С. 462—495.
25. Попова А. А., Афонин И. Л., Ермолов П. П. Патриарх цифрового телевидения (к 100-летию Марка Иосифовича Кривошеева, 1922—2018) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2022. № 5. С. 215.
26. Попова А. А., Ермолов П. П. О книге «Сборник номограмм по радиотехнике» (к 100-летию Владимира Михайловича Родионова, 1922—1988) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2022. № 5. С. 216.
27. Попова А. А., Ермолов П. П. Научный руководитель Севастопольского полигона (к 90-летию Евгения Анатольевича Штагера) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2022. № 5. С. 217.
28. Ермолов П. П. Один из ведущих отечественных «автодинщиков» (к 75-летию профессора В. Я. Носкова) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 115—126.
29. Кондратова Е. В., Свиридова Е. И., Ермолов П. П. проект IEEE Oral History : академик Ю. В. Гуляев. Часть 5 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 356—366.
30. Результаты радиометрического зондирования винограда в условиях помех / И. А. Сидоров, В. Ю. Леушин, С. В. Чижиков, Е. П. Новичихин, П. П. Ермолов, В. В. Обливанцов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2023. № 5. С. 230—231.

31. Ермолов П. П., Катеринчук В. И. История развития инфокоммуникаций и радиотехнологий на гражданском флоте России конца XIX — начала XX вв. // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2023. № 6. С. 239.
32. Калюжный Б. К., Вязенцев Я. А., Васильев А. В., Ермолов П. П. Проект «История развития инфокоммуникаций и радиотехнологий на Черноморском флоте и в Крыму» // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2023. № 6. С. 240.
33. Калюжный Б. К., Ермолов П. П. Народный университет радиоэлектроники (к 60-летию Севастопольского приборостроительного института) // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2023. № 6. С. 241.
34. Ермолов П. П., Папуловская Н. В. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии — основа технологической независимости (обзор 33-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии») // Ural Radio Engineering Journal. 2024. Т. 8, № 1. С. 119—146.
35. Ермолов П. П., Коломийченко В. П. К 100-летию начала испытаний на Черноморском флоте средств гидроакустического противодействия и подавления // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2024. № 6. С. 249—250.
36. Ермолов П. П., Свиридова Е. И., Кондратова Е. В. К 50-летию начала разработок в СКБ «Фотон» мобильных комплексов приема, обработки и регистрации сигналов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2024. № 6. С. 251—252.
37. Ермолов П. П. К 75-летию выхода фильма «Александр Попов» // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2024. № 6. С. 253—254.
38. Ермолов П. П. Инфографика — важный инструмент визуализации и снижения размерности контента в историографии науки и техники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 124—151.
39. Ермолов П. П. История развития средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 2. С. 317—333.
40. Ермолов П. П. История развития средств связи, радиоуправления и радиопеленгации на Черноморском флоте (1826—2002) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 3. С. 474—494.

Сведения об авторах

Афонин Игорь Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Пестриков Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Organizer of the Crimean Microwave Conferences and Historian of Science and Technology (on the 75th Anniversary of P. P. Yermolov)

I. L. Afonin¹ and V. M. Pestrikov²

¹Sevastopol State University
33, Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

²St. Petersburg State Institute of Cinema and Television
13, Pravda st., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: May 5, 2025

Peer-reviewed: May 12, 2025

Accepted: May 12, 2025

Abstract: The article examines the main stages of life, scientific activity and main scientific achievements, publishing projects and initiatives, social activities, awards and honorary titles of the famous Russian scientist Pavel Petrovich Yermolov. A bibliography of his works for 2020–2025 is provided. The article is illustrated with photographs from 2007 and 2020.

Keywords: history of radio electronics, bio-bibliographic index.

For citation (IEEE): I. L. Afonin and V. M. Pestrikov, “Organizer of the Crimean Microwave Conferences and Historian of Science and Technology (on the 75th Anniversary of P. P. Yermolov),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 512–524, 2025, doi: 10.21227/5yf1-t359. (In Russ.).

References

- [1] P. P. Yermolov, *Contact microwave radiometry – a new tool for marine research*. Kiev: Znaniye, 1986. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov and P. S. Yurasov, “Technological optimization: methodological aspects of increasing the yield of suitable products in the development and production of microwave devices,” in: *4th Crimean conference and exhibition “Microwave technology and satellite reception”*, Sevastopol, September 26–28, 1994, Sevastopol, vol. 2, pp. 312–316, 1994. (In Russ.).
- [3] P. P. Yermolov, *History of the development of infocommunications and radio technologies in the Black Sea Fleet and in Crimea (1899–2014)*. Moscow: INFRA-M, 2022. (In Russ.).
- [4] P. P. Yermolov and V. P. Kolomiychenko, “Reports on the history of science and technology at the Crimean microwave conference in 2016–2019,” in: *Scientific and technical conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks n. a. A. S. Popov, dedicated to the Radio Day*, no. 1 (75), pp. 295–298, 2020. (In Russ.).
- [5] P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. V. Kondratova, “Reports of the staff of the Ural Federal University n. a. the first president of Russia B. N. Yeltsin on the history of science and technology at the Crimean microwave conferences in 2013–2019 (on the 100th anniversary of UrFU),” in: *Industrial Urals. Bakunin Readings. Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference*, in 2 vols, pp. 202–211, 2020. (In Russ.).

- [6] S. N. Prisyazhnyuk and P. P. Yermolov, "On the 70th Anniversary of Professor Yuri Borisovich Gimpilevich," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 3, pp. 232–233, 2020. (In Russ.).
- [7] N. K. Lukyanchenko, I. L. Afonin, P. P. Yermolov, and V. P. Kolomiychenko, "In Memory of Professor Sergei Mikhailovich Smolsky (1946–2020)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 3, p. 238, 2020. (In Russ.).
- [8] P. P. Yermolov, "Cosmopolitanism of S. M. Rytov in the obituary dedicated to Academician Papaleksi," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 508–514, 2020. (In Russ.).
- [9] A. L. Polyakov and P. P. Yermolov, "Radio systems guarding the aerospace borders of Russia. On the 10th anniversary of the creation of the Main Missile Attack Warning Center," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 1-1, pp. 562–563, 2020. (In Russ.).
- [10] Yu. B. Gimpilevich, I. L. Afonin, and P. P. Yermolov, "History of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of Sevastopol State University (on the 60th anniversary of its foundation)," *Microwave and telecommunication technology*, no. 1-2, pp. 3–8, 2020. (In Russ.).
- [11] I. L. Afonin and P. P. Yermolov, "Yuri Borisovich Gimpilevich – Scientist and Organizer of Science (on the 70th Anniversary of His Birth)," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 1-2, pp. 477–478, 2020. (In Russ.).
- [12] P. P. Yermolov, Ye. I. Sviridova, V. P. Kolomiychenko, and Ye. V. Kondratova, "Double Anniversary at 'Microwave Systems' JSC," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 1-2, pp. 483–484, 2020. (In Russ.).
- [13] P. P. Yermolov and T. V. Yakovleva, "Sevastopol toponym 'Radiogorka': myths and facts," *Microwave and telecommunication technology*, no. 3, pp. 491–492, 2021. (In Russ.).
- [14] P. P. Yermolov and V. P. Kolomiychenko, "Chief theorist of 'Istok' Vilior Pavlovich Sazonov (1931–2014)," *Microwave and telecommunication technology*, no. 3, pp. 493–494, 2021. (In Russ.).
- [15] P. P. Yermolov, Ye. I. Sviridova, and Ye. V. Kondratova, "About the authors of reports on the history of radio engineering presented at the XIII International Congress on the History of Science (on the 50th anniversary of the congress)," *Microwave and telecommunication technology*, no. 3, pp. 495–496, 2021. (In Russ.).
- [16] P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. V. Kondratova, "Crimean pages of the biography of Academician Papaleksi," in: *Actual problems of radio and cinema technologies. Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference dedicated to the 140th anniversary of the birth of the outstanding physicist and creator of the first Russian amplifying radio tube N. D. Papaleksi*, in 2 parts. St. Petersburg, pp. 168–170, 2021. (In Russ.).
- [17] P. P. Yermolov and T. V. Yakovleva, "Eponym 'Chebyshev Filter' (on the 200th anniversary of the Russian mathematician and mechanic)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 4, p. 231, 2021. (In Russ.).
- [18] P. P. Yermolov and T. V. Yakovleva, "Eponym 'Ebers-Moll Model' (on the 100th anniversary of the co-authors of the bipolar transistor model)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 4, p. 232, 2021. (In Russ.).
- [19] V. M. Pestrikov, P. P. Yermolov, and G. V. Slyozkin, "Valentin Vologdin – The creator of the first Russian machine radio stations," in: *HISTELCON 2021 – Selected Papers of 2021 7th IEEE History of Electrotechnology Conference Proceedings*, pp. 85–90, 2021.
- [20] G. A. Samsonov, and P. P. Yermolov, "VII Congress of the Russian Scientific-Research Institute of Electromagnetic Computing n. a. A. S. Popov," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 378–394, 2022. (In Russ.).

- [21] P. P. Yermolov, T. A. Ivanyuk, and Ye. V. Kondratova, "The first academician in Taganrog (on the 100th anniversary of A. V. Kalyaev's birth)," *Microwave and telecommunication technology*, no. 4, pp. 359–361, 2022. (In Russ.).
- [22] P. P. Yermolov and V. P. Kolomiychenko, "On the 90th anniversary of Yevgeny Ivanovich Nefedov's birth (1932–2020)," *Microwave and telecommunication technology*, no. 4, pp. 362–365, 2022. (In Russ.).
- [23] P. P. Yermolov and Ye. I. Sviridova, "Honorary Member of the Academy of Military Sciences, Admiral, Signalman Zinur Guseynovich Lyapin (on the 75th anniversary of his birth)," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 4, pp. 366–368, 2022. (In Russ.).
- [24] P. P. Yermolov and N. V. Papulovskaya, "Microwave Technology and Telecommunication Technologies: A Look into the Future (review of the 32nd International Conference 'Microwave and Telecommunication Technology')," *Ural Radio Engineering Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 462–495, 2022. (In Russ.).
- [25] A. A. Popova, I. L. Afonin, and P. P. Yermolov, "Patriarch of digital television broadcasting (on the 100th anniversary of Mark Isifovich Krivosheyev, 1922–2018)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 5, p. 215, 2022. (In Russ.).
- [26] A. A. Popova and P. P. Yermolov, "About the book 'Collection of nomograms on radio engineering' (on the 100th anniversary of Vladimir Mikhailovich Rodionov, 1922–1988)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 5, p. 216, 2022. (In Russ.).
- [27] A. A. Popova and P. P. Yermolov, "Scientific Director of the Sevastopol Test Site (on the 90th anniversary of Yevgeny Anatolyevich Shtager)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 5, p. 217, 2022. (In Russ.).
- [28] P. P. Yermolov, "One of the Leading Domestic 'Autodyne Drivers' (on the 75th anniversary of Professor V. Ya. Noskov)," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 115–126, 2023. (In Russ.).
- [29] Ye. V. Kondratova, Ye. I. Sviridova, and P. P. Yermolov, "IEEE Oral History Project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 5," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 356–366, 2023. (In Russ.).
- [30] I. A. Sidorov, V. Yu. Leushin, S. V. Chizhikov, E. P. Novichikhin, P. P. Yermolov, and V. V. Oblivantsov, "Results of radiometric probing of a vineyard under interference conditions," *Microwave and telecommunication technology*, no. 5, pp. 230–231, 2023. (In Russ.).
- [31] P. P. Yermolov and V. I. Katerinchuk, "History of the development of infocommunications and radio technologies in the civil fleet of Russia in the late 19th – early 20th centuries," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 6, p. 239, 2023. (In Russ.).
- [32] B. K. Kalyuzhny, Ya. A. Vyazentsev, A. V. Vasiliev, and P. P. Yermolov, "Project 'History of the Development of Infocommunications and Radio Technologies in the Black Sea Fleet and in Crimea'," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 6, p. 240, 2023. (In Russ.).
- [33] B. K. Kalyuzhny and P. P. Yermolov, "People's University of Radio Electronics (for the 60th anniversary of the Sevastopol Instrument-Making Institute)," *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, no. 6, p. 241, 2023. (In Russ.).
- [34] P. P. Yermolov and N. V. Papulovskaya, "Microwave technology and telecommunication technologies – the basis of technological independence (review of the 33rd International Conference 'Microwave and Telecommunication Technology'," *Ural Radio Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 119–146, 2024. (In Russ.).
- [35] P. P. Yermolov and V. P. Kolomiychenko, "On the 100th anniversary of the start of testing hydroacoustic counteraction and suppression equipment in the Black Sea Fleet," *Microwave and telecommunication technology*, no. 6, pp. 249–250, 2024. (In Russ.).

- [36] P. P. Yermolov, Ye. I. Sviridova, and Ye. V. Kondratova, “On the 50th anniversary of the start of development at SKB ‘Foton’ of mobile complexes for receiving, processing and recording signals,” *Microwave and telecommunication technology*, no. 6, pp. 251–252, 2024. (In Russ.).
- [37] P. P. Yermolov, “On the 75th anniversary of the release of the film ‘Alexander Popov’,” *Microwave and telecommunication technology*, no. 6, pp. 253–254, 2024. (In Russ.).
- [38] P. P. Yermolov, “Infographics – an important tool for visualization and reduction of content dimensionality in the historiography of science and technology,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 124–151, 2025. (In Russ.).
- [39] P. P. Yermolov, “History of the development of communications, radio control and radio direction finding in the Black Sea Fleet (1826–2002)” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 2, pp. 317–333, 2025. (In Russ.).
- [40] P. P. Yermolov, “History of the Development of Communications, Radio Control and Radio Direction Finding in the Black Sea Fleet (1826–2002),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 3, pp. 474–494, 2025. (In Russ.).

Information about the authors

Igor L. Afonin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Viktor M. Pestrikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.