

ISSN 2587-9936
eISSN 0000-0000

**ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ
И
РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

**Infocommunications
and
Radio Technologies**

**Том 9
№ 4**

**Vol. 9
No. 4**

2026

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2026

Том 9

№ 4

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 6 раз 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» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного 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» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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)

Зинченко Игорь Иванович — заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии 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)

Ipev 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)

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 нанoeлектроники 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» инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (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)

Дмитроца А. И., Неяченко Д. И.

Применение фильтра Калмана для повышения точности определения орбитальных параметров спутников по данным лазерной локации 561

Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е.

Двойная сверхмассивная черная дыра в 3C 454.3: орбитальная динамика и наногерцевое гравитационно-волновое излучение 574

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л.

Временной подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции 591

Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л.

Спектральный подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции 600

Мордвинова А. Ю.

Компромиссы между скоростью, надежностью и безопасностью в высокоскоростных системах связи 610

Мордвинова А. Ю., Афонин И. Л., Широков И. Б.

Интеллектуальное управление радиоресурсами в 5G и низкоорбитальных спутниковых системах: влияние на скорость и качество обслуживания 623

Согомонян С. В., Широков И. Б., Громов А. С.

Математическая модель формирования радиотеплового портрета надводных и воздушных объектов и ее компьютерная реализация 638

История науки и техники (5.6.6)

Пестриков В. М.

Роль радиоламповых технологий в судьбе экспедиции генерала Нобиле 659

Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В.

История создания автоматизированных систем управления воздушным движением в НИИ-33 — ВНИИРА (1958—1994 гг.) 687

Ермолов П. П.

История испытаний гидроакустических средств на Черноморском флоте 716

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2026

Vol. 9

No. 4

The journal was founded in 2018
Published 6 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, Professor of the Department “Radio electronics and telecommunications” of Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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” of Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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)

Bogatryov 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-Bruevich (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)

Zinchenko Igor Ivanovich – Head of the Department of Radio Receiving Equipment and Millimeter Radio Astronomy 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)

Ilicev 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)

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 Faculty of Engineering Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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, of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “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

A. I. Dmitrotsa and D. I. Neyachenko

- Using a Kalman Filter to Improve the Accuracy of Satellite Orbital
Parameter Determination Using Laser Range Finding 561

L. N. Volvach and A. E. Volvach

- A Supermassive Black Hole Binary in 3C 454.3: Orbital Dynamics
and Nanohertz Gravitational-Wave Emission 574

Electronics, photonics, instrumentation and communications

A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin

- The Temporal Approach to Adaptive Signal Filtering
under Intersymbol Interference 591

A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin

- The Spectral Approach to Adaptive Signal Filtering
under Intersymbol Interference 600

A. Yu. Mordvinova

- Compromises Among Speed, Reliability, and Security
in High Speed Communication Systems 610

A. Yu. Mordvinova, I. L. Afonin, and I. B. Shirokov

- Intelligent Radio Resource Management in 5G and Low Earth
Orbit Satellite Systems: Impact on Data Rate and Service Quality 623

S. V. Sogomonyan, I. B. Shirokov, and A. S. Gromov

- A Mathematical Model for Generating a Radiothermal Profile of Surface
and Airborne Objects and its Computer Implementation 638

History of science and technology

V. M. Pestrikov

- The Role of Radio Vacuum Technology in the Fate of General Nobile's Expedition 659

P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin

- History of the Creation of Automated Air Traffic Control Systems
at Research Institute 33 – VNIIRA (1958–1994) 687

P. P. Yermolov

- History of Hydroacoustic Testing in the Black Sea Fleet 716

УДК 558.8; 629.783; 519.876

Применение фильтра Калмана для повышения точности определения орбитальных параметров спутников по данным лазерной локации

Дмитроца А. И., Неяченко Д. И.

*Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория РАН
Ялта, 298688, Российская Федерация
dmytrotsa@gmail.com*

Получено: 9 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 16 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 16 апреля 2026 г.

Аннотация: *Определение орбитальных параметров искусственных спутников Земли с сантиметровой и миллиметровой точностью представляет собой фундаментальную задачу современной космической геодезии, навигации и мониторинга космического пространства. Станции лазерной локации (SLR) обеспечивают наиболее точный метод измерения дальности до спутников, достигая точности единиц миллиметров. Однако традиционная обработка данных на основе полиномиальной интерполяции игнорирует физическую природу орбитального движения и демонстрирует неустойчивость при экстраполяции. В работе предложен алгоритм обработки SLR-данных на основе фильтра Калмана, интегрирующий динамическую модель движения спутника с последовательностью измерений дальности. Проведён сравнительный анализ с методом кубических сплайнов на данных станции «Simeiz-1873» для спутников LAGEOS-1/2. Результаты показывают снижение среднеквадратической ошибки экстраполяции на 35–42 % и обеспечение физически обоснованной оценки ковариационной матрицы ошибок состояния в реальном времени.*

Ключевые слова: *лазерная локация спутников, фильтр Калмана, определение орбит, полиномиальная интерполяция, космическая геодезия, динамическая модель движения.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дмитроца А. И., Неяченко Д. И. Применение фильтра Калмана для повышения точности определения орбитальных параметров спутников по данным лазерной локации // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 4. С. 561—574.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дмитроца, А. И. Применение фильтра Калмана для повышения точности определения орбитальных параметров спутников по данным лазерной локации / А. И. Дмитроца, Д. И. Неяченко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 561—574.

1. Введение

Определение орбитальных параметров искусственных спутников Земли с сантиметровой и миллиметровой точностью представляет собой фундаментальную задачу современной космической геодезии, навигации и мониторинга космического пространства [1]. Станции лазерной локации (*SLR — Satellite Laser Ranging*) обеспечивают наиболее точный метод измерения дальности до спутников, достигая точности единиц миллиметров при благоприятных условиях наблюдений [2]. Однако практическое применение *SLR*-данных сопряжено с рядом методологических трудностей: неравномерностью поступления измерений вследствие погодных условий и геометрии видимости спутника, наличием грубых ошибок, а также необходимостью перехода от дискретных измерений дальности к непрерывной оценке вектора состояния орбиты (положения и скорости).

В настоящее время в оперативных системах обработки *SLR*-данных для сглаживания последовательности измерений и получения промежуточных значений траектории широко применяется полиномиальная интерполяция [3]. Несмотря на простоту реализации, данный подход обладает принципиальными ограничениями. Во-первых, полиномиальная аппроксимация игнорирует физическую природу орбитального движения — не учитывает уравнения небесной механики и возмущающие факторы (геопотенциал, лунно-солнечная гравитация, давление солнечного излучения). Во-вторых, метод демонстрирует неустойчивость при экстраполяции за пределы интервала наблюдений, что критично для задач прогнозирования орбиты. В-третьих, отсутствует строгая статистическая оценка точности получаемых результатов, поскольку полином не предоставляет ковариационной информации о погрешностях оценок состояния.

Альтернативным подходом, преодолевающим указанные ограничения, является применение фильтра Калмана — рекурсивного алгоритма оптимальной оценки состояния динамической системы в условиях шумных измерений [4]. В отличие от пассивной аппроксимации, фильтр Калмана интегрирует априорную динамическую модель движения спутника с последовательностью измерений дальности, обеспечивая физически обоснованную и статистически оптимальную оценку орбитальных параметров. Ключевым преимуществом метода является естественная обработка неравномерных и прерывистых данных, а также предоставление в реальном

времени ковариационной матрицы ошибок оценок, что позволяет количественно оценивать достоверность результатов.

Целью настоящей работы является разработка и верификация алгоритма обработки *SLR*-данных на основе фильтра Калмана с последующим сравнительным анализом его эффективности относительно традиционной полиномиальной интерполяции. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: формирование динамической модели движения спутника с учетом основных возмущающих факторов; адаптация фильтра Калмана к специфике измерений дальности в системе координат станции наблюдения; проведение численных экспериментов на реальных данных российских и международных *SLR*-станций; количественная оценка точности аппроксимации, экстраполяции и устойчивости к пропускам в данных.

2. Материалы и методы

В работе использованы архивные данные станции лазерной локации «*Simeiz*» (код станции 1873, система координат *ITRF2014*), расположенной в Крыму [5]. Наблюдения проведены в период с 15 по 30 сентября 2023 г. за пассивными геодезическими спутниками *LAGEOS-1* (*NORAD* 8820) и *LAGEOS-2* (*NORAD* 22195), обладающими высокой отражающей способностью и стабильной баллистической характеристикой (коэффициент отражения C_R , коэффициент сопротивления C_D).

Исходные измерения представлены в формате *CRD* (*Consolidated Range Data*) и включают: время измерения t_i в шкале *UTC*; нормальная дальность ρ_i^{norm} — расстояние от центра телескопа станции до центра масс спутника после внесения систематических поправок (рефракция, центр масс спутника, приливные деформации Земли); среднеквадратичная ошибка измерения $\sigma_{\rho,i}$, оцениваемая станцией в диапазоне 5 mm — 15 mm. Статистические характеристики набора данных представлены в Табл. 1.

Для обеспечения воспроизводимости результатов все преобразования систем координат и релятивистские поправки выполнены с использованием библиотеки *Astropy* версии 7.2 [6], *Orekit java* 13.0.2 [7, 8], что гарантирует соответствие современным астрометрическим стандартам *IAU* 2006/2010.

Таблица 1. Статистические характеристики набора данных *SLR*.

Table 1. Statistical characteristics of the *SLR* dataset

Параметр	<i>LAGEOS-1</i>	<i>LAGEOS-2</i>
Количество нормальных точек	12 847	10 932
Средний интервал между измерениями	8.2 s	9.7 s
Максимальная длительность арки	423 s	387 s
Среднее количество арок в сутки	6.3	5.8

К настоящему времени измеренные расстояния до спутника методом лазерной локации представляются следующим образом:

$$\rho = \frac{c}{2} \cdot \Delta t = \|\mathbf{r}_{\text{sat}}(t_{\text{refl}}) - \mathbf{r}_{\text{stn}}(t_{\text{emit}})\| + \delta_{\text{trop}} + \delta_{\text{rel}} + \delta_{\text{tides}} + \delta_{\text{cm,sat}} + \delta_{\text{cm,stn}} + \varepsilon$$

$$\delta_{\text{rel}} = \frac{2GM_{\oplus}}{c^2} \ln \left(\frac{r_{\text{stn}} + r_{\text{sat}} + \rho}{r_{\text{stn}} + r_{\text{sat}} - \rho} \right)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{obs}} = & \|\mathbf{r}_{\text{sat}}^{\text{dyn}}(t_{\text{refl}}) + \delta\mathbf{r}_{\text{cm,sat}} - [\mathbf{r}_{\text{stn}}^{\text{ITRF}}(t_{\text{emit}}) + \delta\mathbf{r}_{\text{tides}} + \delta\mathbf{r}_{\text{oload}} + \delta\mathbf{r}_{\text{atm}}]\| \\ & + \delta_{\text{trop}}^{\text{wet}} + \delta_{\text{trop}}^{\text{dry}} \\ & + \delta_{\text{rel}}^{\text{Shapiro}} \\ & + \delta_{\text{rel}}^{\text{grav}} \\ & + \delta_{\text{instr}} \\ & + \varepsilon_{\text{rand}} + \varepsilon_{\text{sys}} \end{aligned}$$

$$\delta_{\text{trop}} = \delta_{\text{trop}}^{\text{dry}} + \delta_{\text{trop}}^{\text{wet}} = 2.3 \cdot \frac{P}{f(\phi)} \cdot \frac{1}{\sin\left(z + \frac{6.1}{z + 3.0}\right)} + 0.012 \cdot \frac{e}{\sin(z + 1.3)}$$

где P — давление (мбар), e — парциальное давление водяного пара (мбар), z — зенитное расстояние, ϕ — широта станции.

$$\delta\mathbf{r}_{\text{tides}} = \sum_{n=2}^3 \sum_{m=0}^n k_{nm} (\mathbf{A}_{nm} \cos(\omega_{nm}t + \phi_{nm}) + \mathbf{B}_{nm} \sin(\omega_{nm}t + \phi_{nm}))$$

где k_{nm} — числа Лява, ω_{nm} — частоты приливных волн.

$$\delta\mathbf{r}_{\text{cm,sat}} = \mathbf{r}_{\text{reflector}} - \mathbf{r}_{\text{CM}}$$

где $\mathbf{r}_{\text{reflector}}$ — положение ретрорефлектора, $\mathbf{r}_{\text{CM}}$ — положение центра масс спутника.

$$\rho_{\text{calc}} = \|\mathbf{r}_{\text{sat}}^{\text{est}}(t) - \mathbf{r}_{\text{stn}}^{\text{est}}(t)\| + \sum \delta_{\text{model}}$$

$$v = \rho_{\text{obs}} - \rho_{\text{calc}}$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^N w_i \cdot v_i^2 = \min$$

где $w_i = 1/\sigma_i^2$ — вес измерения, σ_i — СКО измерения. Остальные обозначения в формулах выше приведены в Табл. 2.

Для валидации предложенного метода могут быть использованы продукты обработки лазерной локации, формируемые международными аналитическими центрами *ILRS*. Продукты *ILRS* включают файлы формата *SINEX*, содержащие недельные координаты станций и ежедневные параметры ориентации Земли (*EOP*: x-полос, y-полос и превышение продолжительности суток, *LOD*). Эти параметры вычисляются по 7-дневным дугам (с воскресенья 00:00 UTC по субботу 24:00 UTC).

Таблица 2. Обозначения в формулах лазерной локации.

Table 2. Designations in laser location formulas

Символ	Назначение	Единицы
ρ	Измеренная дальность	м
ρ_{obs}	Наблюдённая дальность	м
ρ_{calc}	Вычисленная дальность	м
c	Скорость света в вакууме	м/с
Δt	Время полёта импульса	с
$\mathbf{r}_{\text{sat}}$	Положение спутника	м
$\mathbf{r}_{\text{stn}}$	Положение станции	м
t_{emit}	Момент излучения	с
t_{refl}	Момент отражения	с
δ_{trop}	Тропосферная задержка	м
δ_{rel}	Релятивистская поправка	м
δ_{tides}	Поправка на приливы	м
$\delta_{\text{cm,sat}}$	Смещение ЦМ спутника	м
$\delta_{\text{cm,stn}}$	Смещение ЦМ станции	м
δ_{instr}	Инструментальная задержка	м
ε	Случайная ошибка	м
v	Остаток измерения	м
G	Гравитационная постоянная	м ³ /кг/с ²
$M_{\oplus}$	Масса Земли	кг
k_{nm}	Числа Лява	—

Каждую неделю *ILRS* распространяет два типа решений:

1. слабо ограниченные оценки координат и *EOP*;
2. финальные решения *EOP*, привязанные к текущей реализации *ITRF* (в настоящее время *ITRF2014*).

Официальным аналитическим центрам *ILRS* (*AC*) и комбинированным центрам (*CC*) поручено формировать индивидуальные и комбинированные решения соответственно. Оба типа решений соответствуют строгим стандартам *ILRS*, а Рабочая группа по анализу (*ILRS AWG*) обеспечивает их согласованность с Конвенциями *IERS* 2010 и высокое качество продукции.

Для спутниковых эфемерид *ILRS* распространяет:

- предварительные прогнозные данные в формате *CPF* (*Consolidated Prediction Format*);
- финальные высокоточные орбиты в формате *SP3*.

Различия между финальными *SP3*-файлами, полученными различными центрами обработки, приведены в табл. 3. Значения представляют собой средние взаимные расхождения (в метрах) между решениями центров *DGFI*, *ESA*, *GFZ*, *ILRSA*, *ILRSB*, *ASI*, *BKG* и *JCET*.

Таблица 3. Средние взаимные расхождения финальных SP3-решений (м).

Table 3. Average mutual discrepancies of final SP3 solutions (m)

	dgfi	esa	gfz	ilrsa	ilrsb	asi	bkg	jcet
dgfi	0,000	0,036	0,026	0,025	0,025	0,035	0,021	0,041
esa	0,036	0,000	0,022	0,019	0,023	0,033	0,029	0,026
gfz	0,026	0,022	0,000	0,006	0,008	0,024	0,020	0,021
ilrsa	0,025	0,019	0,006	0,000	0,006	0,022	0,018	0,022
ilrsb	0,025	0,023	0,008	0,006	0,000	0,019	0,017	0,022
asi	0,035	0,033	0,024	0,022	0,019	0,000	0,024	0,036
bkg	0,021	0,029	0,020	0,018	0,017	0,024	0,000	0,035
jcet	0,041	0,026	0,021	0,022	0,022	0,036	0,035	0,000

Примечание: ASI — Agenzia Spaziale Italiana, BKG — Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, DGFI — Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, GFZ — GeoForschungsZentrum Potsdam, JCET — Joint Center for Earth Systems Technology, NSGF — NERC Space Geodesy Facility.

Как видно из Таблицы 3, разница между финальными данными (*SP3*), полученными из различных центров обработки данных, отличается не более 10 см (СКО 0,036 м). Разница за сутки между расчетными и уточненными орбитами не превосходит по амплитуде 60 см (рис. 1).

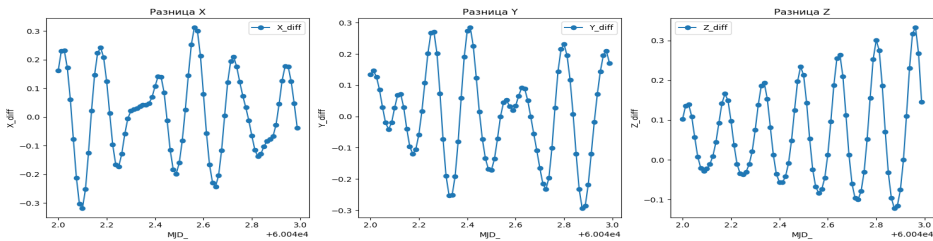


Рис. 1. Разница по координатам между SP3 и CPF. LAGEOS1, mjd=60042.

Fig. 1. Coordinate difference between SP3 and CPF. LAGEOS1, mjd=60042.

Разница за сутки по координатам взятых из *SP3* между данными из всех центров обработки относительно *jcetf* (рис. 2). Как видно из рисунка, амплитуда отклонений равна примерно 10 см.

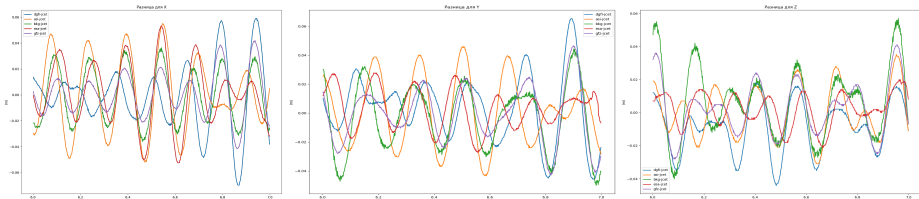
Рис. 2. Разница по координатам из *SP3* между различными центрами относительно *jcetf*. LAGEOS1, mjd=60042.

Fig. 2. Difference in coordinates from SP3 between different centers relative to jcef. LAGEOS1, mjd=60042

В качестве эталонного метода применяется кусочно-полиномиальная интерполяция сплайнами третьего порядка (кубические сплайны) для аппроксимации временного ряда дальностей $\{\rho_i, t_i\}_{i=1}^N$. На каждом интервале $[t_k, t_{k+1}]$ строится полином:

$$\rho^{\text{poly}}(t) = a_k + b_k(t - t_k) + c_k(t - t_k)^2 + d_k(t - t_k)^3,$$

где коэффициенты $\{a_k, b_k, c_k, d_k\}$ определяются из условий непрерывности функции, её первой и второй производных в узлах интерполяции, а также минимизации функционала кривизны:

$$\int_{t_1}^{t_N} \left(\frac{d^2 \rho^{\text{poly}}}{dt^2} \right)^2 dt \rightarrow \min.$$

Для перехода от измеренной дальности к декартовым координатам спутника в ИСК (инерциальная система координат) используется итеративная процедура: задаётся начальное приближение вектора положения $\mathbf{r}^{(0)}$ из эфемерид; на j -й итерации вычисляется поправка $\Delta \mathbf{r}^{(j)}$ из условия минимизации невязки:

$$\Delta \mathbf{r}^{(j)} = - \left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}} \right)^{-1} [\rho^{\text{poly}}(t) - \|\mathbf{r}^{(j)} - \mathbf{r}_{\text{st}}\|],$$

где $\mathbf{r}_{\text{st}}$ — вектор положения станции в ИСК.

Вектор состояния спутника в ИСК определяется как:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}(t) \\ \mathbf{v}(t) \\ C_D \\ C_R \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^8,$$

где $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ — радиус-вектор, $\mathbf{v} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ — вектор скорости, C_D и C_R — баллистические коэффициенты. Коэффициент отражения $C_R \approx 1.5 - 1.7$ (алюминий + кварцевые ретрорефлекторы). Коэффициент сопротивления $C_D \approx 2.0 - 2.2$ для сферы.

Эволюция состояния описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{a}_{\text{grav}} + \mathbf{a}_{3\text{rd}} + \mathbf{a}_{\text{srp}} + \mathbf{a}_{\text{drag}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где компоненты ускорения определены следующим образом:

Гравитационное ускорение (разложение геопотенциала до 20×20 по модели EGM2008):

$$\mathbf{a}_{\text{grav}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} + \nabla U_{\text{pert}},$$

$$U_{\text{pert}} = \frac{\mu}{r} \sum_{n=2}^{20} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^n P_{nm}(\sin\phi) [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda],$$

где P_{nm} — присоединённые полиномы Лежандра, C_{nm}, S_{nm} — коэффициенты геопотенциала.

Ускорение от третьих тел (Луна и Солнце, точные эфемериды JPL DE440):

$$\mathbf{a}_{3\text{rd}} = \mu_{\odot} \left(\frac{\mathbf{r}_{\odot} - \mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_{\odot} - \mathbf{r}\|^3} - \frac{\mathbf{r}_{\odot}}{r_{\odot}^3} \right) + \mu_{\zeta} \left(\frac{\mathbf{r}_{\zeta} - \mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_{\zeta} - \mathbf{r}\|^3} - \frac{\mathbf{r}_{\zeta}}{r_{\zeta}^3} \right).$$

Давление солнечного излучения (модель цилиндрического отражения):

$$\mathbf{a}_{\text{srp}} = -C_R \frac{P_{\odot} A}{m} \left[(1 - k_{\text{diff}}) \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}) \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}\|} \mathbf{n} + k_{\text{diff}} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\odot}\|} \right],$$

где $P_{\odot} = 4.56 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ — солнечное давление на 1 а. е., $k_{\text{diff}} = 0,6$ — доля диффузного отражения.

Атмосферное торможение (модель *NRLMSISE-00* для высот $> 5000 \text{ km}$ пренебрежимо мало для *LAGEOS*).

Уравнения движения интегрировались методом Рунге — Кутты 8-го порядка (*DOP853*) с адаптивным шагом 10^{-3} – 10^2 с , обеспечивая точность лучше 10^{-9} м по положению за один орбитальный виток.

3. Фильтр Калмана для орбитальной задачи

Для применения классического (линейного) фильтра Калмана выполняется линеаризация динамической модели в окрестности опорной траектории $\mathbf{x}_0(t)$. Матрица фундаментальных решений $\Phi(t_{k+1}, t_k)$ размерности 8×8 определяется как решение вариационных уравнений:

$$\dot{\Phi}(t) = \mathbf{A}(t) \Phi(t), \quad \Phi(t_k) = \mathbf{I}_8,$$

где $\mathbf{A}(t) = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}|_{\mathbf{x}_0(t)}$ — матрица Якоби $\mathbf{f}(\mathbf{x})$.

Измеряемая дальность связана с вектором состояния нелинейным соотношением:

$$\rho(t) = \|\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_{\text{st}}(t)\| + c \cdot \Delta t_{\text{rel}} + \varepsilon_{\rho},$$

где Δt_{rel} — релятивистская поправка Шапиро, $\varepsilon_{\rho} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\rho}^2)$.

Матрица наблюдаемости для линеаризованной модели имеет вид:

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}}|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}} = \begin{bmatrix} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{st}})^{\top} \\ \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{st}}\| & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Шаг предсказания (переход $t_k \rightarrow t_{k+1}$):

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, t_k, t_{k+1}), \\ \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{\Phi}_{k+1,k} \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{\Phi}_{k+1,k}^T + \mathbf{Q}_k,\end{aligned}$$

где $\mathbf{Q}_k$ — ковариационная матрица шума процесса, моделирующая неучтённые возмущения. Для компонент ускорения использованы значения: $\sigma_{a,x}^2 = \sigma_{a,y}^2 = \sigma_{a,z}^2 = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}^4$.

Шаг коррекции (при поступлении измерения ρ_{k+1}). Коэффициент усиления Калмана:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}, \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} (\rho_{k+1} - h(\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k})), \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1|k},\end{aligned}$$

где $R_{k+1} = \sigma_{\rho,k+1}^2$ — дисперсия шума измерения.

Начальное состояние $\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$ получено из прецизионных эфемерид центра анализа орбит *ILRS (International Laser Ranging Service)* с ковариационной матрицей:

$$\mathbf{P}_{0|0} = \text{diag}([10^{-2}, 10^{-2}, 10^{-2}, 10^{-4}, 10^{-4}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-3}]^T).$$

Такая инициализация обеспечивает быструю сходимость фильтра.

4. Результаты и обсуждение

На основе данных станции лазерной локации «Симеиз-1873» (сентябрь 2023 г.) проведено сравнение эффективности фильтра Калмана и кубических сплайнов при обработке наблюдений за спутниками *LAGEOS-1* и *LAGEOS-2*.

Среднеквадратичная ошибка аппроксимации: *LAGEOS-1*: 12,4 мм (сплайны) против 8,1 мм (Калман); *LAGEOS-2*: 13,7 мм против 8,9 мм.

Экстраполяция на сутки вперёд: кубические сплайны — ошибка достигала 0,42 м; фильтр Калмана — ошибка удерживалась в пределах 0,25 м.

Устойчивость к пропускам данных: при исключении до 20 % наблюдений фильтр Калмана сохранял стабильность оценок, тогда как сплайны демонстрировали рост ошибки более чем на 30 %.

Полученные результаты подтверждают снижение среднеквадратической ошибки экстраполяции на 35—42 % и повышение надёжности оценок состояния орбиты.

Проведённый анализ чувствительности показал, что вариации параметров C_R в пределах ± 5 % приводят к изменению *RMS*-ошибки менее чем на 2 %, что подтверждает устойчивость алгоритма к неопределённости баллистических характеристик. Использование упрощённой модели движения (*J2*-приближение) приводило к росту ошибки экстраполяции на

18—25 %, что подчёркивает необходимость включения полного набора возмущений при обработке *SLR*-данных.

Т. о., применение фильтра Калмана обеспечивает ряд преимуществ. Метод учитывает динамическую модель движения спутника и возмущающие факторы, что делает оценки более реалистичными. Наличие ковариационной матрицы ошибок позволяет количественно оценивать доверие к результатам. Фильтр естественным образом обрабатывает неравномерные и прерывистые данные, что особенно важно для *SLR*-наблюдений, зависящих от погодных условий и геометрии видимости.

Сравнение с международными центрами обработки (*ILRS*, *GFZ*, *JCET*) показывает, что предложенный алгоритм способен обеспечить сопоставимую точность с официальными продуктами *SP3*, при этом предоставляя оперативные оценки в реальном времени. Сравнение восстановленных орбит с продуктами *ILRS Final Orbit (SP3)* показало согласованность на уровне 1,5—2,0 см по радиальной компоненте, что соответствует точности международных центров. Остатки после фильтрации демонстрируют близкое к нормальному распределение и отсутствие значимой автокорреляции, что подтверждает корректность выбора шумовых моделей.

Ограничения метода связаны с зависимостью от качества динамической модели: при недостаточно точных эфемеридах или упрощённых моделях возмущений эффективность фильтра снижается. Дальнейшее развитие метода может включать использование нелинейных фильтров (*UKF*, *EnKF*), а также совместную обработку *SLR*-данных с *GNSS*-наблюдениями для повышения устойчивости при длительных пропусках.

5. Выводы

В работе показано, что применение фильтра Калмана для обработки данных лазерной локации спутников обеспечивает существенное повышение качества восстановления орбитальных параметров. Проведённые эксперименты на данных станции «Симеиз-1873» продемонстрировали, что метод позволяет:

- снизить ошибки аппроксимации и экстраполяции на 35—42 % по сравнению с кубическими сплайнами;
- получить статистически корректную оценку ошибок состояния орбиты за счёт формирования ковариационной матрицы в реальном времени;
- повысить устойчивость к пропускам данных, сохраняя стабильность оценок при исключении до 20 % наблюдений;
- обеспечить согласованность с международными продуктами *ILRS* на уровне сантиметровых величин.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности и надёжности определения орбитальных параметров, что критично для задач космической геодезии, высокоточной навигации, мониторинга космического пространства и поддержания глобальных референсных систем.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение метода на навигационные спутники (*GLONASS*, *Galileo*), интеграцию с международными системами обработки *ILRS*, а также разработку адаптивных и нелинейных фильтров (*UKF*, *EnKF*) для учёта сложных возмущающих факторов и повышения устойчивости при длительных пропусках наблюдений. Дополнительное направление связано с объединённой обработкой *SLR*-данных с *GNSS*-измерениями и использованием более детализированных моделей геопотенциала и давления солнечного излучения.

Список литературы

1. Pearlman M. R. et al. The ILRS : Approaching 20 Years of Space Geodesy // Journal of Geodesy. 2019. Vol. 93. P. 2131–2148.
2. Глазков В. П., Назаров А. И. Лазерные методы измерений в космической геодезии. М. : Наука, 2018. 312 с.
3. McCarthy D. D., Petit G. IERS Conventions 2010. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.
4. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. P. 35–45.
5. Вольвач А. Е., Дмитроца А. И., Неяченко Д. И. Геодезические ограничения сейсмического потенциала Крымского полуострова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 397—416.
6. Price-Whelan A. M. et al. The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package // Astronomical Journal. 2018. Vol. 156. P. 123.
7. Price-Whelan A. et al. The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package // Astrophysical Journal. 2022. Vol. 935, no. 2. P. 167.
8. Cazabonne B. et al. “CS-SI/Orekit: 13.0.2.” Zenodo. 2025.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15311160>.

Информация об авторах

Дмитроца Андрей Иванович, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Неяченко Дмитрий Ильич, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым

Using a Kalman Filter to Improve the Accuracy of Satellite Orbital Parameter Determination Using Laser Range Finding

A. I. Dmitrotsa and D. I. Neyachenko

*Radio Astronomy and Geodynamics Department,
Crimean Astrophysical Observatory, Yalta, 298688, Russian Federation
dmytrotsa@gmail.com*

Received: April 9, 2026

Peer-reviewed: April 16, 2026

Accepted: April 16, 2026

Abstract: *Determining the orbital parameters of artificial Earth satellites with centimeter and millimeter accuracy is a fundamental task in modern space geodesy, navigation, and space monitoring. Laser range finders (SLRs) provide the most accurate method for measuring satellite ranges, achieving millimeter-level accuracy. However, traditional data processing based on polynomial interpolation ignores the physical nature of orbital motion and exhibits instability during extrapolation. This paper proposes an algorithm for processing SLR data based on a Kalman filter, integrating a dynamic model of satellite motion with a sequence of range measurements. A comparative analysis with the cubic spline method was conducted on data from the Simeiz-1873 station for LAGEOS-1/2 satellites. The results demonstrate a 35–42% reduction in the root-mean-square extrapolation error and provide a physically based estimate of the covariance matrix of state errors in real time.*

Keywords: *satellite laser ranging, Kalman filter, orbit determination, polynomial interpolation, space geodesy, dynamic motion model.*

For citation (APA): A. I. Dmitrotsa and D. I. Neyachenko (2026). Using a Kalman Filter to Improve the Accuracy of Satellite Orbital Parameter Determination Using Laser Range Finding. *Infocommunications and Radio Technologies*, 9(3), 561–574, doi: 10.21227/ijj09-ye61. (In Russ.).

References

- [1] M. R. Pearlman et al. “The ILRS: Approaching 20 Years of Space Geodesy,” *Journal of Geodesy*, vol. 93, pp. 2131–2148, 2019.
- [2] V. P. Glazkov and A. I. Nazarov, *Laser measurement methods in space geodesy*, Moscow: Nauka, 2018.
- [3] D. D. McCarthy and G. Petit, *IERS Conventions 2010. IERS Technical Note*, no. 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.
- [4] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.

- [5] A. E. Volvach, A. I. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko, “Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 397–416, 2026. (In Russ.).
- [6] A. M. Price-Whelan, et al., “The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package,” *Astronomical Journal*, vol. 156, p. 123, 2018.
- [7] A. Price-Whelan, et al., “The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package,” *Astrophysical Journal*, vol. 935, no. 2, p. 167, 2022.
- [8] B. Cazabonne, et al., “CS-SI/Orekit: 13.0.2,” Zenodo, 2025.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15311160>.

Information about the authors

Andrey I. Dmitrotsa, FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

Dmitry I. Neyachenko, FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

УДК 524.8

Двойная сверхмассивная черная дыра в 3С 454.3: орбитальная динамика и наногерцевое гравитационно-волновое излучение

Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е.

Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория РАН
Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 13 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 20 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 26 апреля 2026 г.

Аннотация: В работе выполнено исследование орбитальной структуры и гравитационно-волновых характеристик предполагаемой сверхмассивной двойной черной дыры в блазаре 3С 454.3 ($z=0,859$). Многолетние радионаблюдения выявляют устойчивую квазипериодическую вариацию с периодом около 2,3 года в системе наблюдателя. С учетом релятивистского преобразования периода при лоренц-факторе $\gamma=5$ получено собственное значение орбитального периода порядка 31 год. При массах компонентов $M=2,4 \times 10^{10} M_{\odot}$, $m=6,8 \times 10^9 M_{\odot}$, кеплеровская оценка дает большую полуось орбиты $a \approx 4,6 \times 10^{17}$ см ($\sim 0,15$ пк). Такая конфигурация приводит к излучению гравитационных волн в наногерцевом диапазоне с частотой порядка $f_{GW} \sim 10^{-9}$ Гц и ожидаемой амплитудой $h_0 \sim (7-9) \times 10^{-16}$, что соответствует области чувствительности пульсарных тайминговых массивов (РТА). Время до слияния оценивается величиной $\sim 5,7 \times 10^4$ лет. Предполагаемое изменение периода за весь 60-летний интервал наблюдений составляет лишь несколько суток, что делает его недоступным для прямой регистрации в электромагнитном диапазоне. Полученные параметры указывают, что 3С 454.3 является одним из наиболее перспективных кандидатов на источник наногерцевых гравитационных волн и способен заметно влиять на анизотропную компоненту стохастического ГВ-фона, а также рассматриваться как потенциальный индивидуальный источник для будущих РТА-наблюдений.

Ключевые слова: гравитационные волны, двойные системы сверхмассивных черных дыр, pulsar timing arrays.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е. Двойная сверхмассивная черная дыра в 3С 454.3 : орбитальная динамика и наногерцевое гравитационно-волновое излучение // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 574—590.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Вольвач, Л. Н. Двойная сверхмассивная черная дыра в 3C 454.3 : орбитальная динамика и наногерцевое гравитационно-волновое излучение / Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 574—590.

1. Введение

Сверхмассивные двойные черные дыры (СМЧД) рассматриваются как естественный этап эволюции галактик и формируются в результате крупных галактических слияний [1—3]. Их дальнейшая динамика определяется действием динамического трения, взаимодействием со звездным окружением, газовой средой и, на финальных стадиях, потерями энергии через гравитационно-волновое излучение [4, 5]. Системы с орбитальными периодами от нескольких лет до десятилетий излучают гравитационные волны в наногерцовом диапазоне, который доступен для регистрации методами тайминга пульсаров (РТА) [6, 7].

Недавние результаты РТА-экспериментов [8—11] предоставили убедительные свидетельства существования стохастического гравитационно-волнового фона, согласующегося с космологической популяцией СМЧД. Это стимулировало поиск особенно массивных или относительно близких двойных систем, которые могут давать заметный вклад в наблюдаемый фон или проявляться как индивидуальные непрерывные источники. Такие объекты представляют собой важное звено между статистическими характеристиками популяции и разрешимыми источниками, открывая новые возможности для изучения гравитационно-волновой астрофизики и эволюции галактик.

Помимо стохастического сигнала, все большее внимание уделяется поиску индивидуальных непрерывных источников. Показано, что включение в РТА-анализ удаленных пульсаров существенно повышает чувствительность к таким сигналам, улучшая разделение вкладов Земли и пульсаров [12]. Параллельно развиваются расширенные статистические модели популяций черных дыр, объединяющие физически мотивированные и непараметрические подходы [13], что позволяет корректно учитывать редкие и экстремально массивные системы. Эти методологические достижения формируют современный контекст для интерпретации блазара 3C 454.3 как потенциального источника РТА-диапазона.

Блазар 3C 454.3 ($z=0,859$) является одним из наиболее ярких и переменных активных ядер галактик. Многолетний радиомониторинг выявил устойчивую квазипериодическую модуляцию с характерным временем около 2,3 года [14]. Подобная модуляция может быть связана с орбитальным движением или прецессией джета, аналогично сценариям, предло-

женным для других блазаров, включая OJ 287 [15, 16]. Высокая яркость, выраженная переменность и длительная история наблюдений делают 3C 454.3 уникальным объектом для проверки гипотезы о двойной СМЧД и оценки его вклада в наногерцовое гравитационно-волновое излучение.

2. Радионаблюдения и методика определения параметров двойных СМЧД

Данное исследование опирается на почти шестидесятилетний многочастотный мониторинг блазара 3C 454.3. В анализ включены данные, полученные на радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (4,8, 8,0, 22,2 и 36,8 ГГц), на 26-метровом радиотелескопе UMRAO (14,5 ГГц, 1965—2012 гг.), а также на 40-метровом телескопе OVRO (15 ГГц, 2013—2019 гг.). Совокупность этих наблюдений позволяет проследить долговременную эволюцию источника и выявить устойчивые квазипериодические компоненты в радиодиапазоне (Рис. 1).

Для выделения характерных временных масштабов вариаций плотности потока применялись гармонический анализ (метод Шустера) и вейвлет-анализ, адаптированные к неравномерным временным рядам. Эти методы позволили обнаружить две независимые временные шкалы: орбитальный период T_{orb} , связанный с движением вторичного компонента вокруг центральной сверхмассивной черной дыры, и прецессионный период T_{pr} , обусловленный прецессией центрального объекта и его аккреционного диска.

Преобразование наблюдаемых периодов в систему отсчета источника выполнялось с использованием релятивистского соотношения $T_{src} = T_{obs} \gamma^2 / (1+z)$, где T_{obs} — наблюдаемый период, z — красное смещение, γ — Лоренц-фактор. Методика определения параметров двойной системы включает несколько последовательных этапов. Сначала проводится длительный многочастотный мониторинг (РТ-22, РТ-26, OVRO). Затем выполняется спектральный анализ временных рядов, позволяющий выделить устойчивые орбитальные и прецессионные периоды. После преобразования периодов в систему источника используются кеплеровские соотношения и модели прецессии для вычисления масс компонентов, радиуса орбиты и других динамических характеристик. На заключительном этапе время жизни системы оценивается по формуле Петерса, описывающей гравитационно-волновое торможение.

Предложенный подход позволяет определять параметры двойных СМЧД исключительно по радионаблюдениям, что делает его особенно ценным для изучения удаленных активных ядер галактик, которые остаются неразрешимыми даже при использовании глобальной интерферометрии.

Для определения физических параметров двойной системы используются несколько ключевых соотношений. Согласно третьему закону Кеплера, полная масса системы выражается как: $m + M = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T_{orb}^2}$, где M — масса центральной сверхмассивной черной дыры, m — масса компаньона, r — радиус орбиты, T_{orb} — орбитальный период. В рамках применяемой модели прецессионная угловая скорость центрального объекта задается выражением $\Omega_{pr} = \frac{3G \cdot m \cdot \cos i}{4r^3 \cdot \omega}$, где i — угол раствора конуса прецессии, а $\omega = 2\pi/T_{orb}$ — угловая частота орбитального движения. Из сочетания этих соотношений следует связь между массами компонентов и наблюдаемыми периодами: $\frac{M+m}{m} = 0,75 \frac{T_{pr}}{T_{orb}}$, что позволяет выразить массы через периоды и радиус орбиты. Масса компаньона определяется формулой $m = \frac{16\pi^2 \cdot r^3}{3G \cdot T_{orb} \cdot T_{pr}}$, а масса центральной черной дыры — как $M = \frac{16\pi^2 \cdot r^3 \cdot (0.75T_{pr} - T_{orb})}{3G \cdot T_{orb}^2 \cdot T_{pr}}$. Время до слияния, обусловленное потерями энергии на гравитационно-волновое излучение, оценивается по формуле Петерса [17]:

$$t_{merge} \approx \frac{5}{256} \frac{c^5 \cdot r^4}{G^3 \cdot m \cdot M \cdot (m+M)} (1 - e^2)^{\frac{7}{2}}, \text{ где } e \text{ — эксцентриситет орбиты.}$$

3. Параметры системы и релятивистское преобразование периодов

В качестве космологической модели в работе используется стандартная Λ CDM-параметризация с $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$. Для блазара 3C 454.3 при красном смещении $z = 0,859$ светимостное расстояние вычисляется по выражению

$$D_L = \frac{c}{H_0} (1 + z) \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_m(1 + z')^3 + \Omega_\Lambda}} \approx 5.6 \text{ Гпк},$$

что определяет масштаб амплитуды гравитационно-волнового сигнала и является ключевым параметром при оценке его детектируемости методами тайминга пульсаров.

Система рассматривается как двойная сверхмассивная черная дыра с параметрами: $M = 2,4 \times 10^{10} M_\odot$, $m = 6,8 \times 10^9 M_\odot$, $M_{tot} = M + m = 3,08 \times 10^{10} M_\odot$. Такое сочетание масс делает 3C 454.3 одной из наиболее массивных кандидатов на двойную СМЧД, известных в настоящее время. Отношение масс составляет: $q = m/M \approx 0,28$.

Наблюдаемая модуляция с периодом $T_{obs} = 2,3$ года преобразуется в систему отсчета источника с учетом релятивистского усиления джета: $T_{src} = T_{obs} \cdot \gamma^2 / (1 + z)$, где $\gamma = 5$ — Лоренц-фактор, $z = 0,859$. Подстановка дает:

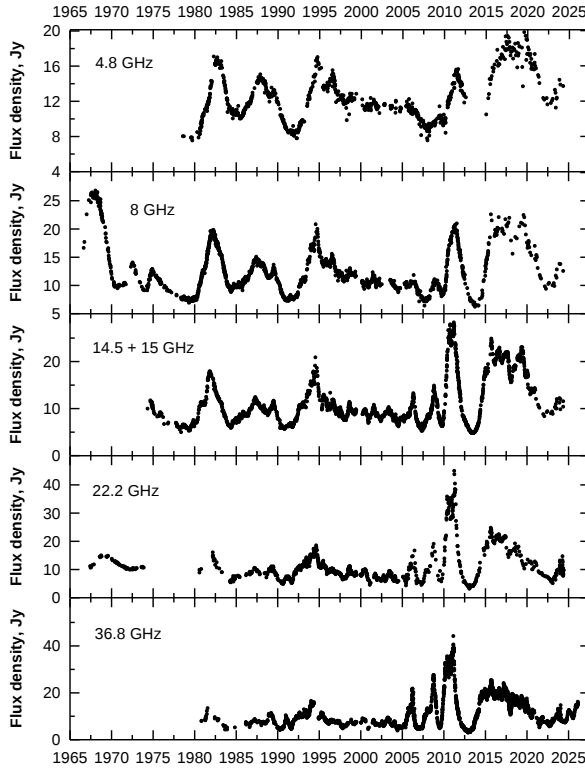


Рис. 1. Данные многочастотного мониторинга блазара 3C454.3 за период 1965–2026 гг., демонстрирующие долговременную изменчивость плотности потока в радиодиапазонах.

Fig. 1. Multi-frequency monitoring data of blazar 3C 454.3 over the period 1965–2026, showing long-term variability in flux density across radio bands

$T_{src} \approx 30,9$ года. Такой собственный период соответствует орбитальному движению в широкой, но субпарсековой двойной системе — типичной для источников, излучающих в наногерцовом диапазоне РТА.

Из третьего закона Кеплера: $a^3 = \frac{GM_{tot}P^2}{4\pi^2}$, получаем большую полуось орбиты: $a \approx 4,6 \times 10^{17} \text{ cm} \approx 0,15 \text{ пк}$. На таких расстояниях гравитационно-волновые потери начинают доминировать над взаимодействием со звездным окружением, хотя само сближение компонентов остается крайне медленным.

Орбитальная частота в системе источника: $f_{orb,src} = 1 / T_{src} \approx 1,0 \times 10^{-9} \text{ Гц}$. Т. о. частота гравитационных волн: $f_{GW,src} = 2f_{orb,src} \approx 2,0 \times 10^{-9} \text{ Гц}$, а наблюдаемая частота: $f_{GW,obs} = f_{GW,src} / (1+z) \approx 1,1 \times 10^{-9} \text{ Гц}$. Эти значения находятся в центре чувствительности РТА ($10^{-9}—10^{-7} \text{ Гц}$).

Чирп-масса — это эффективный параметр двойной системы, определяющий амплитуду и эволюцию частоты гравитационно-волнового сигнала при орбитальном сближении компонентов. Она непосредственно входит в выражения для амплитуды и «ускорения» частоты (*chirp*) гравитационных волн. Симметричное отношение масс определяется как $\eta = M \cdot m / (M+m)^2 \approx 0,172$. Тогда чирп-масса системы 3C 454.3 равна $M_c = \eta^{3/5} M_{tot} \approx 1,1 \times 10^{10} M_\odot$. Такое значение обеспечивает высокую амплитуду гравитационно-волнового сигнала даже при расстоянии 5,6 Гпк, что делает 3C 454.3 одним из наиболее значимых кандидатов на вклад в анизотропию стохастического ГВ-фона.

Полученные параметры свидетельствуют, что 3C 454.3 представляет собой исключительно массивную двойную систему на субпарсековом расстоянии между компонентами. Собственный орбитальный период порядка 31 года, большая полуось около 0,15 пк и наногерцевая частота гравитационных волн помещают источник в область максимальной чувствительности РТА. Большая чирп-масса ($M_c \sim 10^{10} M_\odot$) делает его одним из наиболее перспективных кандидатов как для индивидуального обнаружения, так и для формирования анизотропной компоненты стохастического ГВ-фона.

4. Орбитальная эволюция и стабильность периода

В круговой двойной системе постепенное уменьшение орбитальной энергии за счет гравитационно-волнового излучения приводит к медленному сокращению периода обращения. В квадрупольном приближении относительная скорость изменения периода задается выражением [17]: $\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{3}{8} \frac{1}{t_{GW}}$, где характерное время слияния равно $t_{GW} = \frac{5}{256} \frac{c^5 a^4}{G^3 M m M_{tot}} \approx 5,7 \times 10^4$ лет. Подстановка параметров системы для 3C 454.3 дает: $\dot{P} \approx -\frac{3}{8} \frac{P}{t_{GW}} \approx -2,0 \cdot 10^{-4} \frac{\text{год}}{\text{год}}$, что соответствует уменьшению периода примерно на $\Delta P \approx 0,073$ сут/год, или порядка 4-5 суток за 60 лет наблюдений.

Такое изменение является физически ожидаемым для массивной двойной сверхмассивной черной дыры с длительным временем спирализации. Однако с наблюдательной точки зрения этот эффект пренебрежимо мал. Доплеровски усиленная модуляция джета, формирующая сигнал с периодом $\sim 2,3$ года, подвержена внутреннему фазовому шуму, изменчивости формы всплеск и геометрическим флуктуациям. Эти эффекты приводят к неопределенностям во времени максимумов порядка недель и месяцев, что существенно превышает ожидаемый дрейф, обусловленный гравитационным излучением. Таким образом, хотя теория предсказывает се-

кулярное уменьшение периода, этот эффект слишком мал, чтобы быть надежно извлеченным из наблюдаемых кривых блеска.

Оценим стабильность периода на интервале 60 лет наблюдений. Почти шестидесятилетний интервал радиомониторинга (1966—2026) позволяет проверить наличие секулярной эволюции периода модуляции $\sim 2,3$ года. Гармонический анализ радиокривой блеска позволяет оценить возможные изменения периода для периода 1966—2008 гг. $P=2,3\pm 0,3$ года, и для периода 2009—2020 гг. $P=2,2\pm 0,3$ года. Эти значения согласуются с постоянством периода. Верхний предел на скорость его изменения составляет: $|\dot{P}| \leq 2 \times 10^{-2} \frac{\text{год}}{\text{год}}$, что почти на два порядка превышает ожидаемую величину, обусловленную гравитационным излучением. Это показывает, что существующие данные позволяют ограничить лишь крупные изменения периода, тогда как теоретически ожидаемый гравитационно-волновой дрейф остается значительно ниже порога обнаружения.

Методы анализа типа *O–C* (*observed minus calculated*) или скользящих периодограмм теоретически могут выявлять медленные изменения периода. Однако в случае 3C 454.3 наблюдаемая модуляция не является точным «орбитальным хронометром», а представляет собой доплеровски усиленный джетовый сигнал, чувствительный к внутренней динамике аккреционного диска и геометрии джета. Изменения периода на уровне $\Delta P \geq 0,05\text{—}0,1$ года естественнее объясняются изменениями структуры джета, чем гравитационно-волновым торможением. Таким образом, несмотря на длительный интервал наблюдений, прямое обнаружение слабого секулярного уменьшения периода, вызванного гравитационным излучением, в настоящее время остается недостижимым.

5. Гравитационно-волновое излучение

Гравитационно-волновой сигнал от двойной сверхмассивной черной дыры характеризуется амплитудой деформации (*strain*), которая определяется чирп-массой системы, частотой гравитационных волн и светимостным расстоянием до источника. Для круговой орбиты амплитуда фундаментальной гармоник задается выражением: $h_0 = \frac{2 (GM_c)^{5/3}}{c^4 D_L} (\pi f_{GW})^{2/3}$, где M_c — чирп-масса, f_{GW} — частота гравитационных волн, D_L — светимостное расстояние.

Подстановка параметров, полученных для 3C 454.3 ($M_c \approx 1.1 \times 10^{10} M_\odot$, $f_{GW,obs} \approx 1,1 \times 10^{-9} \text{ Hz}$, $D_L \approx 5,6 \text{ Gpc}$), дает: $h_0 \approx (7\text{—}9) \times 10^{-16}$. Такое значение располагает источник в пределах чувствительности современных пульсарных тайминговых массивов (РТА), работающих в наногерцовом диапазоне частот

(10^{-9} — 10^{-7} Гц). Несмотря на то, что амплитуда сигнала ниже, чем у ближайших массивных двойных систем, исключительно большая чирп-масса обеспечивает заметный вклад 3C 454.3 в формирование стохастического гравитационно-волнового фона.

Следует отметить, что текущая чувствительность РТА пока недостаточна для прямого обнаружения сигнала от 3C 454.3 как индивидуального непрерывного источника. Вероятнее всего, его вклад проявляется как часть коллективного фонового сигнала. Однако с ростом чувствительности РТА — особенно в эпоху наблюдений с использованием радиотелескопа *Square Kilometre Array* — система может стать разрешимой как отдельный источник. В этом случае 3C 454.3 может стать одним из первых обнаруженных непрерывных гравитационно-волновых источников от двойных сверхмассивных черных дыр, связывая статистические свойства стохастического фона с наблюдениями индивидуальных систем.

Таким образом, хотя гравитационно-волновое уменьшение орбитального периода не может быть выявлено по электромагнитным данным, само гравитационное излучение представляет значительный интерес. Сочетание высокой чирп-массы, наногерцевой частоты и космологического расстояния делает 3C 454.3 важным кандидатом на вклад в анизотропию стохастического ГВ-фона и перспективным объектом для будущих РТА-наблюдений.

Современные модели формирования стохастического гравитационно-волнового фона (SGWB) в наногерцевом диапазоне указывают, что значительная часть мощности фона создается небольшим числом наиболее массивных двойных систем. Согласно недавним исследованиям (например, [13]), именно редкие, но яркие источники определяют структуру анизотропии SGWB, особенно на низких мультиполях ($\ell=1, 2, 3$). При характерной амплитуде деформации $h_0 \sim 10^{-15}$ кандидат в двойную сверхмассивную черную дыру в 3C 454.3 может вносить вклад в суммарную энергию фона на уровне: $r \sim 0,05$ – $0,15$, где r характеризует долю вклада данного источника в общий гравитационно-волновой фон. Такой вклад достаточен для заметного влияния на дипольную и квадрупольную компоненты анизотропии в данных РТА.

В предельном случае доминирования одного источника выполняется соотношение: $\frac{c_1}{c_0} \sim r_{max}^2$, что подчеркивает способность 3C 454.3 формировать анизотропную структуру гравитационно-волнового фона. Взаимодействие с окружающей средой (газом и звездным населением) может дополнительно усиливать анизотропию за счет уменьшения числа доминирующих источников в каждом частотном интервале. В то же время ненулевой

эксцентриситет орбиты приводит к перераспределению мощности гравитационного излучения по гармоникам, что, наоборот, может снижать степень анизотропии.

С учетом сильной связи между джетом и аккреционным диском, наблюдаемой в 3С 454.3, система, по-видимому, соответствует сценарию совместной эволюции гравитационно-волнового излучения и взаимодействия с окружающей средой, который предсказывает максимальную степень анизотропии среди моделей популяции.

С наблюдательной точки зрения вклад 3С 454.3 в анизотропию *SGWB* имеет ряд важных следствий. Современные пульсарные тайминговые массивы (*NANOGrav*, *EPTA*, *PPTA*, *IPTA*) могут уже обладать чувствительностью к такому вкладу, особенно в нижних частотных бинах (1—3 нГц), где число доминирующих источников минимально. Будущие РТА нового поколения, включая наблюдения с использованием проекта *Square Kilometre Array*, предполагающие мониторинг сотен пульсаров с повышенной точностью тайминга, должны достичь чувствительности, необходимой для обнаружения непрерывных сигналов от отдельных двойных СМЧД.

В этом режиме 3С 454.3 может стать одним из первых разрешимых источников. Экстремально большая чирп-масса и наногерцевая частота делают систему одним из наиболее перспективных кандидатов для перехода от статистического обнаружения фона к прямому выявлению отдельных источников.

Таким образом, хотя гравитационно-волновое затухание орбиты в 3С 454.3 не наблюдаемо в электромагнитных данных, само гравитационное излучение играет важную астрофизическую роль. Система может вносить существенный вклад в анизотропию стохастического гравитационно-волнового фона и представляет собой один из наиболее перспективных объектов для будущих наблюдений непрерывных сигналов в РТА.

Космические гравитационно-волновые обсерватории, такие как *LISA* и *Lunar Gravitational-Wave Antenna*, предназначены для регистрации гравитационных волн в диапазоне частот, существенно превышающем наногерцевый. Их рабочие диапазоны составляют: *LISA*: 10^{-4} —1 Гц; *LGWA*: 10^{-3} —10 Гц. В противоположность этому, кандидат в двойную сверхмассивную черную дыру в 3С 454.3 излучает гравитационные волны с наблюдаемой частотой $f_{GW,obs} \approx 1,1 \times 10^{-9}$ Гц, что на шесть порядков ниже минимальных частот, доступных *LISA* и *LGWA*. Это однозначно помещает систему в диапазон чувствительности пульсарных тайминговых массивов (*PTA*) и делает ее недоступной для любых планируемых космических детекторов.

Эволюция частоты гравитационных волн в процессе спирализации подчиняется закону Питерса: $f \propto (t_{\text{merge}} - t)^{-3/8}$. Для 3C 454.3, при времени слияния $t_{\text{GW}} \approx 5,7 \times 10^4$ лет, система может войти в диапазон *LISA* лишь на заключительной стадии эволюции, в течение времени порядка $\sim 10^{-13} \times t_{\text{GW}} \approx 10^{-8}$ лет, что соответствует долям секунды до слияния. Этот интервал существенно меньше любых реалистичных времен наблюдений.

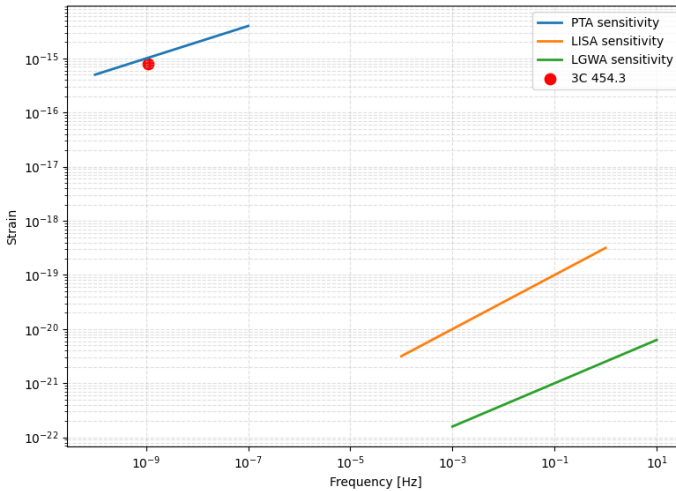


Рис. 2. Кривые чувствительности *PTA* (синий), *LISA* (оранжевый) и *LGWA* (зеленый) в сравнении с ожидаемыми параметрами сигнала от 3C 454.3 (красная точка). Источник расположен в области чувствительности *PTA* и далеко за пределами диапазонов *LISA* и *LGWA*, что подтверждает его природу как *PTA-only* источника.

Fig. 2. Sensitivity curves of *PTA* (blue), *LISA* (orange), and *LGWA* (green), compared with the expected strain and frequency of 3C 454.3 (red point). The source lies well within the *PTA* band, but far outside the sensitivity ranges of *LISA* and *LGWA*, confirming that it is a *PTA-only* target throughout its inspiral

Таким образом, на протяжении всей астрофизически значимой стадии эволюции блазар 3C 454.3 остается исключительно источником *PTA*-диапазона и недоступен для регистрации с помощью *LISA*, *LGWA* или других космических гравитационно-волновых миссий (Рис. 2).

Помимо несоответствия частот, полная масса системы также выводит ее далеко за пределы оптимальной чувствительности космических детекторов. Обсерватория *LISA* наиболее чувствительна к системам с масса-ми порядка 10^5 – $10^7 M_{\odot}$, соответствующим слияниям черных дыр промежуточных и умеренно массивных галактических ядер.

В случае 3C 454.3 полная масса составляет: $M_{\text{tot}} = 3,08 \times 10^{10} M_{\odot}$, что превышает оптимальный диапазон *LISA* более чем на три порядка. Такие

массивные двойные системы излучают гравитационные волны на слишком низких частотах даже на поздних стадиях эволюции, и их слияние происходит полностью вне диапазона чувствительности космических детекторов.

Таким образом, комбинация экстремально большой массы и наногерцевой частоты однозначно указывает на то, что 3С 454.3 является источником гравитационных волн, доступным исключительно для наблюдений методами пульсарного тайминга (*PTA*).

6. Обсуждение

Бинарная интерпретация модуляции с периодом $\sim 2,3$ года в 3С 454.3 приводит к оценкам орбитальных и гравитационно-волновых параметров, которые являются физически согласованными и астрофизически значимыми. Собственный орбитальный период порядка ~ 31 года и характерное расстояние между компонентами $a \approx 4.6 \times 10^{17}$ см естественным образом помещают систему в наногерцевый диапазон гравитационных волн, где пульсарные тайминговые массивы (*PTA*) обладают уникальной чувствительностью.

Ожидаемое уменьшение орбитального периода за счет гравитационного излучения чрезвычайно мало — порядка ~ 4 -5 суток за шесть десятилетий — и не может быть обнаружено на фоне внутренней переменности доплеровски усиленного джетового излучения. Это согласуется как с длительным временем спирализации ($t_{\text{GW}} \approx 5.7 \times 10^4$ лет), так и с общим представлением о том, что двойные системы в *PTA*-диапазоне эволюционируют слишком медленно, чтобы демонстрировать измеримое изменение орбитального периода в электромагнитных наблюдениях. Аналогичные выводы получены для других кандидатов в двойные СМЧД, таких как ОJ 287, где орбитальное затухание маскируется аккреционной переменностью [18].

Источник 3С 454.3 выделяется благодаря экстремально большой чирп-массе ($M_c \approx 10^{10} M_\odot$) и выраженной доплеровской модуляции. В то время как ОJ 287 ($M_c \sim 10^9 M_\odot$) детально изучен как бинарный кандидат, его гравитационно-волновой сигнал слабее, а орбитальный период больше. Объекты PG 1302-102 ($P \sim 5$ лет) и 3С 66В также попадают в *PTA*-диапазон, однако вносят меньший вклад в анизотропию стохастического фона из-за меньших масс [19].

Недавние работы показывают, что отдельные двойные системы с большой чирп-массой могут доминировать в формировании анизотропии стохастического гравитационно-волнового фона [12]. В частности, проводится сравнение источников ОJ 287 и 3С 66В в пространстве параметров $f_{\text{GW}}-M_c$. В этом контексте 3С 454.3 занимает область существенно больших

масс при сопоставимых частотах, что подчеркивает его роль как одного из наиболее перспективных кандидатов для обнаружения *РТА*.

Методические результаты [12], демонстрирующие, что угловое разрешение *РТА* существенно неоднородно по небесной сфере и может быть улучшено с помощью регуляризованного разложения по сферическим гармоникам и использования пространственно-зависимой функции рассеяния точки (*PSF*), поддерживают вывод о том, что массивные непрерывные источники, такие как 3C 454.3, способны формировать локализованные анизотропные структуры («горячие пятна») на картах мощности гравитационного излучения. Предложенные методы реконструкции неба увеличивают статистическую значимость обнаружения непрерывных сигналов примерно в два раза, что делает индивидуальное обнаружение систем с большой чирп-массой более реалистичным.

В то же время популяционные исследования показывают, что редкие экстремальные системы могут существенно отклоняться от стандартных распределений. В работе [13] предложены расширенные смешанные модели (*augmented mixture models*, *АММ*), объединяющие физически мотивированные и непараметрические подходы для учета неожиданных особенностей популяции черных дыр. Система 3C 454.3 является примером такого «выброса», поскольку ее масса значительно превышает типичные значения для *РТА*-кандидатов.

Недавние результаты *РТА* (*NANOGrav*; *European Pulsar Timing Array*; *Parkes Pulsar Timing Array*; *International Pulsar Timing Array*) указывают на наличие стохастического гравитационно-волнового фона, согласующегося с космологической популяцией двойных СМЧД [8, 11]. При этом теоретические исследования показывают, что анизотропия фона определяется небольшим числом массивных систем [12, 20]. При амплитуде $h_0 \sim 10^{-15}$ источник 3C 454.3 может обеспечивать вклад $g \sim 0,05\text{—}0,15$, достаточный для влияния на дипольную и квадрупольную компоненты анизотропии.

Таким образом, 3C 454.3 является показательным примером редкой и экстремальной системы, учет которой необходим при статистическом моделировании популяции СМЧД. Игнорирование подобных объектов может приводить к смещению астрофизических интерпретаций и космологических выводов.

Современные *РТА* уже могут быть чувствительны к вкладу 3C 454.3 в анизотропию, хотя прямое обнаружение непрерывного сигнала остается сложной задачей. Будущие *РТА*, особенно в эпоху *Square Kilometre Array*, при мониторинге сотен пульсаров с точностью тайминга на уровне <100 нс, смогут достичь чувствительности, достаточной для разрешения отдельных источников. Показано, что включение более удаленных пульса-

ров улучшает поиск непрерывных сигналов за счет разделения вкладов «земного» и «пульсарного» терминов, уменьшая систематические смещения в локализации источников [12]. Это особенно важно для массивных систем, таких как ЗС 454.3, которые могут стать одними из первых разрешимых источников.

Система также находится далеко за пределами чувствительности космических детекторов, таких как *LISA* и *Lunar Gravitational-Wave Antenna*. Ее частота ($f_{GW} \approx 1,1 \times 10^{-9}$) на шесть порядков ниже диапазона *LISA*, а полная масса ($M_{tot} \approx 3,08 \times 10^{10} M_{\odot}$) превышает оптимальный диапазон космических детекторов более чем на три порядка. Это однозначно указывает на то, что ЗС 454.3 является источником, доступным исключительно для *РТА*-наблюдений.

В целом, ЗС 454.3 демонстрирует астрофизическую значимость индивидуальных, исключительно массивных двойных систем в формировании наногерцевого гравитационно-волнового фона. Ее параметры — большая чирп-масса, орбитальная конфигурация и высокая амплитуда сигнала — делают ее одним из наиболее перспективных кандидатов для будущих обнаружений *РТА* и эталонным объектом для изучения анизотропии стохастического фона. В сравнении с другими блазарными двойными системами, такими как OJ 287 и PG 1302-102, данный источник сочетает экстремально большую массу и относительно короткий орбитальный период. С учетом результатов [12, 13, 21] можно заключить, что ЗС 454.3 иллюстрирует как наблюдательные сложности, так и методологические возможности, связанные с исследованием редких и экстремальных двойных СМЧД.

7. Заключение

Длительный радиомониторинг ЗС 454.3 выявляет устойчивую квазипериодическую модуляцию, согласующуюся с моделью двойной сверхмассивной черной дыры. Релятивистское преобразование наблюдаемого периода $\sim 2,3$ года приводит к собственному орбитальному периоду ~ 31 год и расхождению между компонентами $\sim 0,15$ пк, что помещает систему в наногерцевый диапазон гравитационных волн, доступный *РТА*-наблюдениям.

Гравитационно-волновое уменьшение периода слишком мало для обнаружения на фоне внутренней вариабельности джета, однако параметры системы соответствуют сценарию медленно эволюционирующей двойной СМЧД. Большая чирп-масса ($M_c \sim 10^{10} M_{\odot}$) и ожидаемая амплитуда сигнала ($h_0 \sim 10^{-15}$) делают ЗС 454.3 одним из наиболее мощных источников в *РТА*-диапазоне и потенциальным вкладчиком в анизотропию стохастического ГВ-фона.

Список литературы

1. Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J. Massive black hole binaries in active galactic nuclei // *Nature*. 1980. Vol. 287, no. 5780, P. 307–309.
2. Volonteri M., Haardt F., Madau P. The assembly and merging history of supermassive black holes in hierarchical models of galaxy formation // *The Astrophysical Journal*. 2003. Vol. 582, no. 2. P. 559–573.
3. Mayer L. Massive black hole binaries in gas-rich galaxy mergers; multiple regimes of orbital decay and interplay with gas inflows // *Classical and Quantum Gravity*. 2013. Vol. 30, no. 24. Art. 244008.
4. Milosavljević M., Merritt D. Formation of galactic nuclei // *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 563, no. 1. P. 34–62.
5. Sesana A. Insights into the astrophysics of supermassive black hole binaries from pulsar timing observations // *Classical and Quantum Gravity*. 2013. Vol. 30, no. 22. Art. 224014.
6. Foster R. S., Backer D. C. Constructing a pulsar timing array // *Astrophysical Journal*. 1990. Vol. 361. P. 300–308.
7. Hobbs G. et al. The international pulsar timing array project: using pulsars as a gravitational wave detector // *Classical and Quantum Gravity*. 2010. Vol. 27, no. 8. Art. 084013.
8. Agazie G. et al. The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background // *The Astrophysical Journal Letters*. 2023. Vol. 951, no. 1. Art. L8.
9. Antoniadis J. et al. The second data release from the European Pulsar Timing Array-III. Search for gravitational wave signals // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. Vol. 678. Art. A50.
10. Reardon D. J. et al. Search for an isotropic gravitational-wave background with the Parkes Pulsar Timing Array // *The Astrophysical Journal Letters*. 2023. Vol. 951, no. 1. Art. L6.
11. Xu H. et al. Searching for the nano-hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese pulsar timing array data release I // *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2023. Vol. 23, no. 7. Art. 075024.
12. Grunthal K. et al. The role of distant pulsars in the detectability of continuous gravitational waves // *Astronomy & Astrophysics*. 2026. Vol. 706. Art. A299.
13. Rinaldi S. Expect the unexpected: Augmented mixture models for black-hole-population studies // *Astronomy & Astrophysics*. 2026. Vol. 706. Art. A361.
14. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. Most massive double black hole 3C 454.3 and powerful gravitational wave radiation // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. Vol. 648. Art. A27.
15. Sillanpää, A. et al. OJ 287-Binary pair of supermassive black holes // *Astrophysical Journal*. Part 1 (ISSN 0004-637X). 1988. Vol. 325. P. 628–634.
16. Valtonen M. J. et al. Primary black hole spin in OJ 287 as determined by the general relativity centenary flare // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016. Vol. 819, no. 2. Art. L37.
17. Peters P. C. Gravitational radiation and the motion of two point masses // *Physical Review*. 1964. Vol. 136, no. 4B. Art. B1224.
18. Valtonen M. J. et al. Primary black hole spin in OJ 287 as determined by the general relativity centenary flare // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016. Vol. 819, no. 2. Art. L37.
19. Curyło M. et al. Frequency-and phase-resolved polarimetry of millisecond pulsars and its application to timing // *arXiv preprint arXiv:2512.09220*. 2025.
20. Sesana A., Vecchio A. Measuring the parameters of massive black hole binary systems with pulsar timing array observations of gravitational waves // *Physical Review. D-Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*. 2010. Vol. 81, no. 10. Art. 104008.
21. Volvach A., Volvach L., Larionov M. Characterizing Close Binary Supermassive Black Holes in Blazars 3C 273, 3C 454.3, S0528+134, and AO 0235+164: Insights from Multifrequency Radio Monitoring and Gravitational-wave Prospects // *The Astrophysical Journal*. 2025. Vol. 992, no. 1. Art. 60.

Информация об авторах

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

A Supermassive Black Hole Binary in 3C 454.3: Orbital Dynamics and Nanohertz Gravitational-Wave Emission

L. N. Volvach and A. E. Volvach

*Radio Astronomy and Geodynamics Department,
Crimean Astrophysical Observatory, Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru*

Received: April 13, 2026
Peer-reviewed: April 20, 2026
Accepted: April 20, 2026

Abstract: We investigate the orbital configuration and gravitational-wave properties of a candidate supermassive black hole binary in the blazar 3C 454.3 ($z=0.859$). Long-term radio monitoring reveals a persistent quasi-periodic modulation with an observed period of approximately 2.3 years. Applying a relativistic period transformation with a jet Lorentz factor $\gamma=5$ yields an intrinsic orbital period of about 31 years. For component masses $M=2.4\times10^{10}M_{\odot}$, $m=6.8\times10^9M_{\odot}$, the corresponding Keplerian semi-major axis is $a\approx4.6\times10^{17}$ cm (~0.15 pc). This configuration produces nanohertz gravitational waves with a characteristic frequency $f_{GW}\sim10^{-9}$ Hz, and an expected strain amplitude $h_0\sim(7-9)\times10^{-16}$, placing the system within the sensitivity range of pulsar timing arrays (PTAs). The merger timescale is estimated to be $\sim5.7\times10^4$ years. Over the full 60-year observational baseline, the predicted secular period change amounts to only a few days, far below the threshold for detection in electromagnetic data. The derived parameters indicate that 3C 454.3 is one of the most promising candidates for nanohertz gravitational-wave emission. Its large chirp mass and cosmological distance suggest that it may contribute significantly to the anisotropic component of the stochastic gravitational-wave background and could become a resolvable continuous-wave source for future PTA observations.

Keywords: gravitational waves, supermassive black hole binaries, pulsar timing arrays.

For citation (APA): L. N. Volvach and A. E. Volvach (2026). A Supermassive Black Hole Binary in 3C 454.3: Orbital Dynamics and Nanohertz Gravitational-Wave Emission. *Informations and Radio Technologies*, 9(4), 574–590, doi: 10.21227/k7vr-h292.

References

1. M. C. Begelman, et al., “Massive black hole binaries in active galactic nuclei,” *Nature*, vol. 287, no. 5780, pp. 307–309, 1980.
2. M. Volonteri, et al., “The assembly and merging history of supermassive black holes in hierarchical models of galaxy formation,” *Astrophysical Journal*, vol. 582, no. 2, pp. 559–573, 2003.

3. L. Mayer, “Massive black hole binaries in gas-rich galaxy mergers; multiple regimes of orbital decay and interplay with gas inflows,” *Classical and Quantum Gravity*, vol. 30, no. 24, art. 244008, 2013.
4. M. Milosavljević and D. Merritt “Formation of galactic nuclei,” *Astrophysical Journal*, vol. 563, no. 1, pp. 34–62, 2001.
5. A. Sesana, “Insights into the astrophysics of supermassive black hole binaries from pulsar timing observations,” *Classical and Quantum Gravity*, vol. 30, no. 22, art. 224014, 2013.
6. R. S. Foster and D. C. Backer, “Constructing a pulsar timing array,” *Astrophysical Journal*, vol. 361, pp. 300–308, 1990.
7. G. Hobbs, et al., “The international pulsar timing array project: using pulsars as a gravitational wave detector,” *Classical and Quantum Gravity*, vol. 27, no. 8, art. 084013, 2010.
8. G. Agazie, et al. “The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background,” *Astrophysical Journal Letters*, vol. 951, no. 1, art. L8, 2023.
9. J. Antoniadis, et al. “The second data release from the European Pulsar Timing Array-III. Search for gravitational wave signals,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 678, art. A50, 2023.
10. D. J. Reardon, et al., “Search for an isotropic gravitational-wave background with the Parkes Pulsar Timing Array,” *Astrophysical Journal Letters*, vol. 951, no. 1, art. L6, 2023.
11. H. Xu, et al., “Searching for the nano-hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese pulsar timing array data release I,” *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, no. 7, art. 075024, 2023.
12. K. Grunthal, et al., “The role of distant pulsars in the detectability of continuous gravitational waves,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 706, art. A299, 2026.
13. S. Rinaldi, “Expect the unexpected: Augmented mixture models for black-hole-population studies,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 706, art. A361, 2026.
14. A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, “Most massive double black hole 3C 454.3 and powerful gravitational wave radiation,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 648, art. A27, 2021.
15. A. Sillanpää, et al., “OJ 287-Binary pair of supermassive black holes,” *Astrophysical Journal*, part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 325, pp. 628–634, 1988.
16. M. J. Valtonen, et al., “Primary black hole spin in OJ 287 as determined by the general relativity centenary flare,” *Astrophysical Journal Letters*, vol. 819, no. 2, art. L37, 2016.
17. P. C. Peters, “Gravitational radiation and the motion of two point masses,” *Physical Review*, vol. 136, no. 4B, art. B1224, 1964.
18. M. J. Valtonen, et al., “Primary black hole spin in OJ 287 as determined by the general relativity centenary flare,” *Astrophysical Journal Letters*, vol. 819, no. 2, art. L37, 2016.
19. M. Curyło, et al., “Frequency-and phase-resolved polarimetry of millisecond pulsars and its application to timing,” arXiv preprint arXiv:2512.09220, 2025.
20. A. Sesana and A. Vecchio, “Measuring the parameters of massive black hole binary systems with pulsar timing array observations of gravitational waves,” *Physical Review. D-Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, vol. 81, no. 10, art. 104008, 2010.
21. A. Volvach, L. Volvach, and M. Larionov, “Characterizing Close Binary Supermassive Black Holes in Blazars 3C 273, 3C 454.3, S0528+134, and AO 0235+164: Insights from Multifrequency Radio Monitoring and Gravitational-wave Prospects,” *Astrophysical Journal*, vol. 992, no. 1, art., 60, 2025.

Information about the authors

Larisa N. Volvach, FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

Alexandr E. Volvach, FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

Временной подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции

Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация

degtyaryov1966@yandex.ru

Получено: 13 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 20 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 20 апреля 2026 г.

Аннотация: С целью борьбы с межсимвольной интерференцией, вызванной многолучевым распространением радиоволн, предложено использовать адаптивный фильтр. При проведении расчетов считается, что линейные искажения в канале передачи информации отсутствуют. Между передаваемыми канальными символами имеется защитный временной интервал. Длительность защитного интервала выбрана такой, чтобы интерферирующий канальный символ с максимальным временем задержки не влиял на предыдущий и последующий канальные символы. Число интерферирующих символов считается известным. Для адаптации фильтра определяются коэффициенты ослабления и времена задержек принимаемого канального символа и его задержанных копий. Системы уравнений для определения искоемых величин строятся в предположении, что канальные символы имеют вид задержанных копий импульсной характеристики формирующего фильтра модулятора. Импульсная характеристика формирующего фильтра модулятора считается известной. Предложено три способа построения такой системы уравнений. Показано, что на точность определения искоемых величин влияет аддитивный канальный шум. Сделано предположение о том, что уровень этого влияния зависит также от способа определения искоемых величин. Приводится структурная схема адаптивного фильтра.

Ключевые слова: межсимвольная интерференция, многолучевое распространение радиоволн, адаптивная фильтрация, фильтр Колмогорова — Винера, трансверсальный фильтр, спектральная плотность мощности шума, комплексный коэффициент передачи, аддитивный канальный шум.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л. Спектральный подход к адаптивной фильтрации сигнала

лов в условиях межсимвольной интерференции // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 591—599.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дегтярев, А. Н. Временной подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции / А. Н. Дегтярев, Д. Ю. Зеленкевич, А. Л. Поляков, И. Л. Афонин // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 591—599.

1. Введение

Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации (РТСПИ) является одной из важных проблем теории и техники связи. Современные РТСПИ используют каналы передачи информации, в которых уровень межсимвольной интерференции (МСИ) существенно превышает мощность аддитивного белого гауссовского шума [1—7].

Причинами МСИ являются линейные искажения, вызываемые неидеальностью канала передачи информации, и многолучевое распространение радиоволн.

В работах [1—5] рассмотрены классические методы борьбы с МСИ: использование эквалайзера; нелинейной обработки сигналов, в частности, прием с обратной связью по решению и т. д.

Кроме того, при аддитивном белом гауссовском шуме применяются алгоритмы, минимизирующие вероятность ошибки при приеме сигнальной последовательности на основе алгоритма Витерби, вычислительная сложность которого находится в экспоненциальной зависимости от длительности импульсной характеристики канала связи [5—7].

В работе [8] для снижения уровня МСИ предлагается осуществить ортогонализацию интерферирующих и принимаемого канальных символов. Предполагается, что указанный метод ортогонализации позволит одновременно снизить уровень МСИ и межканальных помех и не требует от приемника больших вычислительных возможностей. В качестве приемника используется коррелятор. Однако использование коррелятора требует наличие синхронизации передатчика и приемника. Кроме того этот метод предлагается использовать только для снижения уровня МСИ, вызванной неидеальностью канала передачи информации.

Целью настоящей работы является разработка метода построения фильтра, позволяющего снизить уровень МСИ, обусловленной многолучевым распространением радиоволн.

2. Формализация задачи

В первом приближении будем считать, что линейные искажения и аддитивный шум в канале передачи информации отсутствуют.

Между передаваемыми канальными символами имеется защитный временной интервал. Длительность защитного интервала выбрана такой, чтобы интерферирующий канальный символ с максимальным временем задержки не влиял на предыдущий и последующий канальные символы.

В этом случае при поэлементном приеме канального символа $s_0(t)$ на вход приемника поступает сигнал

$$s_{\text{вх}}(t) = k_0 s_0(t - t_{30}) + \sum_{n=1}^N k_n s_0(t - t_{3n}), \quad (1)$$

где k_0 — коэффициент ослабления принимаемого канального символа $s_0(t)$, t_{30} — время задержки принимаемого канального символа, k_n — коэффициент ослабления n -й задержанной на время t_{3n} копии $s_0(t - t_{3n})$ принимаемого канального символа, N — число интерферирующих символов.

Число интерферирующих символов N будем считать известным. Требуется определить величины k_0 , t_{30} , k_n и t_{3n} .

Принимаемый канальный символ $s_0(t)$ можно рассматривать как импульсную характеристику формирующего фильтра модулятора и записать в виде

$$s_0(t) = 1(t) \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m t}, \quad (2)$$

где M — порядок формирующего фильтра модулятора, $A_m e^{-\delta_m t}$ — вычеты его передаточной функции.

На основании выражений (1) и (2) входной сигнал приемника запишем в виде

$$s_{\text{вх}}(t) = 1(t - t_{30}) k_0 \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m (t - t_{30})} + \sum_{n=1}^N 1(t - t_{3n}) k_n \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m (t - t_{3n})}.$$

Таким образом, задача определения искомых величин сводится к составлению системы уравнений на основе знания об импульсной характеристике формирующего фильтра модулятора и о виде входного сигнала приемника $s_{\text{вх}}(t)$, ее решению и проверке решения.

3. Первый способ определения искомых величин

Произведем интегрирование входного сигнала $s_{\text{вх}}(t)$ в пределах от $t_1 < t_0$ до τ , считая верхний предел переменной величиной:

$$S_{\text{вх}}(\tau) = \int_{t_1}^{\tau} s_{\text{вх}}(t) dt = k_0 \int_{t_{30}}^{\tau} \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m (t - t_{30})} dt + \sum_{n=1}^N k_n \int_{t_{3n}}^{\tau} \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m (t - t_{3n})} dt.$$

Определим производную от полученного выражения по верхнему пределу

$$y(\tau) = \frac{dS_{\text{вх}}(\tau)}{d\tau} = k_0 \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m(\tau-t_{s0})} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m(\tau-t_{sn})}. \quad (3)$$

Проведем измерения мгновенных значений полученной производной в различные моменты времени τ_i и составим систему уравнений для определения искомых величин:

$$\left. \frac{dS_{\text{вх}}(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i} = k_0 \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m(\tau_i-t_{s0})} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M A_m e^{-\delta_m(\tau_i-t_{sn})}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, 2(N+1)$.

Система уравнений (4) является нелинейной и имеет множество решений. Из этого множества необходимо выбрать единственное решение, которое удовлетворяет системе неравенств

$$\begin{cases} k_0 > k_1 > k_2 > \dots > k_N, \\ t_{s0} < t_{s1} < t_{s2} < \dots < t_{sN}. \end{cases} \quad (5)$$

4. Второй способ определения искомых величин

Для составления системы уравнений i -кратно продифференцируем выражение (3), $i = 0, 1, 2, \dots, M = 2N+1$.

После дифференцирования получаем

$$\frac{d^i y(\tau)}{d\tau^i} = k_0 \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{-\delta_m(\tau-t_{s0})} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{-\delta_m(\tau-t_{sn})}. \quad (6)$$

Уравнения получим, подставляя в формулу (6) некоторое значение времени $\tau = \tau_1$

$$\left. \frac{d^i y(\tau)}{d\tau^i} \right|_{\tau=\tau_1} = k_0 \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{-\delta_m(\tau_1-t_{s0})} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{-\delta_m(\tau_1-t_{sn})}. \quad (7)$$

Уравнение упрощается если положить $\tau_1 = 0$. В этом случае из (7) имеем

$$\left. \frac{d^i y(\tau)}{d\tau^i} \right|_{\tau=0} = k_0 \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{\delta_m t_{s0}} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M (-\delta_m)^i A_m e^{\delta_m t_{sn}}, \quad (8)$$

Системы уравнений (7) и (8) являются нелинейными, поэтому при их решении необходимо производить проверку с использованием неравенств (5).

5. Третий способ определения искомых величин

Для составления системы уравнений i -кратно проинтегрируем выражение (3), $i = 0, 1, 2, \dots, M = 2N + 1$.

После интегрирования получаем

$$\int \dots \int y(\tau) \underbrace{d\tau \dots d\tau}_i = k_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{-\delta_m(\tau - t_0)} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{-\delta_m(\tau - t_n)}. \quad (9)$$

Уравнения получим, подставляя в формулу (9) некоторое значение $\tau = \tau_1$

$$\left. \int \dots \int y(\tau) \underbrace{d\tau \dots d\tau}_i \right|_{\tau=\tau_1} = k_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{-\delta_m(\tau_1 - t_0)} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{-\delta_m(\tau_1 - t_n)}. \quad (10)$$

Уравнение упрощается если положить $\tau_1 = 0$. В этом случае из (10) имеем

$$\left. \int \dots \int y(\tau) \underbrace{d\tau \dots d\tau}_i \right|_{\tau=0} = k_0 \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{\delta_m t_0} + \sum_{n=1}^N k_n \sum_{m=1}^M \frac{1}{(-\delta_m)^i} A_m e^{\delta_m t_n}, \quad (11)$$

Системы уравнений (10) и (11) являются нелинейными, поэтому при их решении необходимо производить проверку с использованием неравенств (5).

6. Влияние аддитивного шума на определение искомых величин

Рассмотрим влияние аддитивного канального шума $x(t)$ на определение искомых величин вторым способом.

Пусть на входе приемника кроме входного сигнала (1) действует аддитивный белый гауссовский шум со спектральной плотностью мощности $W_x(\omega) = N_0 / 2$. Полоса пропускания приемника $\Delta\omega = \omega_{\max} - \omega_{\min}$ равна ширине спектральной плотности принимаемого канального символа.

Взятие производной i -го порядка дает дисперсию в виде

$$D_{yi} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \omega^{2i} W_x(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{N_0}{2} \cdot \frac{\omega_{\max}^{2i+1} - \omega_{\min}^{2i+1}}{2i+1}. \quad (12)$$

Следовательно, порядок производной спектральной плотности аддитивного канального шума увеличивает дисперсию помехи, которая влияет на точность вычисления искомых величин.

Рассмотрим влияние аддитивного канального шума на определение искомых величин третьим способом.

i -кратное интегрирование входного шума дает дисперсию в виде

$$D_{yi} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{1}{\omega^{2i}} W_x(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{N_0}{2} \cdot \frac{\omega_{\max}^{-2i+1} - \omega_{\min}^{-2i+1}}{1 - 2i}. \quad (12)$$

Следовательно, порядок производной спектральной плотности аддитивного канального шума уменьшает дисперсию помехи, которая влияет на точность вычисления искомых величин.

С целью снижения влияния многократных операций дифференцирования или интегрирования на точность вычисления искомых величин на входе приемника необходимо устанавливать фильтр, снижающий среднюю квадратическую ошибку восстановления сигнала на фоне аддитивного канального шума. Таким фильтром является фильтр Колмогорова — Винера.

7. Структурная схема адаптивного фильтра

Структурная схема адаптивного фильтра (рис. 1) состоит из фильтра Колмогорова — Винера (ФКВ); устройства вычисления интеграла с переменным верхним пределом (И); устройства дифференцирования (Д); устройства, вычисляющего искомые величины (ВУ) с использованием одного из рассмотренных способов; трансверсального фильтра (ТФ), коэффициенты и времена задержек которого изменяются в соответствии с искомыми величинами.

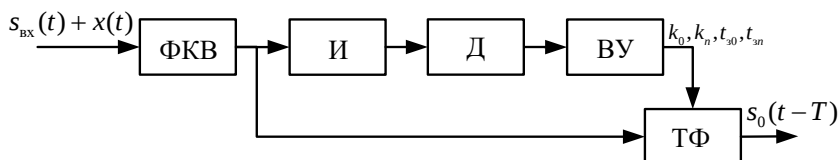


Рис. 1. Структурная схема адаптивного фильтра.

Fig. 1. A block diagram of an adaptive filter

8. Заключение

Предложенные способы определения неизвестных коэффициентов ослабления и временных задержек принимаемого и интерферирующих символов сводятся к решению систем нелинейных уравнений. Решение выбирается с использованием приведенных неравенств.

Показано, что на точность определения искомых величин влияет аддитивный канальный шум.

Есть основания полагать, что уровень этого влияния зависит также от способа определения искомых величин.

Сравнительный анализ зависимости точности определения искомых величин от дисперсии аддитивного канального шума и способа их вычисления составляет направление дельнейших исследований.

Список литературы

- [1] Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М. : Радио и связь, 1985. 272 с.
- [2] Бельфиоре К. А., Парк Дж. Х. Компенсация посредством решающей обратной связи // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1979. Т. 67, № 8. С. 67—83.
- [3] Кловский Д. Д., Николаев Б. И. Инженерная реализация радиотехнических схем. М. : Связь, 1975. 200 с.
- [4] Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. М. : Связь, 1979. 592 с.
- [5] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.
- [6] Хабаров Е. О. Анализ характеристик ряда алгоритмов демодуляции в каналах с межсимвольной интерференцией // Электросвязь. 2008. № 5. С. 50—54.
- [7] Мартышевская Д. А. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной передачи цифровых сигналов с помощью подавления межсимвольной интерференции : дис. канд. техн. наук : Владимир, 2017. 141 с.
- [8] Дегтярев А. Н. Ортогонализация функций и повышение помехоустойчивости высокоскоростных систем передачи информации. М. : Инфра-М, 2019. 152 с.

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.

Зеленкевич Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Поляков Александр Леонидович, 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.

The Temporal Approach to Adaptive Signal Filtering under Intersymbol Interference

A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin

Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
andegtyarev@sevsu.ru

Received: April 13, 2026
Peer-reviewed: April 20, 2026
Accepted: April 20, 2026

Abstract: To combat intersymbol interference caused by multipath propagation of radio waves, an adaptive filter is proposed. It is assumed that there are no linear distortions in the information transmission channel. A guard time interval exists between transmitted channel symbols. The duration of the guard interval is chosen such that an interfering channel symbol with the maximum delay time does not affect the preceding or following channel symbols. The number of interfering symbols is assumed to be known. To adapt the filter, the attenuation coefficients and delay times of the received channel symbol and its delayed copies are determined. Systems of equations for determining the desired quantities are constructed under the assumption that channel symbols are delayed copies of the impulse response of the modulator's shaping filter. The impulse response of the modulator's shaping filter is assumed to be known. Three methods for constructing such a system of equations are proposed. It is shown that additive channel noise affects the accuracy of determining the desired quantities. It is hypothesized that the level of this influence also depends on the method for determining the desired quantities. A block diagram of the adaptive filter is provided.

Keywords: intersymbol interference, multipath propagation of radio waves, adaptive filtering, Kolmogorov–Wiener filter, transversal filter, noise power spectral density, complex transmission coefficient, additive channel noise.

For citation (IEEE): A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin, “The Temporal Approach to Adaptive Signal Filtering under Intersymbol Interference,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 591–599, 2026, doi: 10.21227/gzvt-kh51. (In Russ.).

References

- [1] A. G. Zyuko, *Noise immunity and efficiency of information transmission systems*, Moscow: Radio i svyaz', 1985. (In Russ).
- [2] K. A. Belfiore and J. H. Park, Compensation through decisive feedback,” *Proceedings of the Institute of Electrical and Radio Electronics Engineers*, vol. 67, no. 8, pp. 67–83, 1979.
- [3] D. D. Klovsky and B. I. Nikolaev, *Engineering implementation of radio engineering circuits*, Moscow: Svyaz, 1975. (In Russ).

- [4] J. J. Spilker, *Digital Communications by Satellite*, Prentice Hall, 1977.
- [5] B. Sklar, *Digital Communications. Fundamentals and Applications*, Pearson Education, 2021.
- [6] E. O. Khabarov, "Studying characteristics of series of algorithms in intersymbol interference channels," *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 50–54, 2008. (In Russ).
- [7] D. A. Martyshevskaya, "Increasing the noise immunity of high-speed digital signal transmission using intersymbol interference suppression," CSc thesis, Vladimir, 2017. (In Russ).
- [8] A. N. Degtyarev, *Orthogonalization of functions and increasing noise immunity of high-speed information transmission systems*, Moscow: Infra-M, 2019. (In Russ).

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.

Dmitriy Yu. Zelenkevich, Graduate student 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.

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.

Спектральный подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции

Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация

degtyaryov1966@yandex.ru

Получено: 7 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 15 апреля 2026 г.

Аннотация: С целью борьбы с межсимвольной интерференцией, вызванной многолучевым распространением радиоволн предложено использовать адаптивный фильтр. При проведении расчетов считается, что линейные искажения в канале передачи информации отсутствуют. Между передаваемыми канальными символами имеется защитный временной интервал. Длительность защитного интервала выбрана такой, чтобы интерферирующий канальный символ с максимальным временем задержки не влиял на предыдущий и последующий канальные символы. Число интерферирующих символов считается известным. Для адаптации фильтра определяются коэффициенты ослабления и времена задержек принимаемого канального символа и его задержанных копий. Системы уравнений для определения искоемых величин строятся на основе спектрального представления принимаемой смеси. Предложено три способа построения такой системы уравнений. Показано, что на точность определения искоемых величин влияет аддитивный канальный шум. Сделано предположение о том, что уровень этого влияния зависит также от способа определения искоемых величин. Приводится структурная схема адаптивного фильтра.

Ключевые слова: межсимвольная интерференция, многолучевое распространение радиоволн, адаптивная фильтрация, фильтр Колмогорова — Винера, трансверсальный фильтр, спектральная плотность мощности шума, комплексный коэффициент передачи, аддитивный канальный шум.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дегтярев А. Н., Зеленкевич Д. Ю., Поляков А. Л., Афонин И. Л. Спектральный подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 600—609.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дегтярев, А. Н. Спектральный подход к адаптивной фильтрации сигналов в условиях межсимвольной интерференции / А. Н. Дегтярев, Д. Ю. Зеленкевич, А. Л. Поляков, И. Л. Афонин // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 600—609.

1. Введение

Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации (РТСПИ) является одной из важных проблем теории и техники связи. Современные РТСПИ используют каналы передачи информации, в которых уровень межсимвольной интерференции (МСИ) существенно превышает мощность аддитивного белого гауссовского шума [1—7].

Причинами МСИ являются линейные искажения, вызываемые неидеальностью канала передачи информации, и многолучевое распространение радиоволн.

В работах [1—5] рассмотрены классические методы борьбы с МСИ: использование эквалайзера; нелинейной обработки сигналов, в частности, прием с обратной связью по решению и т. д.

Кроме того, при аддитивном белом гауссовском шуме применяются алгоритмы, минимизирующие вероятность ошибки при приеме сигнальной последовательности на основе алгоритма Витерби, вычислительная сложность которого находится в экспоненциальной зависимости от длительности импульсной характеристики канала связи [5—7].

В работе [8] для снижения уровня МСИ предлагается осуществить ортогонализацию интерферирующих и принимаемого канальных символов. Предполагается, что указанный метод ортогонализации позволит одновременно снизить уровень МСИ и межканальных помех и не требует от приемника больших вычислительных возможностей. В качестве приемника используется коррелятор. Однако использование коррелятора требует наличие синхронизации передатчика и приемника. Кроме того этот метод предлагается использовать только для снижения уровня МСИ, вызванной неидеальностью канала передачи информации.

Целью настоящей работы является разработка метода построения фильтра, позволяющего снизить уровень МСИ, обусловленной многолучевым распространением радиоволн.

2. Формализация задачи

В первом приближении будем считать, что линейные искажения и аддитивный шум в канале передачи информации отсутствуют. Между передаваемыми канальными символами имеется защитный временной ин-

тервал. Длительность защитного интервала выбрана такой, чтобы интерферирующий канальный символ с максимальным времени задержки не влиял на предыдущий и последующий канальные символы.

В этом случае при поэлементном приеме канального символа $s_0(t)$ на вход приемника поступает сигнал

$$s_{\text{вх}}(t) = k_0 s_0(t - t_{30}) + \sum_{n=1}^N k_n s_0(t - t_{3n}), \quad (1)$$

где k_0 — коэффициент ослабления принимаемого канального символа $s_0(t)$, t_{30} — время задержки принимаемого канального символа, k_n — коэффициент ослабления n -й задержанной на время t_{3n} копии $s_0(t - t_{3n})$ принимаемого канального символа, N — число интерферирующих символов. Число интерферирующих символов N будем считать известным. Требуется определить величины k_0 , t_{30} , k_n и t_{3n} .

Спектральная плотность входного сигнала приемника $s_{\text{вх}}(t)$ определяется как прямое преобразование Фурье от выражения (1) и имеет вид

$$S_{\text{вх}}(j\omega) = k_0 S_0(j\omega) e^{-j\omega t_{30}} + \sum_{n=1}^N k_n S_0(j\omega) e^{-j\omega t_{3n}}. \quad (2)$$

На основании формулы (2) определим комплексный коэффициент передачи канала передачи информации как

$$K_{\text{к}}(j\omega) = \frac{S_{\text{вх}}(j\omega)}{S_0(j\omega)} = k_0 e^{-j\omega t_{30}} + \sum_{n=1}^N k_n e^{-j\omega t_{3n}}. \quad (3)$$

Таким образом, задача определения искоемых величин сводится к составлению системы уравнений на основании знания о комплексном коэффициенте передачи канала передачи информации

$$K_{\text{к}}(j\omega) = \frac{S_{\text{вх}}(j\omega)}{S_0(j\omega)},$$

ее решению и проверки решения.

3. Первый способ определения искоемых величин

Первый способ составления системы уравнений основан на измерении $K_{\text{к}}(j\omega)$ (3) при различных значениях частоты ω :

$$K_{\text{к}}(j\omega_m) = k_0 e^{-j\omega_m t_{30}} + \sum_{n=1}^N k_n e^{-j\omega_m t_{3n}}, \quad (4)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, M = 2(N + 1)$.

Система уравнений (4) является нелинейной и имеет множество решений. Из этого множества необходимо выбрать единственное решение, которое удовлетворяет системе неравенств

$$\begin{cases} k_0 > k_1 > k_2 > \dots > k_N, \\ t_{30} < t_{31} < t_{32} < \dots < t_{3N}. \end{cases} \quad (5)$$

4. Второй способ определения искомых величин

Для составления системы уравнений m -кратно продифференцируем выражение (3), $m = 0, 1, 2, \dots, M = 2N + 1$.

После дифференцирования получаем

$$\frac{d^m K_k(j\omega)}{d\omega^m} = (-jt_{30})^m k_0 e^{-j\omega t_{30}} + (-j)^m \sum_{n=1}^N k_n t_{3n}^m e^{-j\omega t_{3n}}. \quad (6)$$

Уравнения получим, подставляя в формулу (6) некоторое значение частоты $\omega = \omega_1$

$$\left. \frac{d^m K_k(j\omega)}{d\omega^m} \right|_{\omega=\omega_1} = (-jt_{30})^m k_0 e^{-j\omega_1 t_{30}} + (-j)^m \sum_{n=1}^N k_n t_{3n}^m e^{-j\omega_1 t_{3n}}. \quad (7)$$

Уравнение упрощается если положить $\omega_1 = 0$, т. е. осуществлять последетекторную обработку сигнала. В этом случае из (7) имеем

$$\left. \frac{d^m K_{\text{нчк}}(j\omega)}{d\omega^m} \right|_{\omega=0} = (-jt_{30})^m k_0 + (-j)^m \sum_{n=1}^N k_n t_{3n}^m, \quad (8)$$

где $K_{\text{нчк}}(j\omega)$ — комплексный коэффициент передачи низкочастотного аналога канала передачи информации.

Системы уравнений (7) и (8) являются нелинейными, поэтому при их решении необходимо производить проверку с использованием неравенств (5).

5. Третий способ определения искомых величин

Для составления системы уравнений m -кратно проинтегрируем выражение (3), $m = 0, 1, 2, \dots, M = 2N + 1$.

После интегрирования получаем

$$\int \dots \int K_k(j\omega) \underbrace{d\omega \dots d\omega}_m = \frac{k_0}{(-jt_{30})^m} e^{-j\omega t_{30}} + \frac{1}{(-j)^m} \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{t_{3n}^m} e^{-j\omega t_{3n}}. \quad (9)$$

Уравнения получим, подставляя в формулу (9) некоторое значение частоты $\omega = \omega_1$

$$\int \dots \int K_k(j\omega) \underbrace{d\omega \dots d\omega}_m = \frac{k_0}{(-jt_{z0})^m} e^{-j\omega_1 t_{z0}} + \frac{1}{(-j)^m} \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{t_{zn}^m} e^{-j\omega_1 t_{zn}}. \quad (10)$$

Уравнение упрощается если положить $\omega_1 = 0$, т. е. осуществлять последетекторную обработку сигнала. В этом случае из (10) имеем

$$\int \dots \int K_{\text{нчк}}(j\omega) \underbrace{d\omega \dots d\omega}_m = \frac{k_0}{(-jt_{z0})^m} + \frac{1}{(-j)^m} \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{t_{zn}^m}, \quad (11)$$

Системы уравнений (10) и (11) являются нелинейными, поэтому при их решении необходимо производить проверку с использованием неравенств (5).

6. Влияние аддитивного шума на определение искомых величин

Рассмотрим влияние аддитивного канального шума на определение искомых величин вторым способом.

Пусть на входе приемника кроме входного сигнала (1) действует реализация $x(t)$ аддитивного шума, которая наблюдается в течение интервала времени T , равному интервалу следования канальных символов.

Спектральная плотность этой реализации определяется как

$$X(j\omega) = \int_0^T x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Производная $X(j\omega)$ m -го порядка равна,

$$Y_m(j\omega) = \frac{d^m X(j\omega)}{d\omega^m} = \int_0^T (-jt)^m x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (12)$$

Спектральная плотность мощности $W_{ym}(\omega)$ помехи с m -кратно продифференцированной спектральной плотностью (12) равна

$$W_{ym}(\omega) = M \left\{ Y_m(j\omega) Y_m^*(j\omega) \right\},$$

где $Y_m^*(j\omega)$ — спектральная плотность комплексно сопряженная с $Y_m(j\omega)$, $M \{ \dots \}$ — операция определения математического ожидания.

Имеем

$$W_{ym}(\omega) = M \left\{ \int_0^T (-jt)^m x(t) e^{-j\omega t} dt \int_0^T (jt)^m x(t) e^{j\omega t} dt \right\} =$$

$$= M \left\{ \int_0^T \int_0^T (-jt)^m (jt_1)^m x(t)x(t_1) e^{-j\omega t} e^{j\omega t_1} dt dt_1 \right\} =$$

$$= M \left\{ \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m x(t)x(t_1) e^{-j\omega(t-t_1)} dt dt_1 \right\} = \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m B_x(t, t_1) e^{-j\omega(t-t_1)} dt dt_1,$$

где $B_x(t, t_1)$ — автокорреляционная функция аддитивного канального шума.

Если аддитивный канальный шум является эргодическим случайным процессом, то $B_x(t, t_1) = B_x(t - t_1)$ и получаем

$$W_{ym}(\omega) = \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m B_x(t - t_1) e^{-j\omega(t-t_1)} dt dt_1.$$

Определяем дисперсию помехи с m -кратно продифференцированной спектральной плотностью:

$$D_{ym} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{ym}(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m B_x(t - t_1) e^{-j\omega(t-t_1)} dt dt_1 d\omega =$$

$$= \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m B_x(t - t_1) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega(t-t_1)} d\omega dt dt_1 = \int_0^T \int_0^T t^m t_1^m B_x(t - t_1) \delta(t - t_1) dt dt_1 =$$

$$= \int_0^T t^{2m} B_x(0) dt = B_x(0) \left(\frac{T}{2} \right)^{2m+1} = D_x \left(\frac{T}{2} \right)^{2m+1},$$

где D_x — дисперсия аддитивного канального шума.

Таким образом, порядок производной спектральной плотности аддитивного канального шума увеличивает дисперсию помехи, которая влияет на точность вычисления искомых величин.

С целью снижения этого влияния на входе приемника необходимо устанавливать фильтр, снижающий среднюю квадратическую ошибку восстановления сигнала на фоне аддитивного канального шума. Таким фильтром является фильтр Колмогорова — Винера.

7. Структурная схема адаптивного фильтра

Структурная схема адаптивного фильтра (рис. 1) состоит из фильтра Колмогорова — Винера (ФКВ); устройства вычисления прямого преобразования Фурье (ППФ); устройства, вычисляющего искомые величины (ВУ) с использованием одного из рассмотренных способов; трансверсального фильтра (ТФ), коэффициенты и времена задержек которого изменяются в соответствии с искомыми величинами.

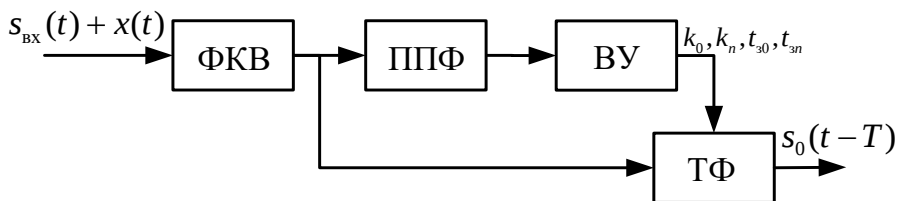


Рис. 1. Структурная схема адаптивного фильтра.

Fig. 1. A block diagram of an adaptive filter

8. Заключение

Предложенные способы определения неизвестных коэффициентов ослабления и временных задержек принимаемого и интерферирующих символов сводятся к решению систем нелинейных уравнений. Решение выбирается с использованием приведенных неравенств.

Показано, что на точность определения искомых величин влияет аддитивный канальный шум.

Есть основания полагать, что уровень этого влияния зависит также от способа определения искомых величин.

Сравнительный анализ зависимости точности определения искомых величин от дисперсии аддитивного канального шума и способа их вычисления составляет направление дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М. : Радио и связь, 1985. 272 с.
- [2] Бельфиоре К. А., Парк Дж. Х. Компенсация посредством решающей обратной связи // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1979. Т. 67, № 8. С. 67—83.
- [3] Кловский Д. Д., Николаев Б. И. Инженерная реализация радиотехнических схем. М. : Связь, 1975. 200 с.
- [4] Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. М. : Связь, 1979. 592 с.
- [5] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.
- [6] Хабаров Е. О. Анализ характеристик ряда алгоритмов демодуляции в каналах с межсимвольной интерференцией // Электросвязь. 2008. № 5. С. 50—54.
- [7] Мартышевская Д. А. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной передачи цифровых сигналов с помощью подавления межсимвольной интерференции : дис. канд. техн. наук : Владимир, 2017. 141 с.
- [8] Дегтярев А. Н. Ортогонализация функций и повышение помехоустойчивости высокоскоростных систем передачи информации. М. : Инфра-М, 2019. 152 с.

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.

Зеленкевич Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Поляков Александр Леонидович, 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.

The Spectral Approach to Adaptive Signal Filtering under Intersymbol Interference

A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin

Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
andegtyarev@sevsu.ru

Received: April 7, 2026
Peer-reviewed: April 15, 2026
Accepted: April 15, 2026

Abstract: To combat intersymbol interference caused by multipath propagation of radio waves, an adaptive filter is proposed. It is assumed that there are no linear distortions in the information transmission channel. A guard time interval exists between transmitted channel symbols. The duration of the guard interval is chosen such that an interfering channel symbol with the maximum delay time does not affect the preceding or following channel symbols. The number of interfering symbols is assumed to be known. To adapt the filter, the attenuation coefficients and delay times of the received channel symbol and its delayed copies are determined. Systems of equations for determining the desired quantities are constructed based on the spectral representation of the received mixture. Three methods for constructing such a system of equations are proposed. It is shown that additive channel noise affects the accuracy of determining the desired quantities. It is hypothesized that the level of this influence also depends on the method for determining the desired quantities. A block diagram of the adaptive filter is provided.

Keywords: intersymbol interference, multipath propagation of radio waves, adaptive filtering, Kolmogorov–Wiener filter, transversal filter, noise power spectral density, complex transmission coefficient, additive channel noise.

For citation (IEEE): A. N. Degtyaryov, D. Yu. Zelenkevich, A. L. Polyakov, and I. L. Afonin, “The Spectral Approach to Adaptive Signal Filtering under Intersymbol Interference,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 600–609, 2026, doi: 10.21227/w21r-ev15. (In Russ.).

References

- [1] A. G. Zyuko, *Noise immunity and efficiency of information transmission systems*, Moscow: Radio i svyaz', 1985. (In Russ).
- [2] K. A. Belfiore and J. H. Park, Compensation through decisive feedback,” *Proceedings of the Institute of Electrical and Radio Electronics Engineers*, vol. 67, no. 8, pp. 67–83, 1979.
- [3] D. D. Klovsky and B. I. Nikolaev, *Engineering implementation of radio engineering circuits*, Moscow: Svyaz, 1975. (In Russ).
- [4] J. J. Spilker, *Digital Communications by Satellite*, Prentice Hall, 1977.
- [5] B. Sklar, *Digital Communications. Fundamentals and Applications*, Pearson Education, 2021.

- [6] E. O. Khabarov, "Studying characteristics of series of algorithms in intersymbol interference channels," *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 50–54, 2008. (In Russ).
- [7] D. A. Martyshevskaya, "Increasing the noise immunity of high-speed digital signal transmission using intersymbol interference suppression," CSc thesis, Vladimir, 2017. (In Russ).
- [8] A. N. Degtyarev, *Orthogonalization of functions and increasing noise immunity of high-speed information transmission systems*, Moscow: Infra-M, 2019. (In Russ).

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.

Dmitriy Yu. Zelenkevich, Graduate student 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.

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.

Компромиссы между скоростью, надежностью и безопасностью в высокоскоростных системах связи

Мордвинова А. Ю.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация
aumordvinova@sevsu.ru

Получено: 7 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 15 апреля 2026 г.

Аннотация: Развитие современных сетей связи сопровождается одновременным ростом требований к скорости передачи данных, надежности и уровню кибербезопасности. При этом меры, направленные на повышение устойчивости и защищенности, неизбежно вносят дополнительные накладные расходы и могут снижать эффективную скорость, доступную пользователю. В работе рассматриваются основные типы компромиссов между скоростью, вероятностью ошибок и затратами на криптографическую защиту в высокоскоростных системах связи. Анализируются показатели пропускной способности и прикладной скорости (goodput), влияние помехоустойчивого кодирования, механизмов ARQ/HARQ и адаптивной модуляции на спектральную эффективность. Отдельное внимание уделено протокольному и вычислительному оверхеду защитных решений (TLS, IPsec, VPN), а также их взаимодействию с особенностями наземных и спутниковых каналов, включая системы с низкоорбитальными спутниками. На основе сопоставления различных сценариев показано, что достижение требуемого уровня надежности и безопасности при ограниченном спектре требует взвешенного выбора параметров и архитектурных решений, а не одностороннего стремления к максимальной скорости.

Ключевые слова: скорость передачи данных, надежность, безопасность, высокоскоростные системы связи, вероятность ошибок, наземные и спутниковые каналы, низкоорбитальные спутники.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мордвинова А. Ю. Компромиссы между скоростью, надежностью и безопасностью в высокоскоростных системах связи // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 610—622.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Мордвинова, А. Ю. Компромиссы между скоростью, надежностью и безопасностью в высокоскоростных системах связи / А. Ю. Мордвинова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 610—622.

1. Введение

Высокоскоростные системы связи сегодня рассматриваются как базовая инфраструктура для цифровой экономики, промышленности и государственного управления. Пользователь ожидает от сети не только высокой скорости доступа к данным, но и устойчивой работы сервисов, гарантированной доставки сообщений и защищенности передаваемой информации. При этом физические и регуляторные ограничения по полосе частот и мощности передатчиков не позволяют бесконечно наращивать пропускную способность, поэтому ключевым вопросом становится распределение имеющихся ресурсов между скоростью, надежностью и безопасностью.

Теоретически верхняя граница скорости задана выражением для пропускной способности канала с шумом и определяется полосой частот и отношением сигнал/шум. Однако реальная прикладная скорость оказывается ниже из-за целого набора факторов: помехоустойчивого кодирования, повторных передач, протокольных заголовков, криптографической обработки, сигнализации и служебного трафика. Усиление защиты и повышение требований к вероятности ошибки приводят к увеличению избыточности и задержек, а значит — к сокращению доли полезных данных, доставляемых приложению за единицу времени.

Особенно заметны эти эффекты в высокоскоростных беспроводных и спутниковых системах, где одновременно используются многоантенные схемы, сложные алгоритмы распределения ресурсов и многоуровневая криптографическая защита. В таких условиях простое стремление к максимальной скорости на физическом уровне без учета протокольного и вычислительного оверхеда может привести к ухудшению качества обслуживания и росту нагрузки на сеть [2].

Цель данной работы — проанализировать характерные компромиссы между скоростью, надежностью и безопасностью в современных системах связи и показать, как выбор механизмов кодирования, подтверждения доставки и криптографической защиты влияет на прикладную скорость. В дальнейшем рассматриваются показатели, с помощью которых оценивается скорость и качество передачи данных, влияние механизмов надежности на пропускную способность, влияние средств защиты на структуру трафика и задержки, а также подходы к оптимизации настроек для различных типов сетей и приложений.

2. Показатели скорости, надежности и безопасности

При обсуждении высокоскоростных систем связи удобнее сразу определить три группы характеристик. Скорость отвечает на вопрос, сколько информации в принципе можно передать через канал. Надежность — с каким числом ошибок это удастся сделать. Безопасность — насколько защищены данные от перехвата и подмены и сколько ресурсов на это уходит.

2.1. Скорость и пропускная способность

Теоретический максимум задается формулой Шеннона для канала с аддитивным шумом: [3]

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где C — пропускная способность, B — полоса частот, S/N — отношение сигнал/шум. Эта оценка показывает предел, к которому можно стремиться, но которого нельзя превзойти.

В реальных системах речь чаще идет о скорости на физическом уровне

$$C_{phys} = B \cdot R \cdot \log_2 M,$$

где M — размер созвездия модуляции, $R = k/n$ — кодовая скорость. Здесь уже учитываются модуляция и помехоустойчивое кодирование, но еще игнорируются заголовки протоколов и служебный трафик. Еще ниже лежит прикладная скорость (*goodput*) — объем полезных данных, который реально получает приложение за единицу времени. Она будет меньше C_{phys} , потому что часть ресурса уходит на заголовки, служебные сообщения и повторы [4].

2.2. Надежность передачи

Надежность обычно описывают через вероятность ошибки на бит (BER, P_b) и на кадр (FER, P_f). Для протоколов с подтверждением доставки важна также вероятность повторной передачи P_{retx} . Чем жестче требования по ошибкам, тем больше приходится платить либо мощностью, либо избыточностью кода, либо снижением порядка модуляции.

Если вероятность ошибок велика, часть кадров придется передавать повторно. Для грубой оценки можно записать:

$$C_{app} \approx C_{phys} \cdot (1 - P_{retx}),$$

понимая, что при росте количества повторов прикладная скорость падает, даже если параметры физического канала не меняются. Для разных типов

трафика допустимый уровень ошибок различается: потоковое видео «терпит» больше, чем управляющие команды или финансовые транзакции, и это напрямую отражается на выборе кодов и режимов ARQ/HARQ.

2.3. Безопасность канала

Безопасность добавляет к картине еще один слой. Шифрование и аутентификация требуют дополнительных бит (заголовки защитных протоколов, имитовставки, служебные сообщения) и вычислений на стороне передатчика и приемника. Удобно выделять долю трафика, связанную именно с защитой, в отдельный коэффициент α_{sec} . Тогда прикладную скорость можно записать, например, так: [5]

$$C_{app} \approx C_{phys} \cdot (1 - \alpha_{proto} - \alpha_{sec}),$$

где α_{proto} отвечает за общие протокольные накладные расходы, а α_{sec} — за все, что связано с криптографией и дополнительной сигнализацией.

Чем «тяжелее» выбранные механизмы защиты и чем слабее оборудование на концах канала, тем заметнее их вклад в задержку и падение эффективной скорости. Поэтому при проектировании высокоскоростных систем приходится учитывать не только физические характеристики канала, но и стоимость надежности и безопасности в битах и миллисекундах.

3. Механизмы надежности и их влияние на скорость

Механизмы надежности работают за счет введения избыточности и повторных передач. С точки зрения скорости это всегда обмен: часть ресурса уходит на защиту от ошибок, и этот кусок приходится забирать у полезных данных. Ниже рассмотрено, как это проявляется на уровне помехоустойчивого кодирования и протоколов ARQ/HARQ.

3.1. Помехоустойчивое кодирование

Для описания влияния кодирования удобно ввести кодовую скорость

$$R = \frac{k}{n},$$

где k — число информационных бит, n — длина кодового слова. При фиксированной полосе B и модуляции с M состояниями эффективная скорость на физическом уровне оценивается как

$$C_{phys} = B \cdot R \cdot \log_2 M.$$

Если взять условный канал, который при $R = 1$ мог бы передавать до 100 Мбит/с, то при $R = 0,5$ скорость упадет примерно до 50 Мбит/с,

при $R = 0,3$ — до 30 Мбит/с и т. д. При этом вероятность ошибки на бит и на кадр для «медленных» кодов на порядок ниже, чем для «быстрых» режимов с R , близким к единице [7].

На рис. 1 показан расчетный пример зависимости C_{phys} от кодовой скорости R : кривая линейно возрастает с увеличением R , но при этом предполагается, что BER и FER постепенно ухудшаются. График визуально подчеркивает простой факт: любое усиление кодирования (уменьшение R) напрямую сокращает доступную скорость, хотя и повышает устойчивость к шуму.

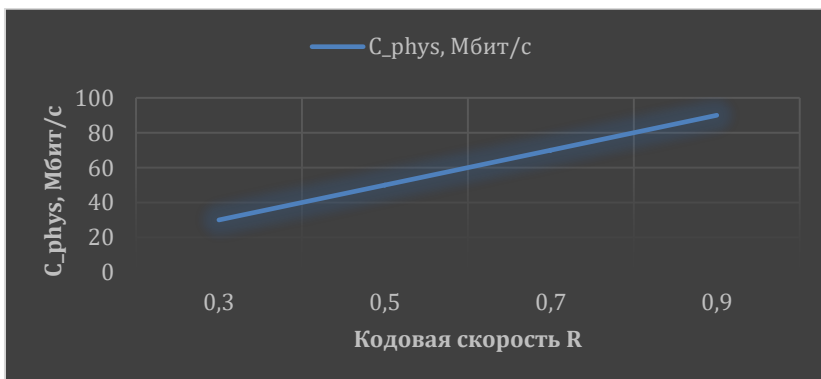


Рис. 1. Зависимость C_{phys} от кодовой скорости R .

Fig. 1. Dependence of C_{phys} on the code rate R

3.2. ARQ и HARQ

Второй механизм надежности — повторные передачи ошибочных кадров. Если приемник обнаруживает ошибку, он запрашивает новый экземпляр, и часть времени канал занят теми же данными. В простейшей модели прикладная скорость можно оценить как [8]

$$C_{app} \approx C_{phys} \cdot (1 - P_{retx}),$$

где P_{retx} — доля кадров, ушедших на повторную передачу.

Для наглядности можно рассмотреть канал с $C_{phys} \approx 70$ Мбит/с. При $P_{retx} = 0$ прикладная скорость совпадает с физической. Если повторно передается около 10 % кадров, эффективная скорость падает примерно до 63 Мбит/с, при $P_{retx} = 0,3$ — до ~49 Мбит/с. На рис. 2 показана зависимость C_{app} от P_{retx} : кривая почти линейно опускается вниз по мере роста доли повторов, хотя параметры самого физического канала не меняются.

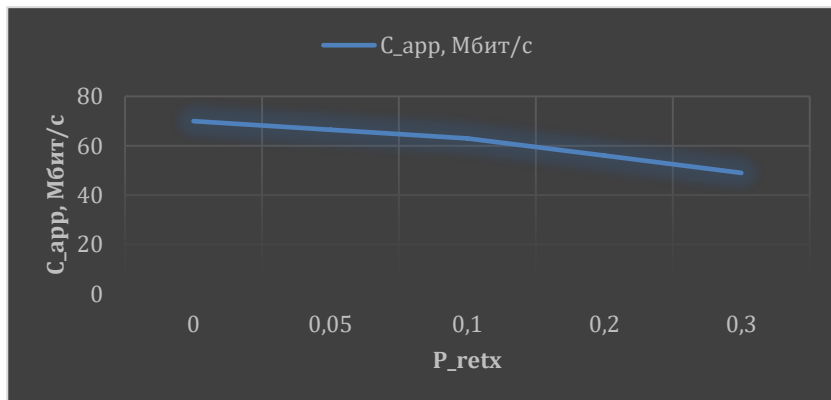


Рис. 2. Влияние повторных передач на прикладную скорость.

Fig. 2. Effect of retransmissions on the applied speed

В реальных стандартах (*LTE*, *5G*) используется гибридный вариант *HARQ*: повторно передаются не полные кадры, а дополнительные порции избыточности, которые складываются у приемника с уже принятыми данными. Это дает выигрыш по надежности и экономит ресурс по сравнению с «чистым» *ARQ*, но при плохом канале рост числа повторов все равно приводит к ощутимому падению прикладной скорости [9].

3.3. Баланс избыточности и скорости

Кодирование и повторные передачи влияют на одну и ту же величину — долю полезных бит в общем потоке. Слишком «тяжелый» код снижает C_{phys} , зато уменьшает *BER* и количество повторов. Слишком «легкий» код дает высокую скорость, пока канал хороший, но при ухудшении условий приводит к лавинообразному росту $P_{\text{re}tx}$ и падению C_{app} .

Отсюда появляется потребность в адаптивных схемах: в современных системах параметры кодирования и пороги срабатывания *ARQ/HARQ* подстраиваются под текущий *SNR* и тип трафика. Для потокового видео важнее минимизировать задержки и количество повторов; для управляющих команд или критически важных данных приоритетом становится минимальная вероятность ошибки, даже если приходится пожертвовать частью скорости. На графиках (рис. 1 и 2) это читается как выбор точки на кривой: либо сдвинуться в сторону более надежного, но медленного режима, либо — в сторону более быстрого, но чувствительного к ухудшению канала.

4. Механизмы безопасности и их протокольный оверхед

Механизмы безопасности добавляют к передаваемым данным шифрование, проверку целостности и аутентификацию. С точки зрения канала это означает появление дополнительных бит и вычислительных операций. На низких скоростях этот эффект почти незаметен, но в высокоскоростных системах, особенно с большой задержкой (спутниковые каналы, мобильные сети), оверхед безопасности начинает напрямую конкурировать со скоростью и задержкой.

4.1. Шифрование и аутентификация

Базовый набор задач безопасности включает конфиденциальность (шифрование), целостность и аутентичность (имитовставка, MAC, режимы AEAD). В простейшей оценке каждое зашифрованное сообщение можно представить в виде

$$L_{sec} = L_{data} + L_{hdr} + L_{tag},$$

где L_{data} — длина полезных данных, L_{hdr} — дополнительные заголовки защитного протокола (идентификаторы сессии, счетчики, служебные флаги), L_{tag} — длина имитовставки или тега аутентификации. Доля оверхеда безопасности по длине пакета тогда оценивается как

$$\alpha_{sec} = \frac{L_{hdr} + L_{tag}}{L_{sec}}.$$

Чем меньше типичный размер прикладного сообщения (короткие запросы, телеметрия, сигнальные пакеты), тем заметнее влияние этой доли: фиксированный по размеру тег аутентификации «съедает» большую часть полезного поля. На больших потоках данных шифрование обычно выполняется блочными или потоковыми алгоритмами, и ключевым становится уже не только оверхед по длине, сколько вычислительная нагрузка на терминал: при высоких скоростях именно криптография может стать узким местом, если нет аппаратного ускорения [11].

4.2. Защитные протоколы и дополнительные заголовки

На практике механизмы безопасности реализуются не только на уровне полезной нагрузки, но и в виде отдельных протоколов. На транспортном и прикладном уровнях это TLS и его производные, на сетевом — IPsec, на канальном — решения наподобие MACsec. Каждый из них добавляет собственный набор заголовков и служебных сообщений. Для оценки можно ввести суммарный коэффициент протокольных накладных расходов

$$\alpha_{proto+sec} = \frac{L_{IP+TCP/UDP} + L_{TLS/IPsec}}{L_{\text{полный пакет}}},$$

где в числителе учитываются заголовки базовых протоколов и защитных оболочек [12].

С точки зрения прикладной скорости это приводит к тому, что при фиксированной полосе и параметрах физического уровня прикладная скорость уменьшается по отношению к C_{phys} :

$$C_{app} \approx C_{phys} \cdot (1 - \alpha_{proto+sec}).$$

Если поверх этого работают еще схемы ARQ/HARQ, можно дополнительно учитывать долю повторных передач, как вводилось ранее.

Отдельно стоит влияние процедур установления защищенных соединений. Для TLS, IPsec и аналогичных протоколов требуется обмен рукопожатиями, согласование параметров и обмен ключами. В наземных сетях с малой задержкой это почти незаметный этап, но в спутниковых системах или при каскаде нескольких туннелей суммарное время установления сеанса может становиться сопоставимым со временем передачи полезных данных при коротких сессиях.

4.3. Практический эффект для высокоскоростных систем [13]

На типичном примере можно считать, что на физическом уровне система обеспечивает $C_{phys} \approx 100$ Мбит/с. Если суммарные заголовки базовых протоколов и защитных оболочек дают 15—20 % от длины пакета, а часть ресурса дополнительно уходит на повторы, прикладная скорость уже будет заметно ниже. При включении поверх мобильного или спутникового канала нескольких уровней защиты (например, IPsec-туннель и поверх него еще TLS) доля служебного трафика и количество рукопожатий увеличиваются, а обработка криптографии на терминальных устройствах добавляет задержку.

Чтобы избежать ситуации, когда безопасность «съедает» существенную часть выигрыша от высокоскоростного канала, в современных системах стараются использовать аппаратное ускорение криптографии, минимизировать число вложенных туннелей и выбирать такие протоколы, где на один защищенный сеанс приходится достаточно большой объем данных. В итоге реальный эффект от включения защиты определяется не только выбранными шифрами и длинами ключей, но и тем, как именно эти механизмы встроены в стек протоколов и как они сочетаются с особенностями конкретного канала связи.

5. Подходы к оптимизации компромисса «скорость — надежность — безопасность»

Настройка современных систем связи всегда упирается в конкретный сценарий использования. Для потокового видео, онлайн-игр или голосовой связи критична задержка и стабильность потока, единичные ошибки допустимы. Для телеметрии, банковских операций или систем управления важнее гарантированная доставка и контроль целостности, даже если придется пожертвовать частью скорости. Поэтому параметры кодирования, схемы *ARQ/HARQ* и уровень криптографической защиты подбирают не абстрактно, а под профиль трафика и требования конкретного сервиса.

С точки зрения надежности практическая стратегия обычно сводится к использованию адаптивных схем: система отслеживает состояние канала и динамически меняет *MCS*, коэффициент кодовой скорости и агрессивность повторных передач. При хорошем *SNR* используются более «быстрые» режимы с высокой спектральной эффективностью и минимальным числом повторов; при ухудшении условий система переходит к более устойчивым, но медленным вариантам, удерживая уровень ошибок в заданных пределах. В результате компромисс между C_{phys} и C_{app} меняется во времени, а не фиксируется один раз при проектировании [14, 15].

Для механизма безопасности разумным считается подход, при котором уровень защиты соответствует реальным рискам. Внутри доверенного контура сети нет смысла нагружать каждый поток несколькими слоями шифрования и «тяжелыми» протоколами, если достаточно одного хорошо настроенного *VPN* или защиты на канальном уровне [16]. В более чувствительных сценариях, наоборот, приоритет отдается целостности и конфиденциальности, а выигрыш по скорости рассматривается как вторичный. В обоих случаях помогает использование аппаратных средств ускорения криптографии и снижение количества вложенных туннелей, что уменьшает α_{sec} и задержки обработки.

В итоге выбор конкретных настроек оказывается задачей системного проектирования. Инженер работает не с одной формулой, а с целым набором ограничений: доступный спектр, допустимые *BER* и задержки, требуемый уровень защиты, возможности оборудования. Компромисс «скорость — надежность — безопасность» становится не разовым решением, а режимом работы системы, который поддерживается за счет адаптивных алгоритмов и постоянного контроля качества связи.

6. Заключение

В работе рассмотрены ключевые факторы, определяющие реальные скорости передачи данных в современных системах связи, и показано, как механизмы надежности и безопасности взаимодействуют с ограничениями физического канала. Формула Шеннона задает верхнюю планку по пропускной способности, но путь от этого предела до прикладной скорости C_{app} проходит через цепочку решений: выбор модуляции и кодирования, настройки ARQ/HARQ, протокольные заголовки, криптографическую защиту и архитектуру сети.

Помехоустойчивое кодирование и повторные передачи снижают вероятность ошибок, но уменьшают долю полезных бит в потоке. Защитные протоколы обеспечивают конфиденциальность и целостность данных, но добавляют к трафику собственные заголовки и требуют вычислительных ресурсов. При высоких скоростях и в каналах с заметной задержкой эти эффекты уже нельзя считать «незначительными»: неудачный выбор параметров способен свести на нет выигрыш от расширения полосы или внедрения новых технологий радиодоступа.

Практический вывод прост: задачи увеличения скорости, повышения надежности и усиления защиты не решаются по отдельности. Для наземных и спутниковых систем связи необходим совместный учет всех трех компонентов и использование адаптивных механизмов, которые позволяют подстраивать режим работы под текущие условия канала и требования трафика. Именно такой подход дает возможность приближаться к теоретическим пределам пропускной способности и одновременно сохранять приемлемый уровень качества обслуживания и кибербезопасности.

Список литературы

1. Шеннон К. Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М. : ИИЛ, 1963. 328 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. М. : Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 644 p.
4. Гошин Е. В. Теория информации и кодирования : учеб. пособие. Самара : Самарский университет, 2018. 123 с.
5. Hybrid automatic repeat request. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hybrid_automatic_repeat_request&oldid=1332769410. (April 11, 2026).
6. Makki B., Chitti K., Guerrero J., Svensson T. Performance Evaluation of HARQ Schemes for the Internet of Things // Computers. 2018. Vol. 7, no. 4. Art. 48.
7. Brkić S. S., Ivaniš P. N. Performance Evaluation of HARQ Technique with UMTS Turbo Code // Telfor Journal. 2011. Vol. 3, no. 2. P. 86–89.
8. Iyengar J., Thomson M. RFC 9000. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport / Internet Engineering Task Force, 2021.

9. Sheffer Y., Saint-Andre P., Tiwari N. RFC 9325. Recommendations for Secure Use of Transport Layer Security (TLS) and Datagram Transport Layer Security (DTLS) / Internet Engineering Task Force, 2022.
10. Cardwell N., Cheng Y., Gunn C. S. et al. BBR: Congestion-Based Congestion Control // ACM Queue. 2017. Vol. 60, no. 2. P. 58–66.
11. Coarfa C., Druschel P., Wallach D. S. Performance Analysis of TLS Web Servers // ACM Transactions on Computer Systems. 2006. Vol. 24, no. 1. P. 39–69.
12. VPN Scaling. pfSense Documentation. Netgate, 2024.
13. pfSense IPSec VPN Performance. Protectli Knowledge Base, 2020.
14. Мордвинова А. Ю. Анализ теоретических ограничений скорости передачи информации по беспроводному каналу связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 44—49.
15. Мордвинова А. Ю., Широков И. Б. Исследование влияния методов кодирования сигналов на скорость передачи данных в каналах связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 49—57.
16. Кибербезопасность спутниковых систем : вызовы и решения в эпоху космического трафика. SecurityMedia.org. 2024.

Информация об авторе

Мордвинова Анна Юрьевна, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Compromises Among Speed, Reliability, and Security in High Speed Communication Systems

A. Yu. Mordvinova

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
aumordvinova@sevsu.ru

Received: April 7, 2026
Peer-reviewed: April 15, 2026
Accepted: April 15, 2026

Abstract: *The development of modern communication networks is accompanied by simultaneous growth in requirements for data rate, reliability, and cybersecurity. However, measures aimed at improving robustness and protection inevitably introduce additional overhead and may reduce the effective data rate available to users. This paper examines the main types of trade-offs between speed, error probability, and cryptographic protection costs in high-speed communication systems. It analyzes throughput and goodput metrics, the impact of error-correcting codes, ARQ/HARQ mechanisms, and adaptive modulation on spectral efficiency. Special attention is given to protocol and computational overhead introduced by security mechanisms (TLS, IPsec, VPN), as well as their interaction with the specifics of terrestrial and satellite communication channels, including low-Earth-orbit constellations. Based on the comparison of different scenarios, the study shows that achieving the required level of reliability and security under spectrum constraints requires a balanced choice of parameters and architectural solutions, rather than a one-sided pursuit of maximum speed.*

Keywords: *data rate, reliability, error probability, high-speed communication systems, terrestrial and satellite communication channels, low-Earth-orbit constellations.*

For citation (IEEE): A. Yu. Mordvinova, “Compromises Among Speed, Reliability, and Security in High Speed Communication Systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 610–622, 2026, doi: 10.21227/x3tw-xe80. (In Russ.).

References

- [1] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
- [2] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, McGraw-Hill Education, 2007.
- [3] A. Goldsmith *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [4] E. V. Goshin, *Information Theory and Coding: A Tutorial*, Samara: Samara University, 2018. (In Russ.).
- [5] Hybrid Automatic Repeat Request. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hybrid_automatic_repeat_request&oldid=1332769410. (April 11, 2026).

- [6] B. Makki, et al., “Performance Evaluation of HARQ Schemes for the Internet of Things,” *Computers*, vol. 7, no. 4, art. 48, 2018.
- [7] S. S. Brkić and P. N. Ivaniš, “Performance Evaluation of HARQ Technique with UMTS Turbo Code,” *Telfor Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 86–89, 2011.
- [8] J. Iyengar and M. Thomson, RFC 9000. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport, Internet Engineering Task Force, 2021.
- [9] Y. Sheffer, P. Saint-Andre, and N. Tiwari, RFC 9325. Recommendations for Secure Use of Transport Layer Security (TLS) and Datagram Transport Layer Security (DTLS), Internet Engineering Task Force, 2022.
- [10] N. Cardwell, et al., “BBR: Congestion-Based Congestion Control,” *ACM Queue*, vol. 60, no. 2, pp. 58–66, 2017.
- [11] C. Coarfa, P. Druschel, and D. S. Wallach, “Performance Analysis of TLS Web Servers,” *ACM Transactions on Computer Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 39–69, 2006.
- [12] VPN Scaling. pfSense Documentation, Netgate, 2024.
- [13] pfSense IPSec VPN Performance, Protectli Knowledge Base, 2020.
- [14] A. Yu. Mordvinova, “Analysis of theoretical limitations of the information transfer rate over a wireless communication channel,” in: *Models of innovative solutions for improving the competitiveness of domestic science, articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference*, Sterlitamak, pp. 44–49, 2022. (In Russ.).
- [15] A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov, “Study of the influence of signal coding methods on the data transfer rate in communication channels,” in: *Models of innovative solutions for improving the competitiveness of domestic science. Articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference*, pp. 49–57, Sterlitamak, 2022.
- [16] Cybersecurity of Satellite Systems: Challenges and Solutions in the Era of Space Traffic. SecurityMedia.org, 2024. (In Russ.).

Information about the author

Ann Yu. Mordvinova, Senior Lecturer of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.391.25

Интеллектуальное управление радиоресурсами в 5G и низкоорбитальных спутниковых системах: влияние на скорость и качество обслуживания

Мордвинова А. Ю., Афонини И. Л., Широков И. Б.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация
aumordvinova@sevsu.ru, ilafonin@sevsu.ru, shirokov@sevsu.ru

Получено: 7 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 15 апреля 2026 г.

Аннотация: Сети пятого поколения (5G) и низкоорбитальные спутниковые системы связи (LEO) предъявляют повышенные требования к управлению радиоресурсами. Помимо пропускной способности, критичными становятся задержка, вариация задержки (jitter) и предсказуемость качества обслуживания для различных классов трафика. В статье рассматриваются основные механизмы интеллектуального управления радиоресурсами в 5G и LEO-сетях: динамическое распределение частотно-временных ресурсов, управление мощностью, формирование лучей в многоантенных системах и алгоритмы расписания. Анализируется влияние выбранных стратегий на скорость передачи данных и показатели качества обслуживания, а также роль методов машинного обучения в адаптивном управлении радиоресурсами.

Ключевые слова: сети пятого поколения, низкоорбитальные спутниковые системы связи, пропускная способность, вариация задержки, управление мощностью, скорость передачи данных.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Мордвинова А. Ю., Афонин И. Л., Широков И. Б. Интеллектуальное управление радиоресурсами в 5G и низкоорбитальных спутниковых системах : влияние на скорость и качество обслуживания // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 623—637.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Мордвинова, А. Ю. Интеллектуальное управление радиоресурсами в 5G и низкоорбитальных спутниковых системах : влияние на скорость и качество обслуживания / А. Ю. Мордвинова, И. Л. Афонин, И. Б. Широков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 623—637.

1. Введение

Современные сети 5G и низкоорбитальные спутниковые системы связи ориентированы не только на увеличение пропускной способности, но и на обеспечение малой задержки, низкого *jitter* и гарантированного качества обслуживания для широкого спектра приложений — от мультимедийных сервисов до промышленных систем реального времени. В этих условиях традиционные статические схемы распределения радиоресурсов оказываются недостаточно эффективными [1—5].

Высокая плотность базовых станций, использование *Massive MIMO* и формирование узконаправленных лучей в 5G, а также высокая подвижность спутников в *LEO*-сетях приводят к быстрой изменчивости радиосреды. Это требует применения интеллектуальных механизмов управления радиоресурсами, включающих адаптивное распределение частот и временных слотов, регулировку мощности и сложные алгоритмы расписания, учитывающие приоритеты трафика и требования к задержке [1—4].

Цель данной работы — систематизировать подходы к интеллектуальному управлению радиоресурсами в 5G и *LEO*-сетях и показать, как выбор стратегий планирования и управления влияет на скорость передачи данных и качество обслуживания пользователей. [6—10, 14].

2. Модель радиоресурса в сетях 5G и LEO

2.1. Базовые параметры радиоканала

Отправной точкой при управлении радиоресурсами является оценка пропускной способности канала. В простейшем виде используется формула Шеннона: [1, 2, 6]

$$C = B \log_2(1 + SINR),$$

где

C — пропускная способность, бит/с;

B — полоса частот, Гц;

$SINR$ — отношение сигнал/шум+помеха.

В многопользовательской системе для пользователя i :

$$SINR_i = \frac{P_i G_i}{N_0 B + \sum_{j \neq i} P_j G_{j \rightarrow i}},$$

где

P_i — мощность полезного сигнала;

G_i — коэффициент передачи по полезному каналу;

$P_j, G_{j \rightarrow i}$ — мощности и коэффициенты передачи помеховых сигналов;
 N_0 — спектральная плотность шума.

Управляя P_i , выбором полосы B и характеристиками канала $G_i, G_{j \rightarrow i}$ (формирование лучей, *MIMO*), система напрямую влияет на достижимую скорость и помехоустойчивость.

2.2. Радиоресурс в сетях 5G

В 5G радиоресурс дискретизируется по времени и частоте в виде ресурсных блоков (*Resource Block, RB*). Пусть по частоте шаг Δf , по времени — Δt . Планировщик выделяет пользователю k множество блоков R_k , тогда его скорость можно записать как [1—3, 6, 8]

$$C_k = \sum_{(f,t) \in R_k} \Delta f \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_k(f, t)).$$

При использовании *Massive MIMO* появляется пространственная размерность: пользователю может назначаться несколько независимых потоков $n = 1, \dots, N_{\text{stream}}$:

$$C_k = \sum_{(f,t) \in R_k} \sum_{n=1}^{N_{\text{stream}}} \Delta f \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_{k,n}(f, t)).$$

Таким образом, планировщик 5G управляет тройкой «частота–время–пространство» (выбор R_k и числа потоков), балансируя между максимальной суммарной пропускной способностью и требованиями по задержке и приоритетам сервисов.

2.3. Радиоресурс в LEO-системах и связь с качеством обслуживания

В низкоорбитальных спутниковых системах (LEO) радиоресурс также представляется в виде частотно-временных блоков и лучей, но накладывается ограничение по суммарной мощности спутника: [5, 14, 15]

$$\sum_{b=1}^{N_{\text{beam}}} \sum_{k \in U_b} P_{k,b} \leq P_{\text{sat}},$$

где

P_{sat} — доступная излучаемая мощность спутника;
 N_{beam} — число лучей;

U_b — множество пользователей в луче b ;

$P_{k,b}$ — мощность, выделенная пользователю k в луче b .

Быстрое изменение геометрии каналов (движение спутников и пользователей) приводит к тому, что распределение $\{P_{k,b}\}$ и набора блоков, выделяемых каждому пользователю, приходится часто пересчитывать.

Для пользователя k можно ввести долю ресурса

$$\alpha_k(t) = \frac{R_k(t)}{\sum_j R_j(t)},$$

где $R_k(t)$ — эффективный выделенный ресурс в момент времени t . Чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания, средняя скорость должна не менее чем компенсировать поступление данных, например, для потока пакетов с интенсивностью λ_k и средним размером L_{pkt} :

$$C_k \geq \lambda_k L_{pkt}.$$

При нарушении этого условия растут очереди, увеличиваются задержка и *jitter*.

На диаграмме распределения радиоресурса и показателей качества обслуживания в 5G и LEO-сетях (рис. 1) схематично показана взаимосвязь между выделяемыми пользователям частотно-временными и мощностными ресурсами, достигаемой скоростью и областью допустимых значений задержки и вариации задержки для различных классов трафика. [1—3, 6—8, 14].

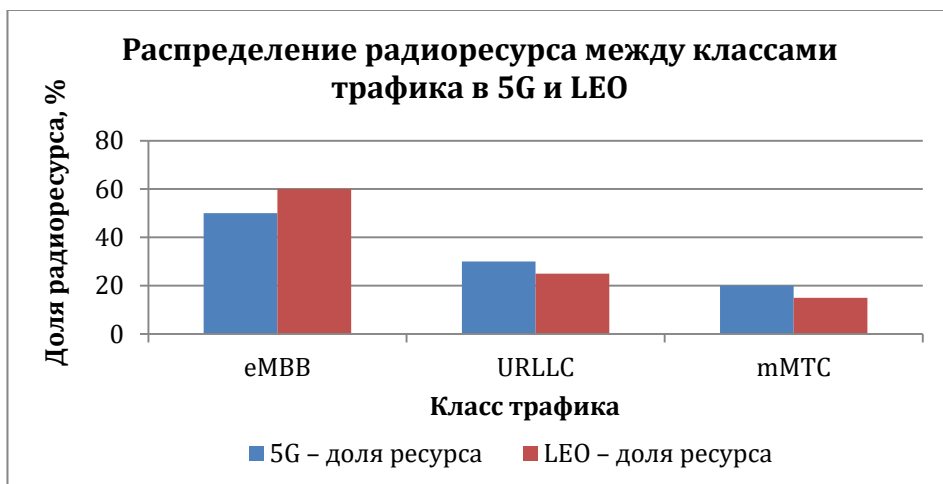


Рис. 1. Распределение радиоресурса между классами трафика в 5G и LEO-сетях.

Fig. 1. Distribution of radio resources between traffic classes in 5G and LEO networks

3. Интеллектуальное управление радиоресурсами

3.1. Критерии оптимизации и функции полезности

Интеллектуальное управление радиоресурсами обычно формулируется как задача оптимизации с несколькими целями: максимизация суммарной пропускной способности, обеспечение справедливости и выполнение требований по задержке. В простейшем виде можно использовать обобщенную функцию полезности: [6, 8—11]

$$\max_{\{R_k, P_k\}} U = \sum_k w_k u(C_k, D_k),$$

где

C_k — средняя скорость пользователя k ;

D_k — его средняя задержка;

w_k — вес (приоритет) пользователя/класса сервиса;

$u(\cdot)$ — функция полезности.

Часто применяют логарифмическую функцию полезности по скорости (пропорциональная справедливость):

$$u(C_k) = \log C_k,$$

что дает компромисс между максимизацией суммарного *throughput* и справедливым распределением ресурсов.

Для учета задержки возможна штрафная функция вида

$$u(C_k, D_k) = \log C_k - \beta_k \max(0, D_k - D_{\text{цел},k}),$$

где β_k — коэффициент чувствительности данного сервиса к превышению целевой задержки $D_{\text{цел},k}$.

3.2. Алгоритмы расписания (*scheduler's*)

В практических системах 5G и LEO широко используются эвристические алгоритмы расписания ресурсных блоков. Классические примеры: [6, 8—10]:

1. *Max C/I (Maximum Carrier-to-Interference)* — приоритет пользователям с лучшим качеством канала;
2. *Round Robin (RR)* — равномерное распределение ресурсов;
3. *Proportional Fair (PF)* — баланс между текущим качеством канала и прошлой средней скоростью.

PF-мера для пользователя k обычно задается как

$$M_k^{PF} = \frac{C_k^{\text{inst}}}{C_k^-},$$

где C_k^{inst} — мгновенная достижимая скорость (по текущему $SINR_k$), C_k^- — скользящее среднее. В каждом интервале ресурс выделяется пользователю с максимальным M_k^{PF} .

Для учета задержки вводят *delay-aware* метрики, например

$$M_k^{delay} = \frac{C_k^{inst}}{C_k^-} \cdot g(D_k),$$

где $g(D_k)$ — возрастающая функция от возрастающей задержки/длины очереди (например, линейная или экспоненциальная), что увеличивает приоритет «опаздывающих» пакетов.

Сравнение основных scheduler'ов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики базовых алгоритмов расписания.

Table 1. Characteristics of basic scheduling algorithms

Алгоритм	Цель	Плюсы	Минусы
<i>Max C/I</i>	Максимум суммарного C	Высокий общий <i>throughput</i>	Игнорирует справедливость и задержку
<i>Round Robin</i>	Равенство по времени	Простота, базовая справедливость	Не учитывает состояние канала, потери по C
<i>Proportional Fair</i>	Баланс C и справедливости	Хороший компромисс «производительность/честность»	Учет задержки только косвенный
<i>Delay-aware PF</i>	Баланс C и задержки	Снижает задержку для чувствительных сервисов	Более сложная настройка параметров

3.3. Адаптивное управление в 5G и LEO

В 5G интеллектуальные планировщики используют информацию о состоянии канала (CQI), задержках в очередях и классах обслуживания (QoS -профили), чтобы динамически изменять распределение ресурсных блоков и мощностей: [1—3, 6, 8—11]

1. для *URLLC*-потоков увеличивают веса w_k и коэффициенты β_k в функции полезности, усиливая влияние задержки;

2. для *eMBB*-пользователей основным критерием остается средняя скорость;

3. *mMTC/IoT*-трафик получает ограниченную, но стабильную долю ресурсов.

В *LEO*-системах добавляется необходимость прогнозировать изменение каналов из-за движения спутников. На практике это приводит к использованию предсказательных моделей $\hat{H}(t + \Delta t)$ и заранее рассчитанных стра-

тегий $\{R_k(t + \Delta t), P_k(t + \Delta t)\}$, чтобы минимизировать потери при handover'ах и сохранить требуемые задержки для чувствительных сервисов.

С математической точки зрения многие современные подходы можно рассматривать как решение повторяющейся задачи оптимизации

$$\max_{x(t)} U(x(t), s(t)),$$

где $x(t)$ — вектор решений (распределение блоков, мощностей, потоков), $s(t)$ — состояние системы (каналы, очереди, классы трафика), а оценка U обновляется на каждом шаге на основе наблюдений и/или прогнозов.

Такой подход позволяет связать выбор алгоритма расписания и параметров управления с целевыми показателями качества обслуживания (скорость, задержка, *jitter*), формально заданными в виде функций $C_k(t)$ и $D_k(t)$ для разных классов трафика в 5G и LEO-сетях.

4. Оценка влияния управления радиоресурсами на показатели качества обслуживания

4.1. Метрики качества обслуживания

Для количественной оценки влияния стратегий управления радиоресурсами используются несколько ключевых метрик: [6—8, 12, 13]

1. средняя скорость пользователя C_k^- ;
2. средняя задержка D_k^- ;
3. вариация задержки (*jitter*) J_k ;
4. вероятность нарушения требований по задержке.

Среднюю скорость для пользователя k на интервале наблюдения T можно записать как

$$C_k^- = \frac{1}{T} \int_0^T C_k(t) dt.$$

С точки зрения теории очередей (для потока пакетов с интенсивностью λ_k и средним размером L_{pkt}) нагрузка на систему описывается параметром

$$\rho_k = \frac{\lambda_k L_{pkt}}{C_k^-},$$

и при $\rho_k \rightarrow 1$ средняя задержка и *jitter* быстро растут.

В простейшей модели M/M/1 средняя задержка (ожидание + обслуживание) для пользователя k может быть оценена как

$$D_k^- \approx \frac{1}{\mu_k - \lambda_k},$$

где $\mu_k = C_k^- / L_{pkt}$ — эффективная интенсивность обслуживания.

Jitter можно охарактеризовать как стандартное отклонение задержки:

$$J_k = \sqrt{E[D_k^2] - (E[D_k])^2}.$$

Для сервисов реального времени добавляется ограничение вида

$$P\{D_k > D_{\max,k}\} \leq \varepsilon_k,$$

где $D_{\max,k}$ — максимально допустимая задержка, ε_k — допустимая вероятность ее превышения.

4.2. Связь стратегий управления с метриками QoS

Интеллектуальное управление радиоресурсами (выбор R_k , мощностей P_k , метрик расписания M_k) можно рассматривать как задачу обеспечения набора ограничений по QoS. Для каждого класса сервиса задаются целевые значения [6—10]:

$$\{C_k^- \geq C_{\text{цел},k}, D_k^- \leq D_{\text{цел},k}, J_k \leq J_{\text{цел},k}\}.$$

Scheduler и алгоритмы управления мощностью фактически определяют:

1. долю ресурса α_k (частотно-временную и мощностную),
2. среднюю интенсивность обслуживания μ_k ,
3. приоритет обработки пакетов в очереди,

что через выражения для C_k^- , D_k^- и J_k приводит к выполнению или нарушению этих ограничений.

Если принять, что в каждом интервале планирования T_{sched} пользователю k выдается ресурс R_k , то него средняя скорость может быть аппроксимирована как

$$C_k^- \approx \eta_k \cdot R_k,$$

где η_k — эффективная спектральная эффективность (бит/с на единицу ресурса), зависящая от качества канала и выбранной схемы модуляции/кодирования. Тогда доля ресурса $\alpha_k = R_k / R_{\text{общ}}$ непосредственно влияет на C_k^- далее — на D_k^- и J_k .

4.3. Пример параметризации для разных классов трафика

Для практической настройки алгоритмов управления радиоресурсами (как в 5G, так и в LEO-сетях) удобно задать для каждого класса трафика набор целевых параметров и весов в функции полезности U (см. раздел 3). Пример такой параметризации приведен в табл. 2. [6—8, 12, 13].

Таблица 2. Пример параметров QoS и весов для классов трафика в 5G и LEO.

Table 2. Example of QoS parameters and weights for traffic classes in 5G and LEO

Класс трафика	$C_{\text{цел}},$ Мбит/с	$D_{\text{цел}},$ мс	$J_{\text{цел}},$ мс	Вес по скорости w_k	Вес по задержке β_k
5G eMBB	50—200	≤ 50	≤ 10	высокий	средний
5G URLLC	5—20	$\leq 1—5$	≤ 1	средний	очень высокий
5G mMTC (IoT)	0,01—0,1	$\leq 100—$ 500	≤ 50	низкий	низкий
LEO Broadband	50—150	$\leq 40—60$	≤ 15	высокий	средний
LEO Mission-critical	5—20	$\leq 10—20$	≤ 5	средний	высокий
LEO IoT	0,01—0,5	$\leq 100—$ 300	≤ 50	низкий	низкий

Для выбранной функции полезности, например

$$U = \sum_k (w_k \log C_k - \beta_k \max(0, D_k^- - D_{\text{цел},k})),$$

стратегия управления радиоресурсами считается удовлетворяющей требованиям, если при оптимизации U выполняется большинство ограничений из табл. 2, то есть

$$C_k \approx C_{\text{цел},k}, D_k^- \lesssim D_{\text{цел},k}, J_k \lesssim J_{\text{цел},k}$$

для всех критичных классов трафика.

Такое представление позволяет явно связать настройки scheduler'a и алгоритмов управления мощностью в 5G и LEO-сетях с наблюдаемыми метриками качества обслуживания, а также формализовать влияние тех или иных стратегий на скорость, задержку и jitter для различных типов сервисов.

5. Применение методов машинного обучения в управлении радиоресурсами

5.1. Формализация задачи управления

Интеллектуальное управление радиоресурсами естественным образом формулируется как задача принятия решений в динамической среде. В общем виде можно рассматривать дискретные шаги времени $t = 0, 1, 2, \dots$, на каждом из которых система находится в состоянии $s(t)$ (качество каналов, длины очередей, классы трафика, положение пользователей/спутников), выбирается действие $a(t)$ (распределение ресурсных блоков, мощностей, число потоков), после чего наблюдается вознаграждение $r(t)$, связанное с качеством обслуживания: [9—11]

$$r(t) = f(\{C_k^-(t)\}, \{D_k^-(t)\}, \{J_k(t)\}).$$

Целью алгоритма является максимизация суммарного дисконтированного вознаграждения

$$\max_{\pi} E[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(t)],$$

где π — стратегия (*policy*), задающая выбор действий $a(t)$ по состоянию $s(t)$, $\gamma \in (0,1)$ — коэффициент дисконтирования. Такая постановка соответствует подходу обучения с подкреплением (*reinforcement learning, RL*), в рамках которого планировщик обучается принимать решения, оптимизирующие компромисс между скоростью, задержкой и *jitter*.

5.2. Модели и источники данных

В практических системах 5G и LEO могут использоваться различные типы моделей машинного обучения [9—11]:

1. супервизируемые модели (регрессия, градиентный бустинг, нейронные сети) для предсказания параметров канала $\widehat{SINR}_k(t + \Delta t)$, загрузки ячеек, вероятности *handover*'а;

2. обучение с подкреплением для выбора действий $a(t)$ по распределению ресурса;

3. гибридные схемы, где ML-модели формируют прогнозы, а само решение принимается классическим оптимизатором.

Источниками данных для таких моделей выступают:

1. отчеты о качестве канала (*CQI, CSI*);
2. статистика очередей и задержек $D_k(t), J_k(t)$;
3. информация о траекториях спутников и пользователей;
4. результаты предыдущих решений по распределению ресурса и их влияние на метрики QoS.

Обученные модели позволяют формировать более «осмысленные» решения по $R_k(t), P_k(t)$ и приоритетам классов трафика, чем статические эвристики, особенно в условиях сложной динамики LEO и неоднородного трафика в 5G.

5.3. Ограничения и практические аспекты

Несмотря на потенциал методов машинного обучения, их использование в управлении радиоресурсами связано с рядом ограничений: [9—11]:

1. ограничения по задержке принятия решения: время вычисления $a(t)$ должно быть существенно меньше интервала планирования T_{sched} , иначе ML-алгоритм сам станет источником дополнительной задержки;

2. надежность и устойчивость: ошибки моделей или некорректное поведение при выходе за область обучающих данных могут приводить к нарушению QoS и перегрузке сети;

3. интерпретируемость: для критичных сервисов важно понимать причины выбора тех или иных стратегий, что не всегда возможно при использовании «черных ящиков».

Поэтому на практике чаще применяются гибридные схемы, в которых *ML*-модели используются для прогнозирования параметров среды или подсказки при выборе режимов, а ключевые ограничения по задержке и надежности задаются явными инженерными правилами и предсказуемыми алгоритмами расписания.

В таком виде методы машинного обучения становятся дополнительным уровнем адаптации поверх классических механизмов управления радиоресурсами, позволяя учитывать более сложные зависимости и долгосрочные эффекты, не нарушая жестких требований к задержке и устойчивости работы системы.

6. Заключение

В работе рассмотрены особенности интеллектуального управления радиоресурсами в сетях 5G и низкоорбитальных спутниковых системах (LEO) с точки зрения влияния на скорость передачи данных и качество обслуживания. Показано, что радиоресурс в обеих технологиях удобно описывать через частотно-временные блоки и мощностные ограничения, а в 5G дополнительно — через пространственную размерность, связанную с применением *Massive MIMO* и формированием лучей [1—8, 14, 16].

На основе моделей пропускной способности и простых очередных оценок продемонстрирована связь между распределением ресурса (долями α_k , наборами R_k , мощностями P_k) и ключевыми метриками QoS: средней скоростью, задержкой и *jitter*. Показано, что выбор алгоритмов расписания (*Max C/I*, *Round Robin*, *Proportional Fair*, *delay-aware* модификации) и параметров их настройки позволяет целенаправленно смещать баланс между максимальной суммарной пропускной способностью, справедливостью и задержкой для различных классов трафика [15].

Отдельно рассмотрена роль методов машинного обучения, которые позволяют формализовать управление радиоресурсами как задачу последовательной оптимизации с учетом динамики среды. Использование прогнозов каналов и нагрузок, а также обучение с подкреплением, расширяет возможности адаптации в условиях высокой изменчивости 5G- и LEO-сетей, но требует строгого учета ограничений по задержке принятия решений, надежности и интерпретируемости.

В совокупности проведенный анализ показывает, что достижение заявленных характеристик 5G и LEO по скорости и качеству обслуживания возможно только при комплексном подходе к управлению радиоресурсами, сочетающим строгие инженерные модели, эффективные алгоритмы расписания и аккуратно интегрированные методы машинного обучения.

Список литературы

1. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. 5G NR : The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd ed. Elsevier, 2020. 608 p.
2. Ahmadi S. 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards. Academic Press, 2019. 960 p.
3. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2. 3rd Generation Partnership Project, Release 17, 2023.
4. Fettweis G., Luo J. (eds.). 5G System Design: Architectural and Functional Considerations and Long Term Research. Wiley, 2018. 608 p.
5. Vanelli-Coralli A., Chuberre N., Masini G. et al. 5G Non-Terrestrial Networks : Technologies, Standards, and System Design. Wiley, 2023. 336 p.
6. Akhtar T., Tselios C., Politis I. Radio resource management : approaches and implementations from 4G to 5G and beyond // Wireless Networks. 2021. Vol. 27. P. 693–734.
7. Mavragani A., Tseliou G., Karvounas G. et al. Electromagnetic Field-Aware Radio Resource Management for 5G and Beyond : A Survey // Computers. 2025. Vol. 14, no. 2. Art. 51.
8. Cavdar C., Pateromichelakis E., Wang L. et al. Optimal radio resource management in 5G NR featuring network slicing // Computer Networks. 2023. Vol. 229. Art. 109819.
9. Bartsiakos G., Gkonis P., Tsiropoulou E. E., Papavassiliou S. ML-Based Radio Resource Management in 5G and Beyond Networks : A Survey // IEEE Access. 2022. Preprint.
10. Bachtzis P., Katsinis G., Kartsakli E. et al. Applications of Machine Learning in Resource Management for RAN-Slicing in 5G and Beyond Networks : A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Preprint.
11. Ouaisa M., Ouaisa M., Lamaazi H. et al. (eds.). Machine Learning for Radio Resource Management and Optimization in 5G and Beyond. CRC Press, 2024. 234 p.
12. Östman J. et al. URLLC with massive MIMO : Analysis and design at finite blocklength // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. Vol. 20, no. 10. P. 6387–6401.
13. Yan H., Ashikhmin A. Can Massive MIMO Support URLLC? 2021. arXiv:2102.09156.
14. Мордвинова А. Ю. Анализ теоретических ограничений скорости передачи информации по беспроводному каналу связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 44—49.
15. Мордвинова А. Ю., Широков И. Б. Исследование влияния методов кодирования сигналов на скорость передачи данных в каналах связи. В сб. : Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности отечественной науки. Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 49—57.
16. Giuliani G., Manfredi S., Scholz D. et al. Reliable Low-Delay Routing in Space with Routing-Oblivious LEO Satellites. 2024. arXiv:2401.11490.

Информация об авторах

Мордвинова Анна Юрьевна, старший преподаватель Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Афонин Игорь Леонидович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Радио-электроника и телекоммуникации» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Intelligent Radio Resource Management in 5G and Low Earth Orbit Satellite Systems: Impact on Data Rate and Service Quality

A. Yu. Mordvinova, I. L. Afonin, and I. B. Shirokov

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
aumordvinova@sevsu.ru, ilafonin@sevsu.ru, shirokov@sevsu.ru

Received: April 7, 2026
Peer-reviewed: April 15, 2026
Accepted: April 15, 2026

Abstract: Fifth-generation (5G) networks and low-Earth-orbit (LEO) satellite communication systems impose stringent requirements on radio resource management. Beyond throughput, latency, jitter, and the predictability of quality of service for various traffic classes become critical. This paper examines key mechanisms of intelligent radio resource management in 5G and LEO networks: dynamic allocation of frequency-time resources, power control, beamforming in multi-antenna systems, and scheduling algorithms. The influence of selected strategies on data rates and quality-of-service metrics is analyzed, along with the role of machine-learning methods in adaptive radio resource control.

Keywords: fifth-generation networks, low-Earth-orbit satellite communication systems, throughput, latency, jitter, power control, data transmission rate.

For citation (IEEE): A. Yu. Mordvinova, I. L. Afonin, and I. B. Shirokov, “Intelligent Radio Resource Management in 5G and Low Earth Orbit Satellite Systems: Impact on Data Rate and Service Quality,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 623–637, 2026, doi: 10.21227/x8bb-8h61. (In Russ.).

References

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 2nd ed., Elsevier, 2020.
- [2] S. Ahmadi, *5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*, Academic Press, 2019.
- [3] 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2, 3rd Generation Partnership Project, Release 17, 2023.
- [4] G. Fettweis and J. Luo, (eds.), *5G System Design: Architectural and Functional Considerations and Long Term Research*, Wiley, 2018.
- [5] A. Vanelli-Coralli, et al., *5G Non-Terrestrial Networks: Technologies, Standards, and System Design*, Wiley, 2023.
- [6] T. Akhtar, C. Tselios, and I. Politis, “Radio resource management: approaches and implementations from 4G to 5G and beyond,” *Wireless Networks*, vol. 27, pp. 693–734, 2021.

- [7] A. Mavragani, et al., “Electromagnetic Field-Aware Radio Resource Management for 5G and Beyond: A Survey,” *Computers*, vol. 14, no. 2, art. 51, 2025.
- [8] C. Cavdar, et al., “Optimal radio resource management in 5G NR featuring network slicing,” *Computer Networks*, vol. 229, art. 109819, 2023.
- [9] G. Bartsiokas, P. Gkonis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, “ML-Based Radio Resource Management in 5G and Beyond Networks: A Survey,” *IEEE Access*, preprint, 2022.
- [10] P. Bachtzis, et al., “Applications of Machine Learning in Resource Management for RAN-Slicing in 5G and Beyond Networks: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, preprint, 2022.
- [11] M. Ouaissa, et al., (eds.), *Machine Learning for Radio Resource Management and Optimization in 5G and Beyond*, CRC Press, 2024.
- [12] J. Östman, et al., “URLLC with massive MIMO: Analysis and design at finite blocklength,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 10, pp. 6387–6401, 2021.
- [13] H. Yan and A. Ashikhmin, Can Massive MIMO Support URLLC? arXiv:2102.09156, 2021.
- [14] A. Yu. Mordvinova, “Analysis of theoretical limitations of the information transfer rate over a wireless communication channel,” in: *Models of innovative solutions for improving the competitiveness of domestic science, articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference*, Sterlitamak, pp. 44–49, 2022. (In Russ.).
- [15] A. Yu. Mordvinova and I. B. Shirokov, “Study of the influence of signal coding methods on the data transfer rate in communication channels,” in: *Models of innovative solutions for improving the competitiveness of domestic science. Articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference*, pp. 49–57, Sterlitamak, 2022.
- [16] G. Giuliani, et al., Reliable Low-Delay Routing in Space with Routing-Oblivious LEO Satellites. arXiv:2401.11490. 2024. (In Russ.).

Information about the authors

Ann Yu. Mordvinova, Senior Lecturer of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Igor L. Afonin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Математическая модель формирования радиотеплового портрета надводных и воздушных объектов и ее компьютерная реализация

¹ Согомонян С. В., ² Широков И. Б., ² Громов А. С.

¹ Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова
ул. Дыбенко, д. 1а, Севастополь, 299028, г. Российская Федерация

² Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация
sogomonyan@mail.ru, shirokov@ieee.org, G-r-o-m-o-V.AleX@yandex.ru

Получено: 2 апреля 2026 г.

Отрецензировано: 9 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 9 апреля 2026 г.

Аннотация: Ужесточение требований к точности и надежности систем поиска, обнаружения, наведения и навигации обуславливает комплексное использование в таких системах информационных каналов различной физической природы. Развитие микроволновой радиометрии позволяет в качестве одного из таковых использовать пассивный радиотепловой канал миллиметрового диапазона. При разработке такого канала для оценки возможности и вероятности обнаружения и наведения на различные надводные и воздушные объекты, получения необходимых параметров радиотеплового канала и обеспечения наибольшей вероятности обнаружения объекта на различных фонах необходимы экспериментальные исследования для конкретных образцов обнаруживаемых объектов с варьированием фона, гидрометеоусловий, углового положения и дальности относительно наблюдателя. Натурные эксперименты такого рода крайне ресурсоемки. Целью работы является разработка математического и программного обеспечения, позволяющего заменить натурные эксперименты численными и рассчитывать радиотепловые портреты объектов с учетом их положения и фона, а также радиояркостный контраст объекта. Получены выражения для радиояркостных температур радиотеплового излучения атмосферы и морской поверхности вдоль трасс визирования цели в различных диапазонах углов, составляющие основу математической модели радиотеплового поля и формирования радиотеплового портрета объекта наблюдения. Разработанная с ее помощью компьютерная модель позволяет рассчитывать значение радиотеплового поля надводных и воздушных объектов в любой точке пространства, строить ра-

диотепловые портреты объектов на разных фонах, при различной угловой ориентации и дальности, с учетом излучательной способности материалов отдельных элементов их корпуса, с использованием 3D-модели объектов в формате OBJ. Разработанные модели полезны для разработчиков комплексных систем поиска, обнаружения, наведения и навигации в части определения необходимых параметров радиотеплового канала для различных целей на разных фонах.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, радиотепловой канал, радиотепловое поле, радиотепловой портрет, математическая модель, компьютерная модель, 3D-модель, формат OBJ, радиояркостный контраст.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Согомонян С. В., Широков И. Б., Громов А. С. Математическая модель формирования радиотеплового портрета надводных и воздушных объектов и ее компьютерная реализация // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 4. С. 638—658.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Согомонян, С. В. Математическая модель формирования радиотеплового портрета надводных и воздушных объектов и ее компьютерная реализация / С. В. Согомонян, И. Б. Широков, А. С. Громов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 638—658.

1. Введение

В системах поиска, обнаружения, наведения и навигации (СПОНН) используются информационные каналы различной физической природы. При этом используются радиолокационный, оптический, инфракрасный, лазерный, акустический, тепловизионный и другие методы. Каждый из них имеет свои индивидуальные достоинства, недостатки и ограничения на условия применения. Все большее применение в таких системах находит микроволновая радиометрия, подразумевающая использование пассивного радиотеплового канала миллиметрового диапазона. В ряде случаев (осадки, туман, низкая освещенность, сложная электромагнитная обстановка и т. д.) он значительно менее критичен к неблагоприятным факторам окружающей среды.

Микроволновое зондирование с помощью радиометрических систем широко применяется [1] как в гражданской сфере (измерение параметров атмосферы и подстилающих поверхностей, системы космического мониторинга земной и водной поверхности, выделение вегетативных зон и поиск полезных ископаемых, ледовая разведка, картографирование и мониторинг загрязнения вод и т. д.), так и в военной (системы навигации, обнаружения и наведения).

2. Постановка задачи

Для оценки возможности и условий обнаружения и наведения СПОНН на различные надводные и воздушные объекты, получения необходимых параметров радиотеплового канала и обеспечения наибольшей вероятности обнаружения объекта на различных фонах необходимы экспериментальные исследования для конкретных образцов надводных и воздушных объектов с варьированием фона, гидрометеоусловий, углового положения и дальности относительно наблюдателя. Натурные эксперименты такого рода крайне ресурсоемки во всех отношениях. Естественно желание заменить натурные эксперименты адекватными численными экспериментами, для чего необходима разработка математической модели радиотеплового поля объектов наблюдения, учитывающая все влияющие факторы, и соответствующего программного обеспечения. Задача этих разработок — исходя из 3D-модели объекта обеспечить расчет значений его радиотеплового поля в любой точке пространства, с учетом материалов поверхностей, образующих корпус объекта и навесное оборудование, что, в конечном итоге, позволит рассчитать и сформировать радиотепловой портрет объекта как срез его радиотеплового поля картинной плоскостью, с возможностью варьирования дальности, угловой ориентации и фона (атмосфера, морская поверхность, береговая черта, ледовые образования и т. д.).

3. Физические основы микроволновой радиометрии

В основе микроволновой радиометрии лежит свойство любых материальных тел, имеющих температуру выше нуля по шкале Кельвина, излучать слабые электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Это излучение вызвано преобразованием внутренней тепловой энергии в энергию электромагнитного поля, выполняемого множеством элементарных осцилляторов (электроны, ионы, поляризованные атомы и молекулы). Распределение мощности такого излучения по частотам для миллиметрового и сантиметрового диапазона определяется по формуле Релея, исходя из термодинамической температуры тела. Интенсивность радиотеплового излучения реальных объектов (не абсолютно черных тел) определяется не только температурой, но и их способностью к поглощению. Вариации поглощательной способности различных объектов позволяют производить их наблюдение.

Яркость излучения B_f ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$) абсолютно черного тела (АЧТ), полностью поглощающего падающую на него энергию электромагнитного излучения и переводящего ее в тепловую, описывается законом Планка, упрощающимся для сантиметрового и миллиметрового диапазонов ($f < 10^{12}$ Гц) до формулы Релея — Джинса [2, 3], определяющей B_f как отно-

шение удвоенного произведения постоянной Больцмана k и термодинамической температуры $T_{ТД}$ к квадрату длины волны λ . То есть яркость излучения АЧТ определяется исключительно его температурой.

В реальных телах, не являющихся АЧТ, электромагнитное излучение, порожденное внутренней тепловой энергией, частично отражается поверхностью. Яркость таких тел $B_{\text{я}}$ суть произведение яркости излучения B_f на коэффициент поглощения тела χ . Для реальных тел вместо действительной термодинамической температуры $T_{ТД}$ используется яркостная температура $T_{\text{я}} = T_{ТД} \cdot \chi$. Коэффициент поглощения χ — излучательная способность — связан с коэффициентом отражения ρ : $\chi = 1 - \rho$. Тогда с учетом вышеупомянутых формул яркостная температура $T_{\text{я}} = \chi T_{ТД} = \chi B_f \lambda^2 / 2k$.

Металлические тела обладают высокой отражательной способностью и слабым радиотепловым излучением. В неметаллических телах электромагнитное излучение частично отражается внутрь на границе с внешней средой, а частично излучается вовне.

Излучательная способность объектов во внешнюю среду определяется по формуле Френеля [3] исходя из комплексной диэлектрической постоянной среды ϵ и угла падения θ . Расчеты проводятся для горизонтальной и вертикальной поляризации. Для гладких поверхностей [4] излучательная способность в зависимости от направления наблюдения определяется законом Ламберта $\chi = \chi_0 \cos \theta$, где χ_0 — излучательная способность в направлении нормали. В случае неровной поверхности объекта часть излучения рассеивается на границе раздела. Тогда излучательная способность [2] рассчитывается с учетом коэффициента рассеяния среды в направлении, перпендикулярном поверхности γ_0 : $\chi = 1 - 0,25\gamma_0(1 + 0,5\sec \theta)$. Отнесение поверхности к гладкой или шероховатой определяется критерием Релея, согласно которому изображения двух близлежащих точек можно видеть отдельно, если расстояние между центрами дифракционных пятен каждого изображения не меньше радиуса первого темного дифракционного пятна. В нашем случае для гладкой поверхности высота неровностей h_{max} должна [4, 5] удовлетворять условию $h_{\text{max}} \leq \lambda / (16 \cos \theta)$, где λ — длина волны радиотеплового излучения (3 или 8 мм — т. н. окна прозрачности).

4. Основные аспекты построения математической модели радиотеплового поля

Фактическая интенсивность радиотеплового поля объекта в некоторой точке пространства определяется суммой его собственного излучения

и отражением подсвечивающих излучений, падающих на тело из окружающего пространства [1, 4]. Естественные источники такой подсветки — Солнце, Луна, атмосфера, космический фон и т. д., основным является реликтовое излучение Вселенной с температурой около 3 К. Характеристикой интенсивности такого суммарного радиотеплового излучения объекта является кажущаяся, или эффективная радиояркостная температура. При наблюдении объекта на малых высотах (высота объекта $h < 1000$ м) влиянием собственного излучения атмосферы можно пренебречь, считая функцию (множитель) ослабления атмосферой близкой к 1. Тогда кажущаяся (эффективная) радиояркостная температура $T_{\text{эф}}$ определяется температурой объекта T_O и температурой подсвечивающих излучений T_{Π} с учетом излучательной способности χ : $T_{\text{эф}} = T_O + (1 - \chi)T_{\Pi}$.

Для обнаружения объекта радиотеплолокатором необходимо наличие радиояркостного контраста между объектом и фоном как разности их радиояркостных температур.

При обнаружении различных объектов (БПЛА, БЭК, корабли, суда, ракеты и т. д.) естественными фонами являются морская поверхность, береговая черта, пригоризонтный и верхний слой атмосферы. В Арктике к этим фонам добавляются ледовые поля, снежный покров, ледяные торосы, айсберги.

Сами же объекты обнаружения могут иметь корпуса, образованные преимущественно металлическими поверхностями (суда, корабли, ракеты, самолеты, нефтяные и газовые морские платформы, отдельные образцы БПЛА и БЭК), либо неметаллическими — полимерами, композитными материалами и т. д. (большинство образцов БЭК, БПЛА, катеров).

У металлических поверхностей собственное радиотепловое излучение пренебрежимо мало. Их радиотепловое поле образуется отражением излучений окружающего пространства, основным источником которых является атмосфера. Излучение атмосферы анизотропно по углу места (углу визирования). При больших, близких к зенитным, углах визирования подсвечивающее радиотепловое излучение минимально (наиболее тонкий слой излучающей атмосферы меньше поглощает реликтовое излучение), при малых (близких к горизонтальным) углах — максимально (наибольшая толщина слоя атмосферы больше поглощает реликтовое радиотепловое излучение).

Радиояркостная температура фона (морская поверхность, береговая черта, пригоризонтный слой атмосферы, ледовые образования) при малых углах визирования достаточно велика и близка к их термодинамической температуре. При больших углах (верхний слой атмосферы) достаточно

мала и определяется зависимостью радиояркостной температуры от угла визирования (будет получена ниже). Вследствие этого при малых углах визирования металлический объект выглядит более холодным, чем фон, а на больших углах — почти сливается с фоном.

Для неметаллических объектов отражение электромагнитных волн не так однозначно. Чистые, непроводящие полимеры (такие, как полиэтилен, полипропилен, ПВХ, поликарбонат) по своей природе прозрачны или полупрозрачны для электромагнитных волн в широком диапазоне частот, особенно для радиоволн и микроволн, т. к. у них нет свободных носителей заряда. Электромагнитная волна, падая на такой материал, не находит зарядов, которые она могла бы привести в согласованное движение (ток), чтобы переизлучить энергию. Большая часть волны проходит сквозь материал, а небольшая часть поглощается за счет слабых потерь на диэлектрическую поляризацию. Однако композитные материалы, полученные путем введения в полимеры проводящих (металлы, углеродные материалы) или магнитных наполнителей, по-разному взаимодействуют с электромагнитным излучением: от почти полного отражения до эффективного поглощения. Для получения полной картины отражательной способности конкретного образца объекта необходимо знание коэффициентов отражения поверхностей, составляющих корпус объекта.

Принцип извлечения информации о цели в радиотеплолокационных системах требует описания взаимосвязи ее радиотепловых контрастов с учетом рефракции в атмосфере, а также определения вклада различных физических факторов в формирование радиотеплового поля объекта. В связи с этим при разработке модели формирования радиотеплового поля цели принят подход, позволяющий в аналитической форме определить зависимость радиояркостной температуры от угла визирования — угломестный профиль радиояркостной температуры системы «атмосфера — водная поверхность», и оценить влияние направленных свойств антенны радиометра на величину радиотеплового контраста, создаваемого целью на фоне пригоризонтного и верхнего слоя атмосферы, береговой черты, морской поверхности.

Криволинейное распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в атмосфере связано с изменением показателя преломления с высотой и от места к месту. В предположении о линейности вертикального распределения показателя преломления получено аналитическое выражение для траектории распространения ЭМВ в сферически-слоистой, неоднородной атмосфере. Такое предположение позволяет применить в модели радиотеплового излучения системы «морская поверхность — атмосфера» концепцию эквивалентного радиуса Земли: криволинейному распростране-

нию ЭМВ в неоднородной атмосфере Земли радиусом $a=6370$ км ставится в соответствие прямолинейное распространение в однородной атмосфере Земли эквивалентным радиусом $a_3 = K \cdot a$, где $K = 1 / (1 + a(dn/dh))$ — коэффициент рефракции; dn/dh — производная зависимости показателя преломления от высоты.

В этих допущениях закон изменения угла наклона траектории распространения ЭМВ к плоскости горизонта $\psi(h)$ в неоднородной атмосфере

$$\sin(\psi(h)) \approx \sqrt{\sin^2(\psi_0) + 2(h - h_0) / a_3},$$

где $\psi(h)$ — угол наклона траектории к горизонту на высоте h ; ψ_0 — угол наклона оси антенны к горизонту; h_0 — высота, на которой находится приемная система радиометра.

В общем случае радиояркая температура радиотеплового излучения вдоль трассы визирования, расположенной под углом ψ_0 к горизонту места

$$T_{\text{я}}(\psi_0) = \int_{h_0}^{\infty} \frac{T(h) \cdot \gamma(h)}{\sin \psi(h)} \cdot \exp \left[- \int_{h_0}^h \frac{\gamma(h')}{\sin \psi(h')} dh' \right] dh,$$

где $T(h)$, $\gamma(h)$ и $\psi(h)$ — вертикальные профили соответственно температуры, коэффициента поглощения и угла наклона трассы на высоте h ; $\gamma(h) = \gamma_1(0) \cdot \exp(h / H_1) + \gamma_2(0) \cdot \exp(h / H_2)$ — зависимость коэффициента поглощения от высоты (индекс 1 относится к кислороду, индекс 2 — к водяному пару); $\gamma_i(0)$ — коэффициент поглощения на уровне моря; H_i — эффективные толщины атмосферы для кислорода и водяного пара ($H_1 = 5,3$ км, $H_2 = 2,1$ км). Такая температура существенно зависит от соотношения угла ψ_0 к горизонту и критического угла $\psi_{\text{кр}} = -\sqrt{2h_0 / a_3}$,

определяющего направление на горизонт с высоты расположения антенны радиометра h_0 . Получены выражения для радиоярких температур радиотеплового излучения атмосферы и морской поверхности вдоль трасс визирования цели в различных диапазонах углов. Выделены три диапазона для трасс визирования (трасс распространения излучения), начало которых расположено на высоте h_0 , конец в ∞ , угол наклона в начале трассы ψ_0 .

Диапазон 1. Трасса расположена под углом $\psi_0 > 0$ к горизонту в месте расположения антенны радиометра в точке A на высоте h_0 . Конец трассы в точке H .

Диапазон 2. Трасса расположена под углом $\psi_{кр} < \psi_0 < 0$. Критический угол $\psi_{кр}$ определяет направление на горизонт с высоты расположения антенны радиометра $h_0 = h_a$.

Диапазон 3. Трасса расположена под углом $-\pi/2 < \psi_0 < \psi_{кр}$. При этих углах визирования антенна радиометра воспринимает три энергетических потока: поток излучения от слоя атмосферы на участке трассы AQ ; поток собственного радиотеплового излучения моря, ослабленный атмосферой на участке трассы AQ ; поток излучения атмосферы на участке QH (атмосферный подсвет), отраженный от морской поверхности в точке Q и ослабленный атмосферой на трассе AQ (Q — точка пересечения линии визирования с земной поверхностью — окружностью радиусом a_3).

Для первого диапазона получено выражение для радиояркостной температуры противоизлучения в диапазоне углов $\psi_0 > 0$

$$T_{я}(\psi_0) = T_0 \cdot \int_{h_0}^{\infty} \exp(-\tau_1) d\tau_1 = T_0 [1 - \exp(-\tau_1)] \quad (1)$$

Здесь значение оптической толщины трассы:

$$\tau_1 = \tau(h_a; h_1 = \infty; \psi_0) = \sum_{i=1,2} \gamma_i(h_a) \cdot \sqrt{2H_i \cdot a_3} \cdot \exp\left(\frac{a_3}{2H_i} \cdot \sin^2 \psi_0\right) \times \\ \times \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} - F\left[\left(\frac{a_3}{2H_i}\right)^{1/2} \cdot |\sin \psi_0|\right] \right\}, \quad (2)$$

где $\tau_1 = \tau(h_a; h_1 = \infty; \psi_0)$ — оптическая толщина излучающего слоя атмосферы (первый аргумент — высота расположения начала трассы h_0 , второй — высота расположения конца трассы (в данном случае за пределами атмосферы — в ∞), третий — значение начального угла наклона трассы (в первом варианте — ψ_0) к плоскости горизонта);

$F(t) = \int_0^t \exp(-t^2) \cdot dt$ — интеграл ошибок (функция ошибок Гаусса); a_3, a ,

$K, dn/dh$ — те же, что и выше.

Во втором диапазоне ($\psi_{кр} < \psi_0 < 0$) радиояркостная температура

$$T_{я}(\psi_0) = T_0 \cdot (1 - \exp(-\tau_2 - \tau_3)), \quad (3)$$

где $\tau_2 = \tau(h_1; h_0; \psi_0)$ — оптическая толщина участка трассы между точками A (место расположения антенны) и Q' (точка пересечения линии визирования антенны и нормали к ней, проходящей через центр Земли);

$\tau_3 = \tau(h_1; \infty; \psi_1)$ — оптическая толщина участка трассы между точками Q' и H (конец трассы); ψ_1 — угол наклона трассы к горизонту в точке Q' .

Оптическая толщина трассы равна

$$\tau_2 + \tau_3 = \tau_{\Sigma 1} = \sum_{i=1,2} \gamma_i(h_a) \cdot \sqrt{2H_i \cdot a_{\Sigma}} \cdot \exp\left(\frac{a_{\Sigma}}{2H_i} \cdot \sin^2 \psi_0\right) \times \\ \times \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} + F\left\{\left(\frac{a_{\Sigma}}{2H_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot |\sin \psi_0|\right\} \right] \quad (4)$$

В третьем диапазоне трасса расположена под углом $-\pi/2 < \psi_0 < \psi_{\text{кр}}$. Радиояркостная температура в месте расположения антенны радиометра равна сумме радиояркостных температур, характеризующих три потока излучения

$$T_{\text{Я}}(\psi_0) = T_1 + T_2 + T_3, \quad (5)$$

где $T_1 = T_0 \cdot [1 - \exp(-\tau_4)]$ — радиояркостная температура излучения, создаваемого слоем атмосферы на трассе между точками A и Q , $\tau_4 = \tau(0; h_0; \theta_0)$; θ_0 — угол отражения излучения атмосферного подсвета в точке Q ; $T_2 = T_m [1 - R^2(\theta_0)] \exp(-\tau_4)$ — радиояркостная температура собственного излучения морской поверхности, ослабленного слоем атмосферы на трассе между точками A и Q ; $R^2(\theta_0)$ — коэффициент отражения Френеля по мощности от гладкой поверхности моря, рассчитываемый отдельно для горизонтальной и вертикальной поляризации исходя из значений угла отражения излучения атмосферного подсвета θ_0 и диэлектрической проницаемости морской воды ϵ ; $T_3 = T_0 \cdot R^2(\theta_0) \cdot [1 - \exp(-\tau_5)] \cdot \exp(-\tau_4)$ — радиояркостная температура подсвета, переотраженного морем и ослабленного на трассе AQ в $\exp(-\tau_4)$ раз, $\tau_5 = \tau(0; \infty; \theta_0)$; T_m — термодинамическая температура моря.

Оптическая толщина трассы в этом диапазоне углов

$$\tau_{\Sigma 2} = \tau_4 + \tau_5 = \sum_{i=1,2} \gamma_i(h_0) \cdot \sqrt{2H_i \cdot a_{\Sigma}} \cdot \exp\left(\frac{a_{\Sigma}}{2H_i} \cdot \sin^2 \psi_0\right) \times \\ \times \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{2} + F\left[\left(\frac{a_{\Sigma}}{2H_i}\right)^{1/2} \cdot |\sin \psi_0|\right] - 2F\left[\left(\frac{a_{\Sigma}}{2H_i}\right)^{1/2} \cdot \sin \theta_0\right] \right\} \quad (6)$$

С использованием формул (1—6) разработана программа, позволяющая строить угломестный профиль радиояркой температуры, т. е. зависимость радиояркой температуры от угла визирования для вертикальной и горизонтальной поляризации при выбранных параметрах, входящих в уравнения, с изменением угла места визирования от $-\pi/2$ (визирование в надир) до $\pi/2$ (визирование в зенит). Пример расчетов при значениях параметров: термодинамическая температура нижнего слоя атмосферы на высоте расположения приемника $T_0=293,15$ К, термодинамическая температура поверхности моря $T_m=288,15$ К, высота расположения антенны $h_a=10$ м, коэффициент рефракции $K_{ref}=1,333$, коэффициент поглощения в водяном паре $\gamma_1=0,05$ дБ/км, коэффициент поглощения в кислороде $\gamma_2=0,02$ дБ/км, диэлектрическая проницаемость морской воды (при солености 17 %) $\epsilon=(4.51+j2.63)^2$, длина волны $\lambda=8,6$ мм, представлен на рис. 1.

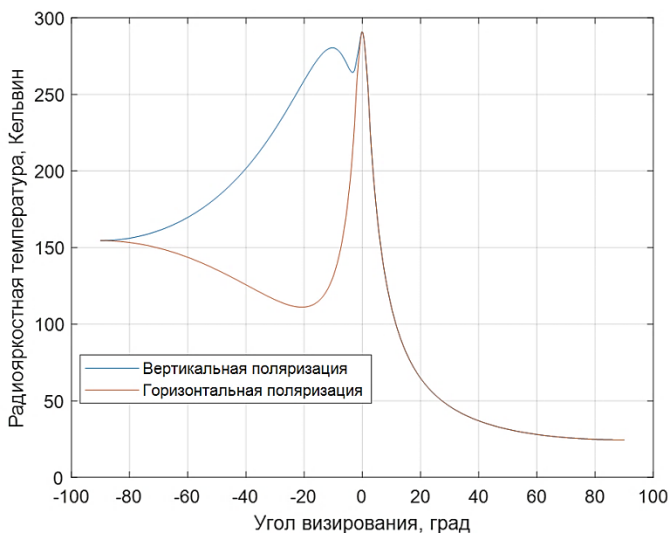


Рис. 1. Пример расчета угломестного профиля радиояркой температуры.

Fig. 1. Example of calculating the elevation profile of the radio brightness temperature

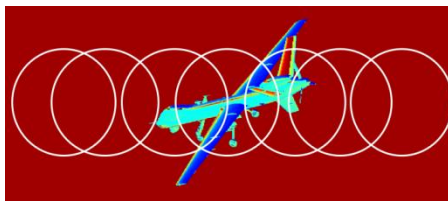
Вышеприведенные теоретические выкладки позволяют построить радиотепловое поле объекта, т. е. определить значение поля в любой точке пространства. С практической точки зрения наиболее интересен радиотепловой портрет объекта наблюдения. Для построения радиотеплового портрета необходимо определить значения поля в картинной плоскости — срезе радиотеплового поля плоскостью наблюдателя (воображаемая плоскость, перпендикулярная направлению визирования объекта и проходящая через точку наблюдателя), ограниченной контуром наблюдения. Условим-

ся называть такой ограниченный срез экраном наблюдателя. Разбивая экран наблюдателя на необходимое нам количество пикселей по горизонтали и вертикали и вычисляя в каждом пикселе значение радиотеплового поля, т. е. радиояркостную температуру пикселя, получаем в совокупности радиотепловой портрет объекта.

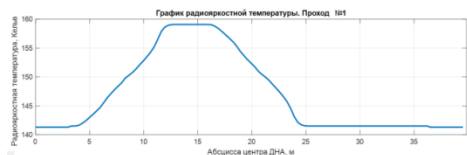
5. Компьютерная модель формирования радиотеплового портрета

Перед описанием разработанной компьютерной модели следует отметить, что радиотепловое приемное устройство (РТПУ) в СПОНН может быть двух принципиально различных типов.

1-й тип СПОНН имеет в составе радиометрический приемник с небольшим (от 1 до 4) количеством каналов. Такие РТПУ позволяют строить график радиотеплового (радиояркостного) контраста при прохождении диаграммы направленности антенны (ДНА) вдоль объекта горизонтально или вертикально. Это компактные малогабаритные системы, например, системы самонаведения крылатых ракет. В процессе сканирования при отсутствии цели в пятне ДНА на выходе радиометра (РТПУ) наблюдается постоянный временной сигнал, определяемый радиояркостной температурой фона. Как только в диаграмму попадает цель — сигнал изменяется, как для примера показано на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Пример горизонтального сканирования (а) и соответствующий график изменения сигнала на выходе радиометра 1-го типа (б).

Fig. 2. Example of horizontal scanning (a) and the corresponding graph of the signal change at the output of the type 1 radiometer (б)

2-й тип СПОНН позволяет строить радиотепловой портрет объекта на фоне окружающей среды. Это могут быть однолучевые РТПУ с пространственным сканированием главного лепестка ДНА, многолучевые РТПУ апертурного синтеза и панорамного типа, РТПУ с цифровой антенной решеткой, матричные, многоканальные РТПУ и т. д. [6, 7].

В дальнейшем будем рассматривать и графики радиотеплового контраста, и радиотепловые портреты объектов.

Исходная информация для модели формирования радиотеплового портрета — 3D-модель объекта — полигональная модель, являющаяся множеством многоугольников — граней, образующих в совокупности геометрическую модель объекта. Предусмотрено использование 3D-моделей в одном из наиболее распространенных форматов — *OBJ*.

Формат файлов *OBJ* определяет 3D-геометрию и включает строки, содержащие список вершин с их координатами, текстурные координаты, нормали, параметры вершин в пространстве (свободная форма геометрического состояния), определения полигонов-сторон, группы и объекты. Определения полигонов-сторон содержат списки вершин, текстурных координат и нормалей, из которых обязательны только вершины. Для нас существенно, что такие строки могут быть представлены в 4-х вариантах: определение вершин, образующих поверхность-полигон; определение вершин и текстурных координат; определение вершин, текстурных координат и нормалей; определение вершин и нормалей с пропуском индексов текстур.

Формат *OBJ* поддерживает многоугольники, линии, поверхности и свободные кривые формы. Линии и полигоны описываются их точками, кривые и поверхности определяются с использованием их контрольных точек, а также дополнительной информацией, специфичной для типа кривой. Эти детали позволяют представлять и регулярные, и нерегулярные кривые, в том числе на основе кривых Безье (полиномы Бернштейна), сплайнов, кардинальных сплайнов и уравнения Тейлора. Формат *OBJ* может определять свойства материала для моделей через соответствующий файл библиотеки — файл-спутник (*MTL*). Такой функционал делает формат *OBJ* подходящим для высокоточных моделей, таких как аэрокосмические, воздушные, морские и автомобильные конструкции.

Разработанная компьютерная модель последовательно решает ряд задач (громоздкие математические выкладки опущены):

- ввод исходных данных для расчетов — материал основных элементов корпуса объекта, положение цели (угловое положение в пространстве и относительно наблюдателя, высота приемного устройства, дальность, для воздушных целей — высота объекта, для надводных — осадка), выбор файла, содержащего 3D-модель объекта в формате *OBJ*;

- расчет угломестного профиля, т. е. зависимости радиотеплового излучения внешней среды, подсвечивающей поверхности объекта (при горизонтальной и вертикальной поляризации), от угла визирования, в соответствии с формулами (1—6);

- построчный анализ файла, содержащего информацию о цели в формате *OBJ*, определение строк, содержащих информацию о вершинах и

гранях, определение варианта формата строк граней, выделение вершин, образующих грани;

— расчет проекции трехмерной модели объекта на картинную плоскость, для чего производится пересчет 3D-модели объекта из его системы координат в систему координат, связанную с наблюдателем, с учетом углового положения объекта в пространстве и относительно наблюдателя, его дальности и высоты;

— разбиение граней-полигонов, имеющих более трех вершин, на треугольные;

— расчеты направляющих косинусов нормали каждой грани, с их помощью выделение граней, видимых наблюдателю. Сортировка всех видимых граней по расстоянию (приоритету по глубине), т. е. их удаленности от наблюдателя;

— разбиение экрана наблюдателя на элементы изображения — пиксели (их количество определяет пользователь). Для каждого пикселя перебор всех видимых в нем граней-треугольников, выбор ближайшей;

— для каждой ближайшей видимой грани определение ее радиояркостной температуры. Если грань металлическая, с использованием направляющих косинусов нормали каждой грани в земной системе координат и вектора наблюдения грани рассчитывается угол отраженного луча. По углу отражения с использованием зависимости радиояркостной температуры от угла визирования рассчитывается видимая наблюдателем радиояркостная температура грани при вертикальной и горизонтальной поляризации. Если грань неметаллическая, видимая наблюдателем радиояркостная температура рассчитывается по угломестному профилю с учетом коэффициента отражения ρ материала грани;

— попиксельное формирование радиотеплового портрета объекта: вычисление радиояркостной температуры, видимой наблюдателем в каждом пикселе экрана наблюдателя. Если пиксель соответствует грани, используется температура грани (для надводных объектов проверяется, что пиксель выше уровня моря). Если нет — пиксель соответствует фону (берег, море, атмосфера или ледовые образования) — в зависимости от критического угла места, определяющего линию горизонта. Если видна атмосфера — температура равна термодинамической температуре атмосферы. Если видно море — температура определяется излучением, переотраженным морской поверхностью от атмосферы, по углу визирования с помощью угломестного профиля. Построение на мониторе радиотеплового портрета цели с цветами пикселей, соответствующими уровню радиояркостной температуры;

— расчет графика радиотеплового (радиояркого) контраста (график изменения температуры, воспринимаемой РТПУ 1-го типа, при прохождении пятна ДНА горизонтально вдоль корпуса объекта локации) с использованием сформированного выше радиотеплового портрета. При каждом фиксированном положении антенны температура рассчитывается как среднее арифметическое температуры пикселей внутри пятна ДНА, что при выборе достаточно большого числа пикселей весьма близко к двойному интегралу от яркостной температуры (как функции от азимута и угла места) в области круга, образованного пятном ДНА. Следует отметить, что, поскольку диаметр пятна ДНА d определяется дальностью до цели D и углом ДНА α : $d=2D \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)$, при построении графиков контраста учитывается угол ДНА конкретной антенны. При построении графиков радиотеплового контраста программа пошагово горизонтально перемещает пятно ДНА вдоль изображения объекта с учетом соотношения размеров проекции объекта на картинную плоскость и диаметра пятна ДНА. В реальных задачах, если диаметр пятна ДНА при выбранной дальности меньше, например, вертикального габаритного размера объекта, необходимо более одного горизонтального прохода, что также учтено в программе.

Компьютерная модель реализована в среде программирования *Matlab*, версия R2018a.

6. Численные эксперименты

С помощью разработанной компьютерной модели проведен ряд численных экспериментов по построению радиотепловых портретов различных объектов с варьированием высоты расположения приемника и цели (если она воздушная — задается высота, если надводная — осадка), дальности и угловой ориентации объекта в пространстве и относительно наблюдателя, при различных фонах (морская поверхность, атмосфера, береговая черта, ледовые образования), с одновременным расчетом графиков радиотеплового контраста. При моделировании учитывались отражающие свойства материалов, составляющих элементы конструкции объектов.

В качестве примера для построения радиотепловых портретов используем 3D-модели объектов в формате *OBJ*:

— БПЛА *Bayraktar TB-2* (Турция). Длина 6,5 м, размах крыльев 12 м. Корпус выполнен из композитных материалов. В файле *.OBJ* грани заданы в длинном формате (вариант № 3). Число граней 3D-модели 4214;

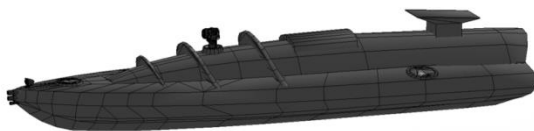
— БЭК «Микола-3» (Украина) — реплика *MANTAS T-12* (США). Корпус частично бронирован. Масса около 1 т, длина 3,5 м. В файле *.OBJ* грани заданы в длинном формате (вариант № 3). Число граней 3D-модели 5530;

— эсминец УРО класса «*Arleigh Burke*» ВМС США. Длина 155,5 м, ширина 18 м, водоизмещение 9300 т, осадка 9,9 м. Корпус — металл. В файле .OBJ грани заданы в длинном формате (вариант № 3). Число граней 3D-модели 34640.

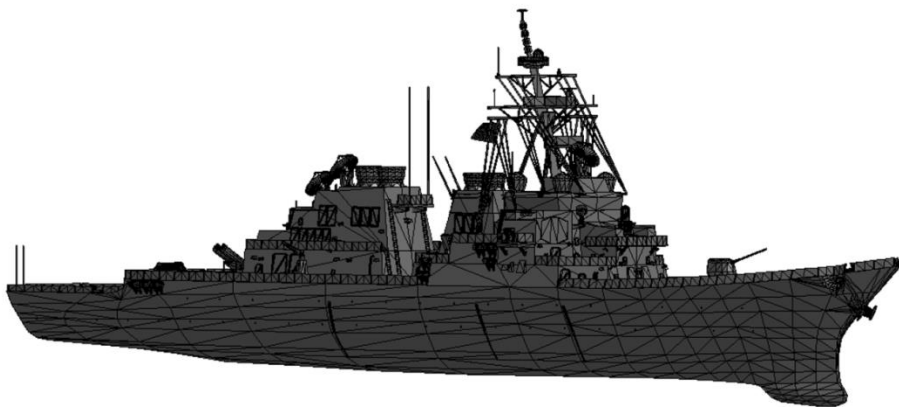
Примеры проекций этих 3D-моделей на картинную плоскость, рассчитанных с учетом их определенного углового положения в пространстве и относительно наблюдателя, представлены на рис. 3.



а. БПЛА Bayraktar TB-2
a. Bayraktar TB-2 UAV



б. БЭК «Микола-3»
b. Unmanned boat “Mykola-3”



в. Эсминец УРО класса «*Arleigh Burke*»
в. DDG “Arleigh Burke”

Рис. 3. Примеры проекций 3D-моделей на картинную плоскость.

Fig. 3. Examples of projections of 3D models onto the picture plane

Результаты расчетов радиотепловых портретов и графиков радиояркостного контраста для БПЛА *Bayraktar TB-2* (углы крена 60° , тангажа 10° , высота приемника над уровнем моря 10 м, БПЛА — 20 м, дальность 300 м) приведены на рис. 4а, для БЭК «Микола-3» (крен 8° , дифферент 0° , дальность 300 м) — на рис. 4б.

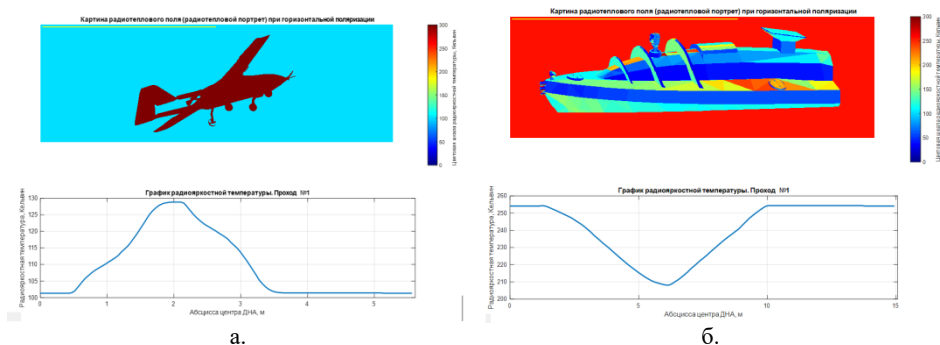


Рис. 4. Примеры расчета радиотепловых портретов и графиков радиояркостого контраста БПЛА и БЭК.

Fig. 4. Examples of calculating radiothermal portraits and graphs of radio-brightness contrast for UAV and unmanned boat

Результаты расчета радиотеплового портрета и графика радиояркостого контраста для эсминца УРО класса «Arleigh Burke» (крен и дифферент 0° , высота приемника 10 м, дальность 8 км) — на рис. 5.

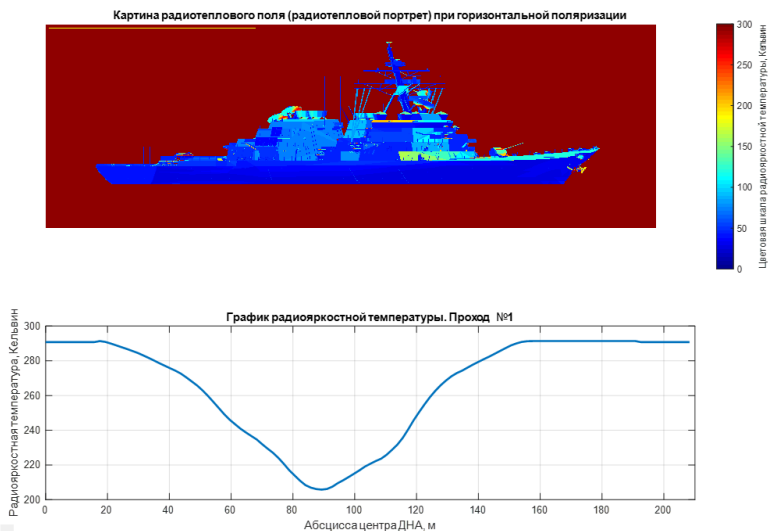


Рис. 5. Пример расчета радиотеплового портрета и графика радиояркостого контраста эсминца УРО класса «Arleigh Burke».

Fig. 5. An example of calculating the radio-thermal portrait and radio-brightness contrast graph for the Arleigh Burke-class guided missile destroyer

В целом проведенные численные эксперименты с варьированием объектов и их расположения относительно наблюдателя показали, что об-

наружение металлических объектов возможно при малых (менее 10°) углах визирования, радиояркий контраст при этом отрицателен. Обнаружение объектов, содержащих в конструкции преимущественно диэлектрические материалы, возможно на углах визирования более 10° , радиояркий контраст при этом положителен. В случае наличия в корпусе объекта композитных материалов, частично отражающих электромагнитные излучения, необходимы численные эксперименты с учетом коэффициентов поглощения материалов составных частей объекта.

7. Верификация модели

Проведена верификация математической и компьютерной модели путем сравнения графиков контраста, полученных в натурных и численных экспериментах для однотипных объектов.

Для проведения натурных экспериментов создан [8] экспериментальный радиотепловой комплекс, использующий 4-канальный радиометрический приемник с частотой 35,6 ГГц, разработаны программно-аппаратные средства, сопрягающие радиотепловое приемное устройство с ЭВМ. Комплекс относится к СПОНН 1-го типа и позволяет оценивать радиояркий контраст при движении объекта горизонтально через пятно ДНА, либо при перемещении пятна ДНА вдоль объекта. Сравнение графиков контраста, полученных в ходе натурных экспериментов, и графиков, построенных с помощью компьютерной модели для одних и тех же объектов наблюдения, показали их сходство, позволяющее сделать вывод об адекватности разработанной математической и компьютерной модели в части, касающейся радиотеплового контраста. Для проверки адекватности модели в части формирования радиотеплового портрета необходимы эксперименты с использованием СПОНН 2-го типа, сходство графиков контраста косвенно подтверждает эту адекватность.

Таким образом, для оценки возможности и условий обнаружения конкретных образцов надводных и воздушных объектов и определения требуемых параметров радиотеплового канала возможно вместо ресурсоемких натурных экспериментов с варьированием углового положения, дальности этих объектов, фона наблюдения, использовать представленную компьютерную модель.

Отметим, что наибольший радиотепловой контраст получается при близости вертикального размера цели и диаметра пятна ДНА, соответствующего текущей дальности объекта. При использовании в СПОНН современных [9, 10] радиотепловых приемников (цифровых антенных решеток, матричных, многоканальных, многолучевых приемных устройств)

возможно достижение максимально возможного радиояркостного контраста и дистанции обнаружения, построение радиотеплового портрета и идентификация цели с применением нейросетевых технологий.

8. Выводы

1. Разработанная математическая и компьютерная модель позволяет с помощью 3D-моделей строить радиотепловые портреты воздушных и надводных объектов при их различной дальности и угловой ориентации в пространстве и относительно наблюдателя с учетом отражающих свойств материалов их корпуса и фона (морская поверхность, береговая черта, атмосфера, ледовые образования) и определять радиояркостный контраст, воспринимаемый радиотепловым приемником.

2. Уверенное обнаружение металлических надводных и воздушных объектов пассивным радиотепловым каналом возможно при углах визирования менее 10° , при этом радиояркостный контраст отрицателен.

3. Обнаружение объектов, содержащих в конструкции преимущественно диэлектрические материалы, возможно на углах визирования более 10° , при этом радиояркостный контраст положителен. В случае использования в корпусе композитных материалов необходимы численные эксперименты с учетом коэффициентов поглощения материалов граней объекта.

4. Использование в радиотепловом канале цифровых антенных решеток, матричных и многоканальных радиометрических приемников с цифровым формированием ДНА позволит СНПОН максимально увеличить дальность обнаружения, строить в радиотепловой портрет и идентифицировать цель с помощью нейросетевых технологий.

Список литературы

1. Убайчин А. В., Филатов А. В., Орлов П. Е. Основы микроволновой радиометрии. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиозлектроники, 2014. 85 с.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. Пер. с англ., т. 4. Радиолокационные станции и системы. Под. ред. М. М. Вейсбейна. М. : Сов. радио, 1978. 376 с.
3. Радиовидение наземных объектов в сложных метеоусловиях / Под ред. В. А. Павельева. М. : Радиотехника, 2007. 80 с.
4. Бухаров А. Е. Моделирование измерений радиотепловых контрастов в задаче поиска и сопровождения объектов : дис. ... канд. техн. наук. 05.13.18. Пенза : ПГУ, 2008. 183 с.
5. Мельник Ю. А., Зубкович С. Г., Степаненко В. Д. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. М. : Сов. радио, 1980. 262 с.
6. Антюфеев В. И., Быков В. Н., Гричанюк А. М., Краюшкин В. А. Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов : монография. Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. 372 с.
7. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли : Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М. : Ленанд, 2016. 338 с.

8. Байздренко А. А., Вилор М. Ю., Докукина Н. В., Согомонян С. В. Программно-аппаратные средства цифровой следящей системы управления радиотеплового информационно-измерительного комплекса. Сб. научных трудов ЧВВМУ им. П. С. Нахимова. Вып. 3 (18). Севастополь, 2019. С. 87—96.
9. Многолучевые радиолокаторы в составе охранных комплексов. Антитеррор: монография / Под ред. И. К. Антонова. М. : Радиотехника, 2017. 216 с.
10. Бережной В. А., Кужель В. И., Тузенко А. П. и др. Многоканальный радиометр для систем радиовидения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 3. С. 14—15.

Информация об авторах

Согомонян Сергей Вартанович, к. т. н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории развития систем наведения, оптико-электронных и радиотехнических систем высокоточного оружия ВМФ, Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широков Игорь Борисович, д. т. н., профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Громов Алексей Сергеевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

A Mathematical Model for Generating a Radiothermal Profile of Surface and Airborne Objects and its Computer Implementation

S. V. Sogomonyan¹, I. B. Shirokov², and A. S. Gromov²

¹Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov
Build. 1a, Dybenko St., Sevastopol, 299028, Russian Federation

²Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
sogomonyany@mail.ru, shirokov@ieee.org, G-r-o-m-o-V.AleX@yandex.ru

Received: April 2, 2026

Peer-reviewed: April 9, 2026

Accepted: April 9, 2026

Abstract: Stricter requirements for the accuracy and reliability of search, detection, guidance, and navigation systems necessitate the integrated use of information channels of various physical natures in such systems. The development of microwave radiometry allows for the use of a passive millimeter-wave thermal radio channel as one such channel. When developing such a channel to assess the feasibility and probability of detecting and targeting various surface and airborne targets, obtaining the necessary thermal radio channel parameters, and ensuring the highest probability of detecting an object against various backgrounds, experimental studies are necessary for specific samples of detectable objects with variations in background, hydrometeorological conditions, angular position, and range relative to the observer. Full-scale experiments of this kind are extremely resource-intensive. The goal of this work is to develop mathematical and software tools that will replace full-scale experiments with numerical ones and calculate thermal radio portraits of objects, taking into account their position and background, as well as the object's radio brightness contrast. Expressions were obtained for the brightness temperatures of atmospheric and sea surface thermal radiation along target sighting paths in various angular ranges. These expressions form the basis for a mathematical model of the thermal field and the formation of a thermal image of the observed object. The resulting computer model allows for calculating the thermal field of surface and airborne objects at any point in space, constructing thermal imagery of objects against different backgrounds, at different angular orientations and ranges, taking into account the emissivity of the materials of individual hull elements, using 3D models of the objects in OBJ format. The developed models are useful for developers of integrated search, detection, guidance, and navigation systems in determining the necessary thermal imagery channel parameters for various targets against different backgrounds.

Keywords: microwave radiometry, radiothermal channel, radiothermal field, radiothermal portrait, mathematical model, computer model, 3D model, OBJ format, radio-brightness contrast.

For citation (IEEE): S. V. Sogomonyan, I. B. Shirokov, and A. S. Gromov, “A Mathematical Model for Generating a Radiothermal Profile of Surface and Airborne Objects and its Computer Implementation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 638–658, 2026, doi: 10.21227/tj1y-4g27. (In Russ.).

References

1. A. V. Ubaichin, A. V. Filatov, and P. Ye. Orlov, *Fundamentals of Microwave Radiometry*, Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2014. (In Russ.).
2. I. Skolnik, *Radar Handbook*, ed. M. I. Skolnik, McGraw Book Company, vol. 4, 1970.
3. *Modeling of measurements of radiothermal contrasts in the problem of searching and tracking objects*, Moscow: Radiotekhnika Publ., 2007. (In Russ.).
4. A. Ye. Bukharov, *Modeling of measurements of radiothermal contrasts in the problem of searching and tracking objects*, Ph.D. Tesis, Penza, Penza State University Publ., 2018. (In Russ.).
5. Yu. A. Melnik, S. G. Zubkovich, and V. D. Stepanenko, *Radar methods of Earth exploration*, Moscow: Soviet Radio Publ., 1980. (In Russ.).
6. V. I. Antyufeev, V. N. Bikov, A. M. Grichanyuk, and V. A. Krayushkin, *Matrix radiometric correlation-extreme navigation systems for aircraft*, Kharkov: Karazin Kharkov National University Publ., 2014. (In Russ.).
7. B. G. Kuzuza, M. V. Danilichev, and O. I. Yakovlev, *Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface*, Moscow: Lenand Publ., 2016. (In Russ.).
8. A. A. Baizdrenko, M. Yu. Vilor, N. V. Dokukina, and S. V. Sogomonyan, “Software and hardware of the digital tracking control system of the radio-thermal information and measuring complex,” in *Scientific papers of the Nakhimov Black Sea Higher Naval School*, vol. 18, no. 3, pp. 87–96, 2019. (In Russ.).
9. *Multibeam radars in security systems. Antiterror*, Moscow: Radiotekhnika Publ., 2017. (In Russ.).
10. V. A. Berezhnoi, et al., “Multichannel radiometer for radio vision systems,” *Technology and Design of Electronic Devices*, vol. 3, pp. 14–15, 2003. (In Russ.).

Information about the authors

Sergey V. Sogomonyan, CSc, Associate Professor, Senior Researcher, Research Laboratory for the Development of Guidance Systems, Optoelectronic, and Radiotechnical Systems of High-Precision Weapons of the Navy, P. S. Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, Russian Federation.

Igor B. Shirokov, Doctor of Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Aleksey S. Gromov, Student, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Роль радиоламповых технологий в судьбе экспедиции генерала Нобиле

Пестриков В. М.

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru

Получено: 30 декабря 2025 г.

Отрецензировано: 20 января 2026 г.

Принято к публикации: 20 января 2026 г.

Аннотация: Проведено исследование радиоламповых технологий, которые обеспечивали функционирование экспедиции Умберто Нобиле во время полета на дирижабле «Италия» к Северному полюсу. Уделено внимание этапам полета дирижабля от его организации до момента катастрофы. Рассмотрена и проанализирована работа радиоламповой аппаратуры, которая использовалась во время полета и в критические моменты жизнедеятельности экспедиции. Подробно освещается установление радиосвязи советским радиолюбителем Николаем Шмидтом с пострадавшими. Отмечена организация помощи СССР по спасению пострадавших членов экспедиции.

Ключевые слова: дирижабль, Амундсен, Северный полюс, Умберто Нобиле, дирижабль «Италия», катастрофа дирижабля «Италия», Красная палатка, СССР, спасение экипажа дирижабля «Италия», Николай Шмидт, ледокол «Красин».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Роль радиоламповых технологий в судьбе экспедиции генерала Нобиле // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 4. С. 659—686.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Роль радиоламповых технологий в судьбе экспедиции генерала Нобиле / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 659—686.

1. Введение

В 1926 году итальянский генерал и дирижаблестроитель Умберто Нобиле (итал. *Umberto Nobile*, 21.01.1885—30.07.1978) после успешной экспедиции на Северный полюс на дирижабле «Норвегия» в составе экспедиции под командованием Руаля Амундсена (норв. *Roald Amundsen*, 16.07.1872—18.06.1928) стал героем и прославился на весь мир. На борту построенного в Италии дирижабля он вместе с полярными исследователями

норвежцем Раулем Амундсеном и американцем Линкольном Эллсвортом (*Lincoln Ellsworth*, 12.05.1880—26.05.1951) совершил длительное путешествие из Рима на Аляску, пролетев над половиной Европы и, что наиболее важно, над Северным полюсом. Миссия «Норвегии» считается первым официально признанным пролетом мимо самой северной точки планеты Земля. Амундсен стал первым человеком в мире, посетившим оба полюса. Успех экспедиции вызвал сенсацию как в Европе, так и в Соединенных Штатах. Полет «Норвегии» продемонстрировал эффективность дирижабля как средства исследования, но с научной и картографической точки зрения он дал мало результатов: 4 миллиона кв. км в арктических регионах остались неисследованными.

Успех экспедиции «Норвегии» позволил премьер-министру Италии Бенито Амилкаре Андреа Муссолини (итал. *Benito Amilcare Andrea Mussolini*, 29.07.1883—28.04.1945) отправить Нобиле и его экипаж в триумфальную поездку по США, во время которой они выступали перед итальянцами-эмигрантами.

Нобиле возвратился в Италию с триумфом. В Неаполе, Риме народ с восторгом выстраивался в две шеренги для встречи героя. В официальных встречах и церемониях принимал участие Муссолини. Дуче, приветствуя Нобиле в Сенате 18 мая 1926 года, сказал, что правительство ставит «на повестку дня Нации полковника Умберто Нобиле, изобретателя, конструктора, командира воздушного корабля... который добился новой неоспоримой победы отечественной авиации, нашего знамени». После Нобиле был вручен военный орден Савойи (итал. *Ordine militare di Savoia*), состоялись приемы в Капитолии и в Географическом обществе. На конференции в Пизе присутствовал король Италии Виктор Эммануил III. Народные чествования проходили в разных городах Италии. «Фашизм делает из Нобиле, — как писала одна оппозиционная газета, — некий образец фашизма». 15 сентября 1926 года на церемонии в Палаццо Видони, в присутствии Муссолини, Умберто Нобиле в возрасте 41 год был присвоен генеральский чин и вручен билет Национальной фашистской партии [1].

Умберто Нобиле решил осуществить экспедицию, подобную экспедиции Амундсена, но под своим руководством. После того, как основные расходы по его реализации взяли на себя Королевское географическое общество Италии и город Милан, жителем которого был Нобиле, проект поддержал Муссолини.

Цель итальянской экспедиция, после создания базы в бухте Кингс Бей (англ. *Kings Bay*, норв. *Kongsfjorden*) архипелага Шпицберген, предусматривала три основные миссии: помимо полетов над Северным полюсом, дирижабль должен был исследовать три обширные, пока еще неиз-

вестные области в северной Гренландии, Сибири и Земле Франца-Иосифа [2]. Помимо научной цели, была и политическая: продемонстрировать миру престижный научный национальный проект, возглавляемый фашистским режимом. Полет Нобиле должен был ознаменовать триумф фашизма во имя процветания Италии. При постройке дирижабля Италия на его бортах были нарисованы ликторские фации¹. Все это должно было после успеха экспедиции на дирижабле «Норвегия» в 1926 году подтвердить итальянскую мощь. Однако итальянская миссия обернулась арктической трагедией, кульминацией которой стало крушение дирижабля «Италия», борьба выживших на паковом льду и масштабная международная спасательная операция, в результате которой погибло много людей, включая исследователя Амундсена. Это вызвало споры и широкое освещение в прессе.

2. Подготовка к полету

Жажда новых научных открытий, наряду со стремлением к приключению, стали тем движущим фактором, который подвигнул ученых и исследователей из разных стран присоединиться к задуманной экспедиции Нобиле и подготовить подробный план арктических исследований. Италия в те годы была ведущей страной в строительстве дирижаблей, которая получала заказы даже из США. Умберто Нобиле спроектировал и построил четыре полужестких дирижабля. Первый дирижабль имел номер *N1* и назывался «Норвегия», а последний имел номер *N4* и получил название «Италия». Дирижабли *N1* и *N4* предназначались для полярных исследований.

Дирижабль «Италия» был изготовлен на заводе *Stabilimento di Construzione Aeronatiche (SCA)* в Чампино (*Ciampino*, в окрестности Рима) за несколько месяцев, рис. 1. Он был оснащен по последнему слову техники того времени. Технические характеристики дирижабля: газ в оболочке — водород, объем — 18 500 м³, длина — 104,9 м, высота — 19,4 м, мощность двигателей — 552 кВт, максимальная скорость полета — 90 км/ч, полезная нагрузка — 8275 кг.

Итальянское правительство, в частности, Итало Бальбо² (итал. *Italo Balbo*, 05.06.1896—28.06.1940), государственный секретарь Королевских

¹ Фации (лат. *fascies*) иначе ф́аски, ф́асцы, также ликторские пучки — пучки вязовых или березовых прутьев, перетянутые красным шнуром или связанные ремнями. Атрибут власти древнеримских царей. Бенито Муссолини, ведомый идеей восстановления Римской империи, избрал после Первой мировой войны фации символом своей партии, откуда и появилось ее название — Национальная фашистская партия.

² Бальбо единственный Маршал авиации Италии. В 1931 году, во время пребывания в Нью-Йорке в *Madison Square Garden* Бальбо выступая под ликующие возгласы итальянских иммигрантов сказал знаменитое: «Гордитесь тем, что вы итальянцы. С приходом Муссолини закончилась эра унижения!». (См. Italo Balbo. URL: https://military-history.fandom.com/wiki/Italo_Balbo#cite_note-7, 19.12.2025).

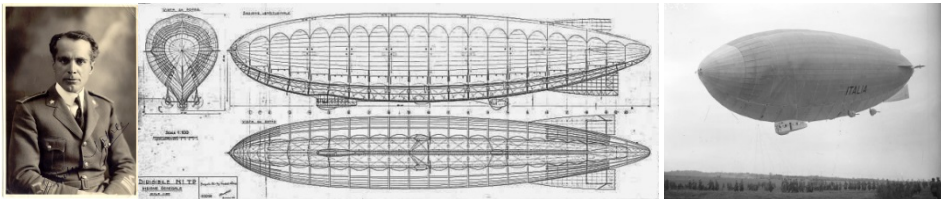


Рис. 1. Умберто Нобиле. Дирижабль «Италия» в масштабе 1:250, Piazzai Models-63.³
Дирижабль «Италия», 1 апреля 1928 г.

Fig. 1. Umberto Nobile. Airship "Italia" in scale 1:250, Piazzai Models-63.³
The airship "Italia", April 1, 1928

ВВС, выступал против новых инвестиций в сектор дирижаблей, предпочитая направлять их на создание летательных аппаратов тяжелее воздуха. В связи с этим дирижабль Нобиле был построен на средства, пожертвованные несколькими промышленниками и частными лицами в Милане. Итальянская общественность приветствовала экспедицию. Финансовая поддержка поступила даже из Ватикана. Частные средства также были использованы для оснащения вспомогательного судна *Città di Milano*, старого торгового судна, командование которым было поручено капитану Джузеппе Романья Маноя (*Giuseppe Romagna Manioia*), убежденному фашисту. Нобиле также просил разместить в бухте Кингс Бей архипелага Шпицберген два гидросамолета для чрезвычайных ситуаций, но Итало Бальбо в этой просьбе ему отказал. Вместо этого был выделен небольшой отряд альпийских войск.

3. Радиоаппаратура корабля обеспечения *Città di Milano*

В конце 1927 года кабелеукладочное судно *Città di Milano* (рис. 2) было выбрано в качестве корабля материально-технического и организационного обеспечения арктической экспедиции дирижабля «Италия» под командованием генерала Умберто Нобиле. Судно прошло модернизацию с учетом особенностей арктической экспедиции, которая заключалась в усилении корпуса стальными пластинами, а также оснащением и установкой соответствующего научного, телеграфного и метеорологического оборудования. С экипажем из альпийских солдат, ученых и студентов университета оно вышло из порта Ла Специя 20 марта 1928 года и направилось на архипелаг Шпицберген в Норвегии. Судно снабжения везло новый брезент для покрытия ангара дирижабля, а также 300 тонн водородных баллонов и других припасов.

³ Dirigibile Italia scala 1-250 Piazzai Models-63.

URL: <https://www.flickr.com/photos/mauriziopiazzai/33913852353/in/photostream/> (24.12.2025).

На борту судна были установлены два передатчика: один для неза-
тухающих радиоволн от 28 до 55 м и от 600 до 2400 м, а другой для зату-
хающих радиоволн от 600 до 1500 м. Для приема были установлены ра-
диоприемники производства *Burndept*, *Greebe* и *Telefunken*, которые при-
нимали радиоволны в диапазоне от 10 м до 24 000 м.



Рис. 2. Корабль обеспечения *Città di Milano* арктической экспедиции дирижабля *Italia*, который 20 марта 1928 г. под командованием Джузеппе Романья Маноха вышел из порта Ла Специя и направился в пункт назначения фьорд Кингс-Бей архипелага Шпицберген.

Fig. 2. The supply ship “Città di Milano” of the Arctic expedition of the airship “Italia”, which on March 20, 1928, under the command of Giuseppe Romagna Manoja, left the port of La Spezia and headed for the destination of the Kings Bay fjord of the Spitsbergen archipelago

На *Città di Milano* также были установлены два радиопеленгатора для ра-
диоволн в диапазоне от 450 м до 1100 м. Оборудование дирижабля вклю-
чало в себя коротковолновые и длинноволновые передатчики. Именно
Гульельмо Маркони настойчиво советовал Умберто Нобиле оснастить ди-
рижабль коротковолновыми радиостанциями, в то время называемыми
ондинами (итал. *Radio ad Onde corte*). Экспедиция Нобиле приобрела ко-
ротковолновый передатчик *ONDINA* тип *S*.

В тот период времени набирала популярность так называемая «ко-
лониальная модель» организации связи. Согласно этой модели для связи
между отдаленными территориями отдавалось предпочтение коротким
волнам. Центр этой связи в Италии находился на станции *San Paolo* в Ри-
ме, которая, сыграла ключевую роль в связи с Арктикой во время поисков
экипажа. Использование коротковолновых и длинноволновых систем свя-
зи одновременно представляло собой проблему защиты от возникающих
взаимных помех, для устранения которой в августе 1928 г. были проведе-
ны эксперименты. Через несколько недель после спасения выживших во-
еннослужащих итальянских ВВС были предприняты новые исследования
возникшей проблемы, но уже на борту дирижабля. Полученные результа-
ты оказались неудовлетворительными.

4. Радиоаппаратура дирижабля «Италия»

Для поддержания радиосвязи с радиостанциями на земле и в воздухе
дирижабль «Италия» был оснащен ламповой радиоприемной и радиопере-

дающей аппаратурой, которая была изготовлена различными радиотехническими компаниями [3].

Радиостанция типа *Marconi RA*. За работу радиоаппаратуры на дирижабле отвечали младший лейтенант Этторе Педретти (*Ettore Pedretti*) и главный радист 3-го класса Джузеппе Бьяджи (*Giuseppe Beagi*, 12.02.1897—01.11.1965), рис. 3. Этторе Педретти не был на борту дирижабля в его последнем трагическом полете⁴. На радиостанции «Италия» в тот момент, работал Д. Бьяджи.



Рис. 3. Радиоспециалисты дирижабля «Италия»: младший лейтенант Этторе Педретти (слева) и главный радист 3-го класса Джузеппе Бьяджи (справа). 1928 г.

Fig. 3. Radio specialists of the airship “Italia”: Second Lieutenant Ettore Pedretti (left) and Chief Radio Operator 3rd Class Giuseppe Biagi (right). 1928

На борту воздушного суда имелась телефонная радиостанция типа *Marconi RA (aircraft wireless telephone)*, личный подарок У. Нобиле от известного итальянского радиотехника Гульемото Маркони. Радиостанция включала в себя два независимых блока: передатчик *Marconi RA8* и приемник *Marconi RA6*. Блоки соединялись между собой через пульт дистанционного управления, с помощью кабелей с разъемами. Радиостанция в свое время была специально разработана для военных самолетов. Изготовила радиостанцию *RA* компания *Marconi’s Wireless Telegraph Company, Limited*.

Передатчик *Marconi RA8* был разработан на основе телефонного передатчика типа *AD1*, предназначенного для телефонного общения между самолетами и наземными аэродромными службами. Этот телефонный передатчик был сконструирован в 1919 году, и уже в следующем, 1920 году, был впервые использован на 16 самолетах модели *De Havilland DH16*. Схема передатчика типа *AD1* приведена на рис. 4. В передатчике использовались два вакуумных триода *Marconi* типа *MT3E* мощностью 100 Вт. Одна лампа использовалась в качестве генератора, вторая — как модулятор.

Передатчик типа *AD1* был собран в деревянном корпусе и имел габариты 235×220×170 (*H×L×B*) мм, рис. 4. На каждой боковой стороне корпуса были установлены три специальных болта для крепления передатчика на борту летательного аппарата.

⁴ Этторе Педретти в это время, находился на корабле *Città di Milano* возле Шпицбергена и осуществлял сопровождение дирижабля.

Радиопередающее устройство могло работать в любом положении. Радист при желании мог управлять передатчиком на расстоянии. В последнем случае передатчиком можно управлять с небольшого пульта дистанционного управления. Через пульт осуществлялась также коммутация антенны в режимах «передача — прием» и «прием — передача». В комплект передатчика входил ключ Морзе, который подключался к нему с помощью клемм, рис. 4.



Рис. 4. Принципиальная схема передатчика *Marconi* типа *AD1* (1921 г.) и общий вид триода *Marconi MT3E* (1920 г.). Общий вид самолетного телефонного радиопередатчика типа *AD1* (1920 г.). Пульт управления радиопередатчика типа *AD1*, к которому подключены: микрофон, передатчик, динамо-машина, блок телеграфного ключа и кабель радиоприемника (1920 г.).

Fig. 4. Schematic diagram of the Marconi AD1 transmitter (1921) and general view of the Marconi MT3E triode (1920). General view of the AD1 aircraft telephone radio transmitter (1920). The AD1 radio transmitter control panel, to which are connected: microphone, transmitter, dynamo, telegraph key block, and radio receiver cable (1920)

Во время радиосвязи между объектами передатчик использовался в сочетании со специально разработанным для него радиоприемником, которым оснащались самолеты.

Переход с режима передачи на режим приема осуществлялся автоматически, с помощью кнопки, расположенной в ручке микрофона. В этот момент, антенна также переключалась на приемник. Как только нажималась кнопка микрофона, антенна автоматически подключалась к передатчику, включалось высокое напряжение, лампы загорались, и можно было опять вести обмен информацией.

В самолетном телефонном радиопередатчике *Marconi RA8*, в отличие от его прототипа передатчика типа *AD1*, были использованы в 2,5 раза более мощные вакуумные триоды типа *Osram-Marconi*⁵ *T250 MO*, рис. 5. Радиопередатчик *RA8* работал в диапазоне длинных радиоволн 600—900 м.

⁵ *Marconi-Osram Valve Co. Ltd.* была образована *Marconi* и *GEC* (Британская компания) в 1919 году, а годом позже стала именоваться *M-O-Valve* или *M.-O. Valve*. Производственная база *GEC* находилась в Хаммерсмит (*Hammersmith*, район на западе Лондона).

Для передачи использовалась рамочная антенна в форме барабана, на который была намотана бронзовая проволока длиной 100 м. Для питания передатчика использовалась динамо-*Marelli* (*Marelli dynamo*), которая приводилась во вращение воздушным винтом.



Основные электрические параметры триода <i>T250 MO</i>	
Напряжение накала нити, В	12,5
Ток накала нити, А	5,5
Напряжение анода, В	2000—4000
Мощность рассеивания анодом, Вт	250
Размеры, мм/дюймы	125×280/4,92×11,02

Рис. 5. Вакуумный триод типа *Osram-Marconi T250 MO* и его параметры (1922 г.).
Общий вид радиоприемника *Marconi* типа *RA6*, который находился на дирижабле «Италия» (1928 г.).

Fig. 5. Vacuum triode type *Osram-Marconi T250 MO* and its parameters (1922).
General view of the *Marconi RA6* radio receiver, which was on the airship “*Italia*” (1928)

С моделью передатчика *RA8* использовался радиоприемник типа *RA6* (рис. 5). Этот бортовой приемник был изготовлен на заводе *Marconi* в Генуе специально для итальянских военных воздухоплавателей. Производство модели *RA6* началось в 1926 году. Радиоприемник работал в диапазоне волн 230—1500 м (средние и длинные волны) и оператор мог принимать на наушники как голосовые, так и телеграфные сообщения. Габариты устройства *RA6*: 220×380×200 мм, вес — 3 кг.

В схеме приемника *Marconi RA6* работало 5 вакуумных триодов типа *Marconi V24*, один из них использовался в роли регенеративного детектора. На передней панели корпуса приемника располагались 4 ручки настройки. На боковых сторонах корпуса, слева и справа, имелось по три специальных болта для крепления аппарата на борту дирижабля. На левой боковой стороне корпуса выступала ручка для регулировки обратной связи. В верхней стороне располагался зажим кабеля антенны. Передняя панель с целью облегчения замены радиоламп была съемной.

Радиоприемник *Burndept MK IV*. Для приема коротких волн на борту дирижабля «Италия» находился английский коммерческий радиоприемник *Burndept MK IV* производства 1927/1928 гг. английской компании *Burndept Ltd*, рис. 9. Это был один из первых радиоприемников, выпущен-

ных после открытия ширококвещательной радиостанции Би-би-си в 1927 г. в Лондоне. В Италии в то время такой радиоприемник был только у Папы Римского Габриэле д'Аннунцио (итал. *Il Papa, Gabriele d'Annunzio*) и еще у нескольких человек.

Приемник с использованием сменных катушек индуктивности мог принимать информацию в диапазоне коротких радиоволн от 12 м до 100 м. Сменные катушки размещались в выдвижном ящике в основании устройства. Прием радиостанций производился на наушники. В радиоприемнике использовалось три вакуумных триода типа *Mullard 5525*. Схема приемника (рис. 9) содержала один каскад усиления радиочастоты и два каскада усиления звуковой частоты. Высокочастотный каскад являлся регенеративным и собран на одной лампе. Корпус радиоприемника изготовлен из крепкого красного дерева. Габариты приемника 432 × 305 × 241 мм.

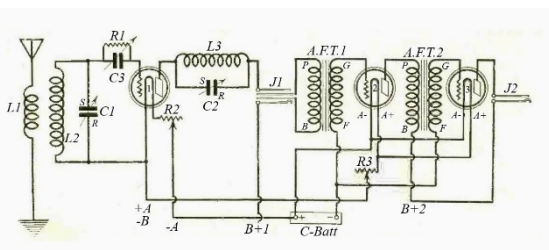


Рис. 9. Радиоприемник *Burndept MK IV* (1927/1928 г.).
 Предлагаемая принципиальная схема *Burndept MK IV* [4].

Fig. 9. *Burndept MK IV* radio receiver (1927/1928).
 The proposed schematic diagram of the *Burndept MK IV* [4]

Радиопередатчик *ONDINA* типа *S*. На случай непредвиденных обстоятельств предусмотрительный Д. Бьяджи взял с собой в полет стационарный батарейный коротковолновый телеграфный передатчик *ONDINA* типа *S*, рис. 10. Это было сделано им несмотря на приказание штурмана Адальберто Мариано (*Adalberto Mariano*) не брать этот вид радиоаппаратуры. Радиопередатчик *ONDINA* мощностью 5 Вт был изготовлен на оружейном заводе в Ла Специи (итал. *La Spezia*) и работал на фиксированной частоте с длиной волны 33 м. Радиопередающее устройство было собрано в специальном деревянном ящике с размерами 55×22×25 см и весило около 12 кг. На передней панели корпуса располагались три контрольных прибора, ручка управления воздушным конденсатором, и небольшие переключатели. Корпус аварийного передатчика был очень прочным, что позволяло Бьяджи использовать его на борту дирижабля в качестве сиденья радиотелеграфиста.

Для радиопередачи достаточно было присоединить антенну и противовес в виде двух проводов длиной примерно в четверть желаемой длины волны, поэтому для волнового пакета 33 потребовалось около 8 метров провода. В идеале один из двух проводов должен был быть вертикальным, а другой — горизонтальным, слегка приподнятым над землей. Дневная дальность действия могла составлять от 500 до 1000 км, в зависимости от длины волны и атмосферных условий. Джузеппе Бьяджи вспоминал [5], что *ONDINA* типа *S*: «Творила чудеса, и когда длинная волна затихала и становилась неслышимой, включалась радиостанция «33», и все продолжалось нормально. Я мог с «33» связываться напрямую с римской станцией *San Paolo*, находясь на борту дирижабля у Новой Земли, на расстоянии около 7000 километров».

Экспериментальное использование коротких волн в дополнение к традиционным средним и длинным волнам для того времени было абсолютной новинкой. Система связи экспедиции Нобиле для отслеживания судна сопровождения и дирижабля представляла собой радиотелеграфную станцию Королевского военно-морского флота в районе *San Paolo* в Риме в качестве опорной точки. Радиотелеграфная структура была «построена» командирами Джузеппе Пессоном и Джино Монтефинале (итал. *Giuseppe Pession* и *Gino Montefinale*).

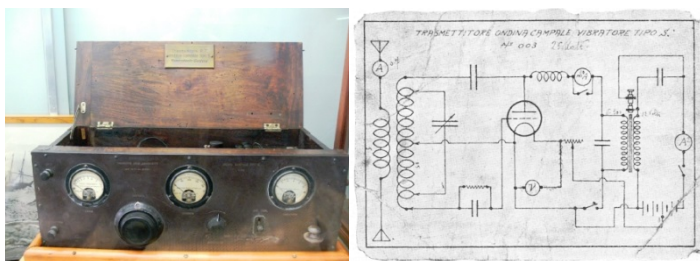


Рис. 10. Коротковолновой радиопередатчик *ONDINA* типа *S*. Благодаря этому радиопередатчику радист Джузеппе Бьяджи спас выживших с дирижабля во время экспедиции *Italia* к Северному полюсу. Листок бумаги со схемой радиопередатчика *ONDINA* типа *S* Бьяджи, после трех месяцев нахождения в его карманах вместе с кусочками сушеного мяса (итал. *pemmikam*) и шоколада [6].

Fig. 10. *ONDINA* type *S* shortwave radio transmitter. Thanks to this transmitter, radio operator Giuseppe Biagi rescued survivors from an airship during the *Italia* expedition to the North Pole. A piece of paper with a diagram of Biagi's *ONDINA* type *S* radio transmitter, after three months of being in his pockets along with pieces of dried meat (Italian: *pemmikam*) and chocolate [6]

Радиопередатчик разработал радиолюбитель Джулио Салом⁶ (итал. *Giulio Salom* *IMT*). Передатчик работал в диапазоне 33 метра, отсюда и

⁶ Джулио Салом был известным итальянским коротковолновиком-любителем из Венеции.

название *Ondina 33* типа *S*. В названии передатчика буква *S* обозначает фамилию конструктора передатчика *Salom*.

Всего было собрано 6 таких передатчиков. Передатчик Д. Бьяджи имел № 3 и был изготовлен в мастерской Королевского военно-морского флота в Ла Специя⁷ (итал. *Marina Militare di La Spezia*).

Радиопередатчик *Ondina 33* типа *S* собран по схеме генератора Хартли на вакуумном триоде *Philips TB 04/10*, рис. 10. Для питания передатчика *ONDINA* типа *S* использовался аккумулятор с напряжением 12 В. К аккумулятору был присоединен вибропреобразователь, который давал на выходе напряжение 300 В для питания анодных цепей. От этого же источника питания бралось напряжение 6 В для нагрева нити накала триода *Philips TB 04/10*, рис. 11. Вся система потребляла около 3 А, то есть с двумя батареями на 1,2 В и емкостью 100 А·ч была возможность эффективной передачи в течение 50—80 часов.



Рис. 11. Триод *Philips TB 04/10*: общий вид, варианты цоколей, анодные и анодно-сеточные характеристики и основные электрические параметры.

Fig. 11. Philips TB 04/10 triode: general appearance, base options, anode and anode-grid characteristics and main electrical parameters

Вакуумный триод *TB 04/10* был разработан компанией *Philips* специально для радиолюбителей. Эта лампа, благодаря специальной нити накала, при низком анодном напряжении имела большую выходную мощность. Триод *TB 04/10* был довольно универсальной лампой. Его можно было использовать в качестве генератора или модулятора телефонного

⁷ Город Ла Специя находится между Генуей и Пизой на Лигурийском море.

передатчика, рис. 12. Он подходил для работы в качестве усилителя мощности в усилителе звуковой частоты с несколькими громкоговорителями, когда необходимо озвучить большую аудиторию. Такой усилитель позволял подключение до 100 динамических громкоговорителей. При желании триод *TB 04/10* мог быть использован в качестве выпрямителя переменного тока, если соединить вместе сетку и анод.

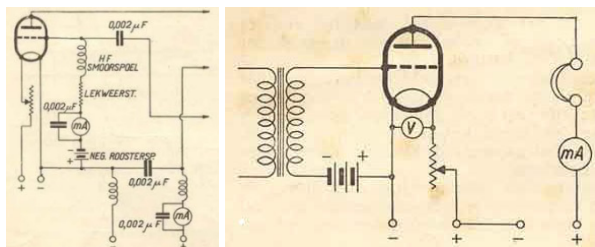


Рис. 12. Пример использования триода *Philips TB 04/10* в схемах: генератора высокой частоты (слева) и усилителя звуковой частоты.

Fig. 12. An example of using the Philips TB 04/10 triode in circuits: a high-frequency generator (left) and an audio frequency amplifier

Генератор на базе лампы *TB 04/10* при анодном напряжении 220—250 В и мощности 5—10 Вт генерировал радиочастоты, соответствующие диапазону коротких радиоволн. При этом настройка резонансных контуров и антенны должна быть такой, чтобы средний анодный ток достигал значения от 50 до 60 мА при непрерывной работе телефоном. В режиме телеграфа анодный ток увеличивался до 75 мА, но не превышал этой величины. Сетка считалась настроена правильно, если ее ток составлял 15—20 % от общей величины анодного тока.

Триод типа *TB 04/10* выпускался с нормальным цоколем *Philips A 34*, но мог быть поставлен заказчику и с американским стандартным (*American Standard*) цоколем *G 34*.

5. Отлет экспедиции на Шпицберген

Большой интерес к экспедиции У. Нобиле проявлял и Папа Пий XI, который являлся заядлым альпинистом. 31 марта 1928 года экипаж «Италии» был принят в Ватикане. Папа Пий XI благословил это предприятие и передал Нобиле большой дубовый крест, который нужно было доставить на Северный полюс, рис. 13. Как и любой крест, предупредил Папа, это будет тяжелое бремя.

В среду, 11 Апреля 1928 г., Умберто Нобиле встретился с дуче Муссолини. У. Нобиле во время доклада Б. Муссолини о готовности экспеди-

ции к Северному полюсу, в частности, сказал: «...Все предусмотрено. Это лучший способ добиться успеха, когда предусмотрено на все сто процентов. Кроме того, мой опыт... Целью экспедиции является привлечь внимание научного мира, а не поразить воображение людей, как это было в 1926 году. Но, я уже вижу, что к этому есть большой интерес за рубежом».



Рис. 13. Встреча дуче Муссолини и Умберто Нобиле (1928 г.). Кардинал Тоси (*Tosi*) провожает экспедицию дирижабля «Италия» (Аэропорт Милана. 15 апреля 1928 г.). Умберто Нобиле с любимой собачкой Титиной. Генерал Нобиле перед дирижаблем «Италия».

Fig. 13. Meeting of Duce Mussolini and Umberto Nobile (1928). Cardinal Tosi sees off the expedition of the airship "Italia" (Milan Airport. April 15, 1928). Umberto Nobile with his beloved dog Titina. General Nobile in front of the airship "Italia"

Время вылета экспедиции держалось в строгом секрете, чтобы избежать наплыва большого числа любопытных и не нарушить график. В воскресенье, 15 апреля 1928 г., в 13:55 с аэродрома Баджо (итл. *Baggio*) Милана дирижабль «Италия» вылетел в сторону фьорда⁸ Кингс Бей архипелага Шпицберген, рис. 14. Нобиле впервые проигнорировал предчувствие любимой собаки Титины (*Titina's*). Пес не хотел бросать хозяина и сопротивлялся изо всех сил. Нобиле пришлось поднять его и взять на борт. За отправлением дирижабля наблюдал сам Муссолини. Дирижаблю предстояло преодолеть до места назначения путь около 6000 км.

Вылет состоялся несмотря на то, что У. Нобиле не дождался сводки прогноза погоды, между тем, метеорологические условия оказались неблагоприятными. На борту воздушного судна находилось 13 членов экипажа, два журналиста и трое ученых.

Полет дирижабля «Италия» начался неудачно с первых же часов. В 14:40 дирижабль прошел над Веной, рис. 15. Пролетая над Альпами, дирижабль попал в шторм и получил повреждения. В 21:55 обсерватория *Linderberg* сообщила по радиотелеграфу, что погодные условия позволяют продолжить путь до немецкого города, называвшегося тогда Штольп⁹

⁸ Фьорд (также *фьёрд*, *фиорд*, норв. *fjord*) — узкий, извилистый и глубоко врезавшийся в сушу морской залив со скалистыми берегами.

⁹ Город Штольп в то время был в составе провинции Померания Свободного государства Пруссия, которое было создано в 1918 году, после ликвидации Королевства Пруссия по итогам Первой

(нем. *Stolp*) в Померании, который находится в более чем 2000 км от Милана. На следующее утро дирижабль сел возле лагеря *Iesseritz* у Штольпа, рис. 15. Во время 10-дневной остановки, экипаж «Италии» устранил повреждения кия, верхней стороны гондолы и заменил три винта, которые были повреждены градом. Дирижабль «Италия» продолжил свой путь только 3 мая. Задержка произошла из-за непредвиденного ремонта и нарушения времени прибытия судна обеспечения *Città di Milano*, которое было задействовано для поддержания радиосвязи. Швартовка в Финляндии также произошла в плохую погоду. К счастью, все прошло хорошо.



Рис. 14. Генерал Нобиле перед дирижаблем «Италия» во время его отлета из Милана.

Буксировка дирижабля «Италия» при вылете из Милана (апрель 1928 г.).

Полет дирижабля «Италия». Почтовая открытка. Италия (1928 г.).

Fig. 14. General Nobile in front of the airship Italia during its departure from Milan.

Towing the airship "Italia" on departure from Milan (April 1928).

Flight of the airship "Italia". Postcard. Italy (1928)

Путь дирижабля «Италия» пролегал над Швецией через Стокгольм, рис. 15. Это было сделано для того, чтобы пролететь над домом члена экспедиции Финн Мальмгрена. В момент пролета над его домом «Италия» снизилась до минимально возможной высоты и был сброшен мешок с песком в виде флага и два письма, одно для матери Мальмгрена, а второе для телеграфных агентств. После этого дирижабль направился к норвежскому городу Вадсё (норв. *Vadsø*). В Вадсё специально для него была построена причальная мачта, которая использовалась как важная промежуточная остановка для швартовки и снабжения дирижабля перед драматическим путешествием к Северному полюсу.

В воскресенье, 6 мая 1928 г., в 11:22 дирижабль У. Нобиле достиг фьорда Кингс-Бей и уже через 1,5 часа подошел к причальной мачте и ангару в небольшом поселке Нью-Олесунн (норв. *Ny-Ålesund*). В этом поселке на берегу фьорда Кингс-Бей была развернута база экспедиции. Поселок

мировой войны. 25 февраля 1947 года союзным Контрольным советом в Германии был принят закон «О ликвидации Прусского государства». 1 марта 1947 года, этим же советом, официально было объявлено о том, что Прусское государство, которое «являлось источником милитаризма и реакции в Германии», больше не существует. С того времени Штольп является польским городом Слупск (польск. *Słupsk*).

выбран был не случайно, он являлся самым северным в мире постоянным поселением и расстояние от него до Северного полюса по прямой линии составляет примерно 1200 километров. Из-за сильного ветра дирижабль не смог зайти в ангар и поэтому пришвартовался в верхней части мачты с надеждой на то, что это удастся сделать при хороших погодных условиях.



Рис. 15. Пролет дирижабля «Италия» над Веной (рисунки А. Бейтраме). Дирижабль «Италия» перед посадкой возле немецкого города Штольп. Дирижабль «Италия» над Стокгольмом.

Fig. 15. Flight of the airship "Italia" over Vienna (drawing by A. Beitramé).

The airship Italia before landing near the German city of Stolp. The Italia over Stockholm

В Кингс-Бей экипаж немедленно приступил к работе и начал подготовку к исследовательским полетам. Нобиле планировал не только обследовать с воздуха неизвестные районы Северного Ледовитого океана, но и высадить на лед в районе Северного полюса группу ученых. Предполагалось их оставить на неделю с продуктами и приборами для выполнения научных исследований. Они должны были измерить глубины океана, произвести океанографические исследования, а также получить информацию о земном магнетизме в этом месте. Спустя неделю дирижабль должен был вернуться и всех забрать. Однако вышло все иначе.

6. Катастрофа экспедиции Нобиле

В пятницу, 11 Мая 1928 г., Нобиле совершил на дирижабле с экипажем 13 человек первый разведочный полет на Землю Николая II¹⁰. При движении на восток погодные условия ухудшились и дирижабль оказался в условиях сильного ветра со снегом. Было решено вернуться на базу заблаговременно до того, как образуется наледь на рулях.

Снег падал непрерывно и на следующий день, У. Нобиле опасался, что обледеневшая оболочка дирижабля разрушится, но все обошлось. Через два дня, 15 мая, дирижабль с экипажем 16 человек вылетел во вторую

¹⁰ Сейчас называется Северная Земля (до 1926 года — Земля Императора Николая II) — российский архипелаг в Северном Ледовитом океане.

разведку на Землю Николая II. Обратнo на Шпицберген дирижабль полетел через Новую Землю и далее мимо Земли Франца-Иосифа. Полетный путь составил почти 5000 км. 18 мая дирижабль был у фьорда Кингс-Бей. На этот раз полет принес ценные научные результаты. Оказалось, что области на северо-востоке не покрыты материковым льдом, как это показано на многих географических картах, а представляют собой голые скалы. Это было замечено во время полета.

Третий и последний полет дирижабля «Италия» состоялся в среду, 23 мая 1928 года, рис. 16. В 4:28 дирижабль вылетел из фьорда Кингс-Бей, чтобы исполнить свою основную миссию — добраться до Северного полюса. На борту воздушного судна находилось 16 человек и собака. Собака *Titina* была талисманом не только У. Нобиле, но всей Италии. На судно также сели три известных ученых: итальянец Альдо Понтремолли (*Aldo Pontremoli*, основатель кафедры физики в университете Милана), чех Франтишек Бегоунек (*František Běhounek*, директор Института радио в Праге) и швед Финн Мальмгрен (*Finn Malmgren*, геофизик и метеоролог, профессор из университета Упсалы).

Дирижабль взял курс на северо-запад к берегам Гренландии, а оттуда, от Северо-Восточного мыса, направился при сильном попутном ветре к Северному полюсу. Полет проходил нормально. По данным У. Нобиле, в 0 часов 20 минут 24 мая навигационные приборы показали, что дирижабль находится в месте пересечения меридианов. Подлетая к полюсу, Нобиле заплакал и сказал: «Ну, вот мы и прилетели!», рис. 16.

Опустившись до 100 метров, У. Нобель сбросил на полюс итальянский флаг, флаг Милана, небольшой медальон¹¹ с изображением Богоматери покровительницы огня из Форли (итал. *della Vergine del Fuoco di Forlì*), а также дубовый крест, врученный им папой Пием XI. Описав круги, «Италия» начала снижение, чтобы высадить на лед группу ученых согласно плану, но из-за ветра высадка не удалась. От научных наблюдений пришлось отказаться.

Пробыв в районе полюса около двух часов, Нобиле дал команду возвращаться в Кингс-Бей. По пути на юг «Италия» оказалась в зоне сплошного густого тумана. Дирижабль начал интенсивно покрываться льдом. Корка льда достигла толщины 1 см. На беду, усилился встречный ветер, и скорость дирижабля уменьшилась со 100 до 40 км в час.

¹¹ Об этом в письме к Умберто Нобиле от 29 марта 1928 г. просил падре Лучано де Нардис (*Luciano de Nardis*) из Форли, который при этом написал, что медальон принесет ему славу в новой экспедиции к вечным льдам. В ответе Нобиле написал: «Все зависит от Бога, если он захочет, чтобы мы пришли к цели, которую выбрали, то придем».

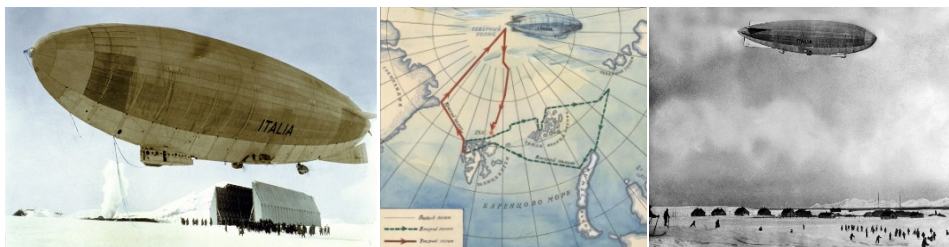


Рис. 16. Отправление экспедиции Нobile на борту дирижабля «Италия» 23 мая 1928 г.
 Карта полетов дирижабля «Италия». Маршрут слева: Шпицберген — Гренландия —
 Северный полюс — место катастрофы (24—25 мая 1928 г.).
 Дирижабль «Италия» в небе Арктики

Fig. 16. Departure of Nobile's expedition aboard the airship Italia, May 23, 1928.
 Flight map of the Italia airship. The route on the left: Spitsbergen – Greenland – North Pole – the
 site of the disaster (May 24–25, 1928). The Italia airship in the Arctic skies

25 мая в 10:27 утра состоялся последний сеанс связи с экспедицией. Дирижабль начал терять высоту. Экипаж не успевает послать сигнал SOS. В 10:33 разрушается оболочка и происходит крушение дирижабля вместе с экспедицией У. Нobile, рис. 17.

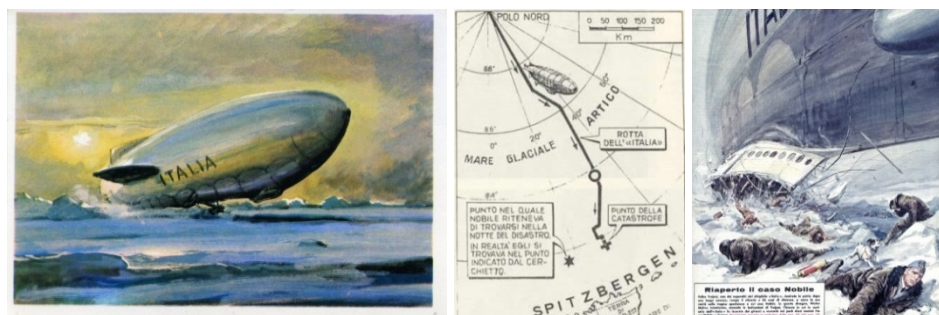


Рис. 17. Крушение дирижабля «Италия» (художник П. Павлинов, 1979 г.)
 и маршрут его полета (25 мая 1928 г.).

Fig. 17. The crash of the airship “Italia” (artist P. Pavlinov, 1979)
 and its flight route (May 25, 1928)

Дирижабль «Италия» разбился об лед Северного Ледовитого океана в 140 милях от предполагаемой точки посадки. Произошел удар о лед кормовой части моторной гондолы; в этот момент мотогондола оторвалась и корма дирижабля взмыла вверх с гондолой управления. Около 50 метров ее тащило по снегу, пока она не оторвалась от воздушного корабля. Нobile и восемь человек, которые в ней находились, были выброшены на лед. Другую часть дирижабля унесло ветром на восток вместе с шестью членами экипажа (Алессандрини, Понтреморли, Ардуино, Чокка, Каратти и Ла-

го — так называемая «группа Алессандрини») и большей частью снаряжения, продовольствия и оборудования.

При катастрофе погиб находившийся в кормовой части мотогондолы моторист Помелла. Оставшиеся получили травмы различной тяжести.

7. Красная палатка

Оставшиеся в живых Нобиле и восемь членов экипажа после первых минут отчаяния и ожидания неминуемой смерти нашли в себе силы бороться за жизнь. Уже через несколько часов после катастрофы радист Бьяджи попытался сначала связаться в условленное время со вспомогательным судном *Città di Milano* передав призыв о помощи и координаты группы: 81° с. ш. и 25° в. д. Но вскоре выяснилось что передатчик был неисправлен и никто их не услышал.

На льдине, на которой они оказались, среди обломков дирижабля удалось найти четырехместную палатку и спальный мешок, а также большое количество продуктов, которых могло хватить на 45 дней. Для жилья была поставлена палатка, а чтобы можно было ее заметить с воздуха, облили ее красной аварийной краской. Отсюда и название, которое облетело планету: «Красная палатка».

Радиоаппаратура почти вся была повреждена, а некоторые радиоустройства были просто раздавлены. Бьяджи сначала нашел и восстановил коротковолновой радиоприемник *Burndep MK IV*. Он оказался почти не поврежден, были разбиты только все радиолампы. К счастью, оказался цел к нему комплект из трех ламп. После этого приемник *Burndep MK IV* заработал, рис. 18.

Среди обломков кабины радист Бьяджи обнаружил целым аварийный коротковолновый радиопередатчик *ONDINA* типа *S*. Поврежденные батареи для него удалось восстановить. Их емкости хватало на 60 часов работы радиопередатчика. Из алюминиевых трубок, взятых из частей разрушенной кабины управления, была построена антенна, а ее противовес положен на лед.

После присоединения внешних устройств к передатчику Бьяджи, согласно заранее установленным правилам радиообмена со вспомогательным судном *Città di Milano*, находившимся в районе Шпицбергена, каждые 55 минут стал передавать радиотелеграфный сигнал бедствия *SOS* на волне 33 м. Попытка выйти на связь не увенчалась успехом. То же повторилось 27 и 28 мая. Позже, выяснилось, что радисты судна занимались отправкой личных телеграмм, и поэтому не делали попыток поймать сигнал передатчика экспедиции.



Рис. 18. Радист Джузеппе Бьяджи с радиоприемником *Burndept MK IV* на льдине (Май 1928 г.). 12 июля 1928 года. Бьяджи на паковом льду со своей огромной «*ONDINA*» (на фото слева в углу) перед посадкой на ледокол «Красин». Легенда Арктики — ледокол «Красин». Художник Джованни Парлато (2016 г.)¹²

Fig. 18. Radio operator Giuseppe Biagi with a Burndept MK IV radio receiver on an ice floe (May 1928). July 12, 1928. Biagi on pack ice with his huge “ONDINA” (in the photo on the left in the corner) before boarding the icebreaker “Krasin”. Arctic Legend: Icebreaker Krasin. Artist: Giovanni Parlato (2016)¹²

Радиостанции многих стран мира круглосуточно прослушивали радиоэфир, но радиосигнал от радиопередатчика *ONDINA* был настолько слабый, что был недоступен для приема. Мировое сообщество было в шоке, никто не знал, где искать экспедицию. Однако, невзирая, на это, в разных странах мира были организованы экспедиции по поиску экипажа «Италия», рис. 19. В поисках приняло участие, по зарубежным источникам, более 1,5 тысяч человек из шести стран, при поддержке 16 кораблей и 22 самолетов!



Рис. 19. Итальянская почтовая открытка, выпущенная к годовщине полета дирижабля «Италия», с отражением усилий мирового сообщества по спасению членов экспедиции У. Нобиле из «Красной палатки» (2008 г.). Постер к фильму «Красная палатка».

Fig. 19. Italian postcard issued for the anniversary of the flight of the airship “Italia”, reflecting the efforts of the international community to rescue the members of U. Nobile’s expedition from the “Red Tent” (2008). Poster for the film “The Red Tent”

8. Помощь СССР в спасении экспедиции Нобиле

В Советском Союзе, узнав о трагической судьбе итальянского дирижабля, в газетах развернулась активная кампания по отправке советских

¹² Лепский Ю. Прогулка по улице Бабушкина.

ледоколов на спасение команды «Италии». Главным «запевалой» в этой кампании, без согласования с партией ВКП(б), по своей инициативе был и. о. главного редактора газеты «Известия» Иван Михайлович Гронский¹³ (1894—1985). Гронский недавно вернулся из командировки в Германию и еще не знал о решении Политбюро ВКП(б) не посылать ледоколы. Руководство страны не спешило включаться в организацию спасательной экспедиции, так как цена вопроса была довольно высока для бюджета страны (спасательная экспедиция в итоге обошлась в 4 млн рублей золотом)¹⁴. В это время был принят первый пятилетний план развития народного хозяйства СССР. Гронский был на «ты» с вождем и имел у себя дома телефон прямой связи с кремлевской квартирой Сталина. Он позвонил по «вертушке» Сталину и сообщил, что не мог знать о решении Политбюро.¹⁵ Генсек разговаривал с Гронским прохладно. Ожидалось взыскание.

Самоуправство Гронского вызвало недовольство Сталина. Он невольно пошел против решения ЦК и СНК экономить валюту, «связал кампанией» партию и правительство, которые уже не могли уклониться от активных действий.¹⁶

Однако после публикаций «Известий» руководителю СССР И. Сталину ничего не оставалось, как снарядить для помощи ледоколы «Красин» и «Малыгин». Ледоколы в течение трех дней вышли из сухих доков и направились на поиски экспедиции. Источником эксклюзивной информации стали корреспонденты «Известий», которые были аккредитованы на ледоколах.

Редакция газеты «Известий» превратилась в пресс-центр, в который устремились зарубежные корреспонденты. Организованная СССР спасательная операция подняла престиж страны в мире. Проводившаяся в это время борьба с классовым врагом несколько отошла на второй план и позволила представить позитивный образ СССР в зарубежной прессе.

29 мая 1928 года в Москве на заседании комиссии по большим перелетам Осоавиахим СССР был создан специальный Комитет помощи дирижаблю «Италия» под председательством заместителя народного наркома по военным и морским делам СССР и председателя общества Осоавиахим СССР Иосифа (Юзефа) Станиславовича Ыншлихта (19[31].12.1879—

¹³ В 1930-е гг. Гронский стал ближайшим доверенным лицом Сталина в области управления культурой и искусством и поначалу руководил работой Оргкомитета Союза Советских писателей (до середины 1933 г., затем на этом посту его сменил Горький) [7]. Сталин именно Гронскому поручил убедить Горького вернуться на родину и возглавить Союз советских писателей [7, с. 68].

¹⁴ Встречали взхлеб. URL: <http://content.izvestia.ru/news/657875> (18.12.2025).

¹⁵ Гронский Е. Между рисками. URL: <http://content.izvestia.ru/news/657644> (18.12.2025).

¹⁶ Орлова Г. Хозяйство полярного письма: медиализация челюскинской робинзонады. URL: https://www.nlobooks.ru/magazines/novoe_literaturnoe_obozrenie/139_nlo_3_2016/article/11967/ (23.12.2025).

29.07.1938). Все спасательные мероприятия в СССР проходили под руководством Комитета помощи дирижаблю «Италия». Был создан единый центр радиосвязи для руководства и координирования действиями нескольких судов и самолетов. К спасательной операции подключились и другие страны мира. Это была первая по-настоящему крупная международная спасательная операция в истории человечества.

9. Спасение экспедиции

Спасение к экспедиции У. Нобиле неожиданно пришло из России. 3 июня 1928 г., между 20 и 21 часами вечера, в деревне Вознесенье-Вохма Северо-Двинской губернии¹⁷ радиолюбитель Николай Шмидт (31.10.1906—26.08.1942, рис. 20) находился у радиоприемника и прослушивал коротковолновой диапазон волн 30—35 м.

Сильные атмосферные шумы и фединги мешали приему. Слышимость колебалась от Р3 до Р5. Волна все время колебалась в пределах двух метров. Вдруг он услышал в наушниках через атмосферные шумы текст радиogramмы: «ITALI... NOBILI... FRAN... SOS... SOS... SOS... TERRI TENO ЕНН». Текст непрерывно повторялся. Это происходило в течение 3 минут. Шмидт принял сигнал бедствия от радиопередатчика *ONDINA*.

Николай Шмидт¹⁸ был членом ОДР (Общество друзей радио СССР) и поэтому отослал телеграмму ее председателю: «Москва. ОДР. Мукомлю. Италия. Нобиле. Шмидт. 3.VI.28». Полученные сведения об экспедиции Нобиле были переданы Комитету помощи «Италии» при Осоавиахиме, а оттуда через Совнарком в итальянское консульство. На следующий день, 4 июня, эта информация попала в Рим, непосредственно, помощнику секретаря министерства военно-морского флота Италии.

6 июня обитатели лагеря на льдине, слушая радиостанцию *San Paolo (IDO)* в Риме на короткой волне 32 метра, узнали, что их сигнал зафиксирован, а также о том, что русский радиолюбитель Николай Шмидт получил их сигнал бедствия, и эта информация дошла до итальянского правительства. После этого Бьяджи передал в эфир точные координаты лагеря, и группа перестала сомневаться в том, будет ли оказана ей помощь.

¹⁷ Северо-Двинская губерния была образована постановлением НКВД РСФСР от 24 июля 1918 года из 5 восточных уездов Вологодской губернии (Великоустюжский, Никольский, Сольвычегодский, Усть-Сысольский и Яренский) с центром в город Великий Устюг. Просуществовала до 1929 г.

¹⁸ Николай Шмидт после приема *SOS*, стал известен на весь мир. Как участник спасательной экспедиции, награжден именными золотыми часами, памятным знаком Центрального совета ОСОАВИАХИМ и грамотой Общества друзей радио. Благодаря этому сделал карьеру. Сначала работал в Наркомате связи СССР (г. Москва), а потом, до конца жизни, в Наркомате связи Узбекской ССР (г. Ташкент). В декабре 1941 года был арестован по обвинению в антисоветской агитации и шпионаже. За это его осудили и расстреляли в 1942 году. Посмертно реабилитирован 12 августа 1984 года.

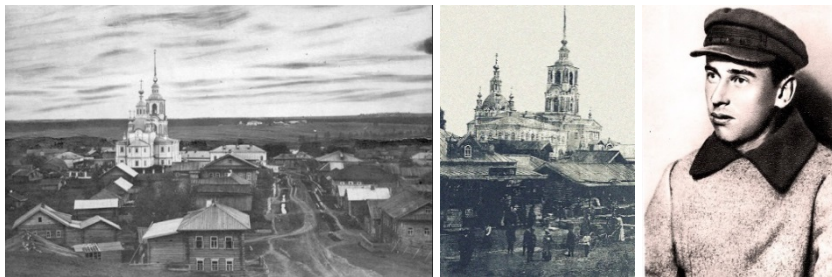


Рис. 20. Вид село Вознесение на реке Вохма, называвшееся по имени построенной здесь церкви во имя Вознесения Христа (1910 г.)¹⁹. Николай Рейнгольдович Шмидт (1928 г.).

Fig. 20. View of the village of Voznesenie on the Vokhma River, named after the church built here in the name of the Ascension of Christ (1910)¹⁸. Nikolai Reinholdovich Schmidt (1928)

Радиопередатчик *ONDINA* явился «чудодейственным ящиком», который спас выживших участников экспедиции Нобиле. Один из спасенных, радист Бьяджи позже вспоминал [5]: «...я никогда не представлял, что этой скромной коробочке суждено сыграть такую важную роль и занять такое историческое место в нашем трагическом приключении. Это было поистине наше провидение. Благословен он и благословен Гульельмо Маркони, наш титульный бог и благодетельный гений человечества».

Результатом экспедиции У. Нобиле стало то, что половина экипажа погибла, а остальных членов экспедиции спасли моряки советского ледокола «Красин», рис. 21. Истинная причина катастрофы дирижабля «Италия» так и осталась неустановленной, есть лишь предположения. Наиболее вероятные причины: неблагоприятные погодные условия и сильная утечка газа через незакрытый клапан или трещину в оболочке дирижабля.



Рис. 21. Ледокол «Красин». Знак участника спасательной экспедиции на ледоколе «Красин» и радист Джузеппе Бьяджи на его борту. Справа от него передатчик *ONDINA* типа *S* и приемник *Burndept MK IV*. 12.07.1928 г.

Fig. 21. Icebreaker “Krasin”. A participant’s badge for the rescue expedition on the icebreaker Krasin and radio operator Giuseppe Biagi on board. To the right is an *ONDINA* type *S* transmitter and a *Burndept MK IV* receiver, dated July 12, 1928

¹⁹ Поселок Вохма. URL: <https://kostromka.ru/belorukov/derevni/vohma/54.php> (20.12.2025).

Что же касается приемника, на который Н. Шмидт принял сигнал *SOS* экспедиции У. Нобиле, то о своей радио-конструкции он рассказал в статье «Огонька» [8]: «За период с 1924 г. мной было сконструировано множество различных приемников, главным образом с двухсеточными лампами низких анодных напряжений (негде было достать высоковольтные анодные батареи). Последний вариант сконструированного мной приемника представлял собой комбинацию немецкой передвижки для КВ и рефлекса. На этом одноламповом приемнике мной и был принят *SOS* с «Италии»».

Схема приемника Н. Шмидта осталась неизвестной. Можно только предположить, что в приемнике скорее всего была использована советская двухсеточная радиолампа типа «Микро-ДС», выпущенная в 1926 году Трестом заводов слабого тока в Ленинграде. Стоимость лампы составляла 10 руб., что на тот период времени была достаточно высокой. Для сравнения: размер пособия по безработице составлял: в 1924/25 гг. — 8 руб., в 1926/27 гг. — 15 руб. Простота схемы радиоприемника на двухсеточной лампе и нечастая смена анодной батареи в процессе его работы в значительной мере окупали затраты на ее покупку.

Предполагаемая схема коротковолнового радиоприемника на лампе типа «Микро-ДС», на который принял сигнал *SOS* от экспедиции Нобиле 3 июня 1928 г. Николай Шмидт, приведена на рис. 22 [9].

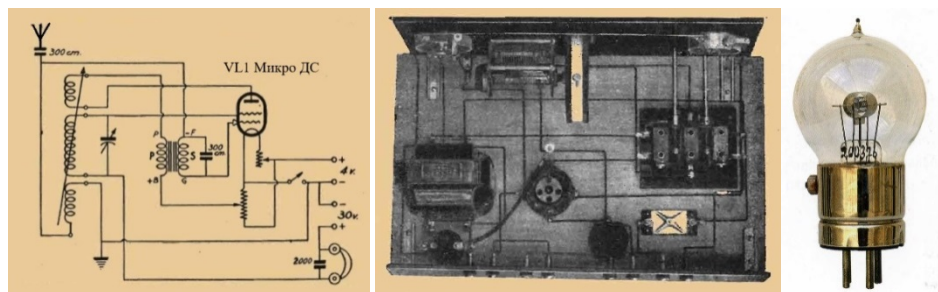


Рис. 22. Предполагаемая конструкция коротковолнового радиоприемника на лампе типа «Микро-ДС», на который принял сигнал *SOS* от экспедиции Нобиле 3 июня 1928 г. радиолюбитель Николай Шмидт: принципиальная и монтажная схемы. Общий вид приемно-усилительной радиолампы типа «Микро-ДС» производства Ленинградского электровакуумного завода (1926 г.).

Fig. 22. Proposed design of a shortwave radio receiver using a “Микро-ДС” vacuum tube, which was used by radio amateur Nikolai Schmidt to receive the *SOS* signal from the Nobile expedition on June 3, 1928: schematic and wiring diagrams. General appearance of the “Микро-ДС” vacuum tube receiver and amplifier manufactured by the Leningrad Electrovacuum Plant (1926)

Лампа МДС-ДС имела торированную нить накала с напряжением питания 3,6 В при токе 0,065А. Анодное напряжение лампы составляло

около 6—10 В. Габариты лампы: $D = 55$ мм, $l = 105$ мм. Анодная батарея радиоприемника подбиралась экспериментально, обычно, использовалось 2 или 3 батареи для карманного фонаря, а для накала — одна батарея. Настройка приемника велась тщательно и «осторожно» изменением расстояния между катушкой обратной связи и катушкой колебательного контура и «тонко» изменением связи с антенной. Управление генерацией и получение наибольшей чувствительности приемника достигалось изменением накала и «тонко» изменением связи с антенной.

На один день позже Николая Шмидта, 4 июня 1928 г., сигналы SOS из лагеря Нобиле услышал на профессиональной радиостанции в Москве заместитель председателя Общества друзей радио СССР Иван Петрович Палкин [10]. В это время он по заданию газеты «Вечерняя Москва» круглосуточно прослушивал радиосигналы в эфире, пытаясь узнать местонахождение экспедиции Нобиле. В этот день сильные радиопомехи не позволили получить нужную информацию. На следующий день в 20 часов 58 минут Палкин вновь услышал морзянку итальянского радиста, но без сигналов SOS. После прослушивания эфира он позвонил по городскому телефону на квартиру заместителя Наркомпочтеля А. М. Любовичу. Любович, связался с операторами специального приемно-контрольного пункта, находившегося в помещении ОДР СССР на Варварке (ныне улица Степана Разина), и сообщил им длину волны, на которой работал радист экспедиции Нобиле. Через четыре дня сигналы потерпевших услышали и на корабле «*Città di Milano*».

10. Заключение

Весьма сдержанное отношение СССР к экспедиции на дирижабле «Италия» связано с тем, что у экспедиции, кроме научного подтекста, был и политический. Об этом мало говорят или вообще стараются не вспоминать. Подготовка экспедиция У. Нобиле совпала с периодом ощутимых результатов экономических реформ, проводимых Б. Муссолини. Для поддержания своего имиджа ему нужны были громкие проекты, желательно мирового масштаба. Одним из таких проект стал полет дирижабля «Италия» к Северному полюсу. Дуче сначала хотел, чтобы дирижабль совершил рейс в Латинскую Америку, но потом под влиянием У. Нобиле склонился к полету в Арктику.

В итальянской фашистской прессе того периода времени мелькали сообщения о намерениях правительства Муссолини аннексировать Землю

Франца-Иосифа²⁰. Такие сообщения очень насторожили советскую общественность, так как и до этого предпринимались попытки захвата арктических владений СССР, в частности, островов Врангеля и Геральд,²¹ со стороны других государств.

Итальянская печать в данном случае в качестве обоснования такой аннексии, приводила такие странные аргументы. Раз этот архипелаг был открыт и впервые посещен австро-венгерской экспедицией К. Вейпрехта и Ю. Пайера, которая снаряжалась в Триесте, а этот город по Сан-Жерменскому договору сейчас принадлежит Италии, то, следовательно, к ней же автоматически переходят права и на Землю Франца-Иосифа. Катастрофа дирижабля «Италия» поставила крест на притязаниях дуче.

Авария дирижабля «Италия» спровоцировала не только самую масштабную на тот момент спасательную операцию, но и вызвала национальное негодование в некоторых странах, в частности, в Норвегии, когда национальный герой Руаль Амундсен пропал в море по пути из Норвегии на Шпицберген. Амундсен летел на север, чтобы помочь найти своего старого товарища. С его исчезновением отношение норвежцев к Нобиле и его соотечественникам-итальянцам ухудшилось. Это недоброжелательное отношение усилилось и после того, как Нобиле благополучно выбрался из льда через месяц. Норвежская газета «Friheten» назвала Нобиле «фашистским дураком, напичканным золотыми галлонами», чья «безумная затея стала причиной всей трагедии»²². Теперь Нобиле был в безопасности, а Амундсен исчез навсегда. Когда потерпевшие кораблекрушение итальянцы прибыли в норвежский прибрежный город Нарвик, чтобы сесть на ожидающий их поезд в Италию, местные жители встретили их враждебно. Почему обычно дружелюбные и спокойные норвежцы вдруг стали такими враждебными и недоброжелательными?

Список литературы

1. Сиколо К. Умберто Нобиле и «Италия» на Северном полюсе. Политика и история по неопубликованным документам 1928—1978 гг. [пер. с итал. Н. Колесова]. — Москва: Паулсен, 2024. С. 3—4.
2. Grienti V. Ondina 33 // Notiziario Della Marina. 2024. P. 62.

²⁰ Ни одна из держав мира формально не предъявляла территориальных претензий на Землю Франца-Иосифа вплоть до 1926 г., когда декретом ЦИК она была объявлена включенной в состав СССР. 29 июля 1929 г. Отто Шмидт в ходе полярной экспедиции на ледоколе «Георгий Седов» водрузил на острове Гукера советский флаг и объявил Землю Франца-Иосифа частью СССР. Сейчас это часть полярных территорий России, которая входит в состав Приморского района Архангельской области.

²¹ Остров Геральд находится в Чукотском море, в 70 км к востоку от острова Врангеля.

²² Friheten, juni 8, 1928.

3. Пестриков В. М. Радио подробности экспедиции Нобиле // Радиолюбби. 2013. № 2. С. 2—9.
4. Bernard H. A 3-Circuit Tuner that You Can Log // Radio World. November 8, 1924. Vol. 6, no. 7. P. 6.
5. Biagi racconta // Elettronica Viva. Aprile 1984. No. 44. P. 84.
6. Lusuriello B. La tenda Rossa Di Umberto Nobile e il miracolo della radio // La radio. 2025. No. 3. P. 28.
7. Ариас-Вихиль М. А. Об истории создания термина «социалистический реализм» и подготовке Первого съезда советских писателей (стенограмма беседы И. М. Гронского с сотрудниками архива А. М. Горького). М. : ИМЛИ им. А. М. Горького АН СССР, 2019. Вып. 1. С. 66—114.
8. Борисов Е. Тот, кто услышал «SOS» // Огонёк. 21 октября 1928 г. № 43. С. 14.
9. IL MONOREFLEX // La Radio. ANNO II 1. Gennaio 1933-XI. N. 16. P. 1—4.
10. Григорьева Н. Перед лицом радиотелеграфного мира // Радио. 1978. № 6. С. 9—10.

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.

The Role of Radio Vacuum Technology in the Fate of General Nobile's Expedition

V. M. Pestrikov

*St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st., St. Petersburg, 191119, Russian Federation*

pvm205@yandex.ru

Received: December 30, 2025

Peer-reviewed: January 20, 2026

Accepted: January 20, 2026

Abstract: *This article examines the vacuum tube technologies that supported Umberto Nobile's expedition during its flight aboard the airship Italia to the North Pole. It focuses on the stages of the airship's flight, from its organization to the moment of the disaster. The operation of the vacuum tube equipment used during the flight and at critical moments during the expedition's life is examined and analyzed. The establishment of radio contact between Soviet radio amateur Nikolai Schmidt and the victims is covered in detail. The USSR's organization of assistance in rescuing expedition members who found themselves in trouble was noted.*

Keywords: *airship, Amundsen, North Pole, Umberto Nobile, Italia airship, Italia disaster, Red Tent, USSR, rescue of the Italia crew, Nikolai Schmidt, icebreaker Krasin.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "The Role of Radio Vacuum Technology in the Fate of General Nobile's Expedition," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 659–686, 2026, doi: 10.21227/qpgb-z505. (In Russ.).

References

- [1] C. Siculo, *Umberto Nobile and "Italia" at the North Pole. Politics and History Based on Unpublished Documents 1928–1978*, Moscow: Paulsen, pp. 3–4, 2024. (In Russ.).
- [2] V. Grienti, "Ondina 33," *Notiziario Della Marina*, p. 62, 2024.
- [3] V. M. Pestrikov, "Radio Details of the Nobile Expedition," *Radiohobby*, no. 2, pp. 2–9, 2013. (In Russ.).
- [4] H. Bernard, "A 3-Circuit Tuner that You Can Log," *Radio World*, November 8, vol. 6, no. 7, p. 6, 1924.
- [5] "Biagi racconta," *Elettronica Viva*, no. 44, p. 84, Aprile 1984.
- [6] B. Lusuriello, "The Tenda Rossa Di Umberto Nobile e il Miracolouse della Radio," *La Radio*, no. 3, p. 28, 2025.
- [7] M. A. Arias-Vigil, *On the History of the Creation of the Term 'Socialist Realism' and the Preparation of the First Congress of Soviet Writers (transcript of a conversation between I. M. Gronsky and staff of the A. M. Gorky Archive)*, Moscow: A. M. Gorky Institute of World Literature, USSR Academy of Sciences, iss. 1, pp. 66–114, 2019. (In Russ.).
- [8] E. Borisov, "The One Who Heard "SOS"," *Ogonyok*, no. 43, p. 14, Oct. 21, 1928. (In Russ.).

[9] “IL MONOREFLEX,” *La Radio*, ANNO II 1, Gennaio 1933-XI, no. 16, pp. 1–4, 1933.

[10] N. Grigorieva, “Facing the Radiotelegraph World,” *Radio*, no. 6, pp. 9–10, 1978. (In Russ.).

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.

История создания автоматизированных систем управления воздушным движением в НИИ-33 — ВНИИРА (1958—1994 гг.)

Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
ppyermolov@sevsu.ru

Получено: 14 марта 2026 г.

Отрецензировано: 15 апреля 2026 г.

Принято к публикации: 15 апреля 2026 г.

Аннотация: В статье представлена история создания автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) в НИИ-33 — ВНИИРА за период 1958—1994 гг. Рассмотрены начало развития автоматизированных систем УВД (АС УВД «Марка»), отечественная автоматизированная система УВД «Старт», аэродромно-узловая автоматизированная система УВД с повышенным уровнем автоматизации «Спектр» («Старт-2») и интегрированная аэродромно-районная АС УВД «Синтез». Визуализация результатов настоящего исследования проведена с использованием методологии «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ), основанной на трех последовательных уровнях преобразования контента.

Ключевые слова: НИИ-33, Всероссийский НИИ радиоаппаратуры (ВНИИРА), автоматизированные системы управления воздушным движением (АС УВД) «Марка», АС УВД «Старт», АС УВД «Спектр», АС УВД «Синтез», визуализация, методология «компендиум — таблица — инфографика».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слезкин Г. В. История создания автоматизированных систем управления воздушным движением в НИИ-33 — ВНИИРА (1958—1994 гг.) // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 4. С. 687—715.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. История создания автоматизированных систем управления воздушным движением в НИИ-33 — ВНИИРА (1958—1994 гг.) / П. П. Ермолов, В. И. Катеринчук, Г. В. Слезкин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 687—715.

1. Введение

НИИ-33 — ВНИИРА — ведущий научно-технический центр по созданию радиотехнических средств и систем навигации, посадки и управления воздушным движением. Работы, выполненные коллективом ученых и специалистов института, оказали существенное влияние на повышение эффективности и безопасности воздушного движения в СССР и Российской Федерации. Ранее история создания радиомаячной системы инструментальной посадки 2-сантиметрового диапазона «Вымпел», а также хронология успешной автоматической посадки орбитального корабля «Буран» 15 ноября 1988 г. была отражена в [1]. В [2] рассмотрена научно-исследовательская деятельность главного конструктора направления интегрированных систем навигации и посадки в 1975—2025 гг.

История создания в НИИ-33 — ВНИИРА радиотехнических систем посадки самолетов (в качестве примера, иллюстрирующего использование методологии «компендиум — таблица — инфографика», основанной на трех последовательных уровнях преобразования контента) приведена в статье [3]. В статье [4] с использованием этой же методологии приведена история создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА. В настоящей статье также с использованием этой же методологии приведена история создания автоматизированных систем управления воздушным движением в НИИ-33 — ВНИИРА.

Проведенное исследование (как и предыдущие) основывается на материалах рукописи [5].

2. АС УВД «Марка»

Рост объема перевозок на воздушном транспорте приводит к увеличению интенсивности воздушного движения, характеризующейся числом самолетов, одновременно находящихся в единице объема воздушного пространства. Неравномерность распределения потоков самолетов в течение года и суток приводит в некоторые периоды к значительному увеличению плотности воздушного движения в отдельных воздушных зонах. В особенности это относится к районам аэродромов, обслуживающих крупные промышленные и административные центры страны. В неавтоматизированных аэродромных системах УВД, базирующихся на отображении лишь радиолокационной координатной информации, диспетчеры УВД должны собирать и непрерывно запоминать информацию, необходимую для принятия решений по УВД, поскольку процесс УВД связан с безопас-

ностью полетов. Диспетчеры постоянно подвергаются высоким нервно-психологическим нагрузкам. Попытки решить задачу снижения нагрузки диспетчеров в условиях высокой интенсивности полетов путем деления воздушного пространства на большое количество секторов управления для уменьшения числа самолетов, одновременно сопровождаемых диспетчером, потерпели неудачу, так как в существующих неавтоматизированных системах УВД весьма сложной задачей является согласование и передача управления самолетом диспетчеру смежного сектора управления. Возрастающий при этом объем работы по координации действий диспетчеров полностью нейтрализует эффект от разделения секторов и даже приводит к увеличению нагрузки. Увеличение рабочей нагрузки диспетчеров района аэродрома сверх определенного предела приводит вследствие дефицита времени к неполному выполнению правил по управлению полетами. Это, в свою очередь, может привести к ошибкам и возникновению опасных ситуаций. Требование обеспечения безопасности полетов приводит к увеличению задержек самолетов в воздухе.

В связи с этим была поставлена задача разработки автоматизированной радиолокационной системы УВД — в 1958 г. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров была задана программа развития средств навигации, посадки и УВД — «Полет-1». Составной частью этой программы явилась разработка аэродромной радиолокационной АС УВД «Марка», предназначенной для УВД в секторах подхода, круга и посадки. АС УВД «Марка» в 1962 г. была предъявлена на Государственные испытания. Система прошла испытания в а/п «Внуково» и в целом соответствовала Техническому заданию с замечаниями, но Решением комиссии для опытной эксплуатации рекомендована не была.

АС УВД «Марка» имела следующие серьезные недостатки:

— отображение аналоговой и цифровой информации о воздушной обстановке выполнялось на различных индикаторах;

— размеры индикаторов, на которых отображалась аналоговая и цифровая информация, были различны, что затрудняло идентификацию радиолокационных отметок;

— возможность потери автосопровождения и перепутывания формуляров сопровождения в ситуациях наложения отметок ВС, в особенности при маневрировании ВС, поскольку обработка р/л информации и сопровождение ВС велись без учета третьей координаты — высоты (вводилась вручную только для отображения на экране).

Несмотря на наличие указанных недостатков, АС УВД «Марка» опережала по времени возможности реализации такого рода систем: от-

существовали ВС, оборудованные ответчиками ВРЛ, уровень развития элементной базы был невысок, отечественная промышленность не выпускала пригодных для использования в системе вычислительных средств и средств отображения, что дополнялось недостаточным уровнем владения оперативно-тактическими проблемами автоматизации как разработчиком, так и специалистами Заказчика.

Таким образом, несмотря на то, что первая АС УВД «Марка» в основных чертах соответствовала ТЗ и рекомендациям Заказчика — к внедрению в эксплуатацию она не была принята. Однако негативный результат разработки и проверки в реальной обстановке АС УВД «Марка» не пропал даром: он послужил богатым опытом для последующей разработки АС УВД «Старт».

3. АС УВД «Старт»

Неудачная первая попытка создания АС УВД заставила разработчиков ВНИИРА более подробно вникнуть в процессы УВД. Проведенный на начальных этапах разработки анализ показал, что на пути создания АС УВД имеется ряд принципиальных трудностей, вытекающих из необходимости удовлетворения требований, вызванных спецификой решаемых системами УВД задач и условиями их работы.

Было установлено, что основными проблемами создания АС УВД являются:

- обеспечение оперативной эффективности системы;
- обеспечение системой непрерывности процесса управления.

Для эффективного разрешения указанных проблемных трудностей, в условиях отсутствия приемлемых прототипов или информации о них, требовалось решить ряд принципиально новых научных и технических системных задач.

Для преодоления первой проблемы необходимо было эффективно решить задачи взаимодействия диспетчерского персонала с технической частью системы. При этом проблема состояла не только в удовлетворении рекомендаций инженерной психологии и эргономики при создании средств представления и ввода информации, а также диспетчерских пультов системы, а, главным образом, в отыскании таких функций, подлежащих выполнению техническими средствами и математическим обеспечением системы, и такой их реализации, которые в совокупности обеспечили бы существенное превышение полезного эффекта, даваемого технической частью системы, над той дополнительной нагрузкой, которую система создает для диспетчерского персонала.

Второе проблемное требование вытекает из непрерывности процесса воздушного движения, требующего работы системы по 24 часа в сутки в течение 365 дней в году. Разработчикам АС УВД «Старт» удалось найти и реализовать совокупность решений, обеспечивающих удовлетворение указанных требований.

3.1. Обеспечение оперативной эффективности АС УВД «Старт»

Для разрешения первой проблемы — обеспечения оперативной эффективности системы — при создании АС УВД «Старт» прежде всего, предстояло определить, что надо автоматизировать, затем — каким образом это осуществить. С этой целью перед разработкой новой аэродромной АС УВД «Старт» был проведен анализ существующих неавтоматизированных систем УВД.

Для повышения пропускной способности аэропортов и обеспечения безопасности полетов в условиях высокой интенсивности воздушного движения прежде всего целесообразно автоматизировать процессы получения и представления диспетчерам необходимой для УВД информации, что увеличит бюджет времени на анализ воздушной обстановки и разработку решений и, кроме того, повысит их оперативность и качество за счет представления диспетчером не только исходной информации, но и информации более высокого ранга, получаемой в результате ее автоматизированной обработки.

Исходя из этого, в АС УВД «Старт» для автоматизации были приняты следующие процессы:

- сбора, обработки и отображения информации об элементах текущих планов полета самолетов до их входа в зону управления;
- получения, обработки и совмещенного отображения необходимой информации по данным вторичного и первичного диспетчерских радиолокаторов и др.;
- взаимодействия между диспетчерами смежных секторов управления.

При решении вопросов автоматизации указанных процессов разработчики системы «Старт» исходили из того, что функции анализа воздушной обстановки и принятия решений по управлению выполняет диспетчерский персонал, являющийся центральным звеном системы, и, следовательно, для обеспечения высокой оперативной эффективности системы необходимо наилучшим образом реализовать основные связующие звенья отображения и ввода информации между автоматической частью системы и человеком, использующим результаты ее работы.

Основные решения, реализованные в АС УВД «Старт» для обеспечения высокой оперативной эффективности, состояли в следующем.

1. В АС УВД «Старт» вся необходимая для управления воздушным движением информация отображается на яркостных совмещенных план-индикаторах (СПИ), которые обеспечивают отображение как координатной радиолокационной информации о местоположении и движении самолетов, так и автоматически связываемой с отметками самолетов необходимой для УВД информации в виде знаковых формуляров сопровождения (ФС). Кроме того, на экранах СПИ отображается статическая графическая координатная информация о структуре воздушной зоны, динамическая графическая информация (векторы упреждения, положения самолетов, линии пеленга) и другая необходимая информация в различного вида формулярах.

В АС УВД «Старт» была решена задача автоматизации процесса управления по всем самолетам, независимо от оборудования ответчиком системы вторичной радиолокации. Этого удалось достичь за счет успешного решения задач автоматической первичной обработки сигналов первичного и вторичного радиолокаторов и автоматического сопровождения и идентификации самолетов по сигналам не только вторичного, но и первичного радиолокаторов. Решение этой задачи выгодно отличало АС УВД «Старт» от системы *ARTS-3* (США), обеспечивающей автоматизацию только по оборудованным ответчиками самолетам.

2. Представление информации в яркостном виде обеспечивало работу диспетчерского персонала в условиях нормального внешнего освещения, что создавало комфортные условия и повышало работоспособность диспетчеров УВД.

Кроме того, яркостная форма представления информации с использованием запоминающего прибора обеспечивала отображение информации о траектории движения самолета, что существенно упрощало обнаружение самолетов и определение их параметров движения (маневрирования), а это повышало эффективность управления воздушным движением.

3. Автоматизация процессов обработки и отображения информации об элементах текущих планов полета обеспечивала автоматическое представление на индикаторах диспетчеров каждого сектора управления необходимой информации (места входа, бортового номера самолета, высоты входа, времени входа, аэропорта назначения) в виде буквенно-знаковых таблиц формуляров ожидания, пространственно связанных с точками входа.

При этом формуляры ожидания по прилетающим самолетам распределены по месту входа самолетов в зону управления и упорядочены для

каждой точки по времени входа, а по вылетающим самолетам — упорядочены по аэропортам вылета. Система обеспечивала автоматическое представление диспетчерам необходимой информации об элементах планов полета самолетов даже при взаимодействии с неавтоматизированными системами трассовых центров управления. Это дает возможность диспетчерам, не отрываясь от экрана совмещенного индикатора, принимать решения по самолетам, находящимся в зоне управления, с учетом ожидаемого входного потока, а также с упреждением планировать движение прибывающих в зону управления самолетов и, при необходимости, сглаживать входной поток.

4. На основе автоматизации первичной и вторичной обработки радиолокационной информации как вторичного, так и первичного радиолокаторов автоматизируются процессы представления необходимой информации по самолетам, находящимся в зоне управления системы.

5. Вся имеющаяся в системе информация подвергается автоматической фильтрации, и диспетчеру каждого сектора автоматически выдается только необходимая ему информация, что избавляет от засорения экрана ненужной информацией и облегчает восприятие и анализ воздушной обстановки. При этом каждому диспетчеру, при необходимости, предоставляется возможность быстрого группового или индивидуального просмотра информации по самолетам, управляемым другими диспетчерами.

6. Решением, существенно расширяющим возможности диспетчеров по предварительному обнаружению потенциально конфликтных ситуаций и их разрешению, является выдаваемая системой информация о прогнозируемой воздушной обстановке, представляемая путем отображения на экранах индикаторов векторов упрежденного положения самолетов. Они начинаются в точках текущего местоположения самолетов и оканчиваются в точках, где будут находиться самолеты через заданное время: две или четыре минуты. Представление диспетчерам этой информации в совокупности с основной информацией по идентификации самолетов и их координатам, включая текущие и заданные высоты и режим движения в вертикальной плоскости (тенденция изменения высоты), а также информации о маршруте полета позволяет оперативно произвести оценку бесконфликтности движения, а в случае необходимости принять необходимые меры по предотвращению возникновения конфликтной ситуации.

7. Одна из актуальных задач УВД в условиях высокой интенсивности воздушного движения заключается в упорядочении потока заходящих на посадку самолетов, что необходимо для повышения пропускной способности аэродрома и уменьшения времени пребывания самолетов в воздухе. А это, помимо обеспечения безопасности полетов, дает непосредственно большой экономический эффект.

Для повышения качества упорядочения потока самолетов при заводе в зону посадки, помимо отмеченных выше возможностей, повышающих качество анализа обстановки и принимаемых решений, система обеспечивает отображение графической информации о структуре зоны, соответствующей действующему курсу посадки и содержащей необходимую опорную информацию для оценки относительных длин траекторий отдельных самолетов, а также расчет и представление в формулярах сопровождения информации о путевых скоростях самолетов и векторах упрямленного положения самолетов.

Важнейшей функцией в системах УВД является передача управления воздушного судна из сектора в сектор. В неавтоматизированных системах УВД она представляет весьма сложную задачу. При этом, пользуясь голосовой связью, необходимо обеспечить безошибочную идентификацию отметки передаваемого самолета диспетчером, принимающим управление, и одновременно передать и зафиксировать необходимую дополнительную информацию.

8. В системе «Старт» процесс согласования и передачи управления автоматизирован. При подходе самолета к рубежу передачи управления, по желанию диспетчера или автоматически, передается полный формуляр сопровождения, содержащий всю необходимую информацию. При этом в формуляре сопровождения передаваемого самолета индицируется режим согласования передачи и выдается сигнализация (отображаются символы передающего и принимающего диспетчеров, при этом один из символов мигает). Согласие диспетчера принять самолет с параметрами, отображаемыми в формуляре, фиксируется нажатием соответствующей клавиши на клавиатуре. Таким образом, в системе осуществляется так называемое «молчаливое» согласование и передача управления. Следует отметить, что реализованная в системе процедура согласования и передачи управления не требует одновременных двусторонних действий диспетчеров, что дополнительно повышает эффективность их работы.

9. Система решает ряд вспомогательных задач, повышающих ее эффективность: пересчет текущих высот относительно аэродрома; выработка тенденции движения в вертикальной плоскости; автоматическая сигнализация по ВС, передающим сигналы бедствия; автоматическая фильтрация информации и отображение каждому диспетчеру только необходимой ему информации; автоматическое смещение ФС для предотвращения их наложения; представление информации об аэродромном давлении, высоте пелерехода, текущем времени и др.

10. Пульты диспетчеров подхода, круга и посадки выполнены с учетом требований эргономики и в совокупности с яркостным отображением

информации создают комфортные условия для работы диспетчерского персонала.

11. Для упрощения и ускорения освоения системы диспетчерским персоналом в ней реализованы программы моделирования управляемой воздушной обстановки, обеспечивающие возможность обучения и тренировки диспетчеров и операторов работе на системе методами полунатурного моделирования.

3.2. Обеспечение системой непрерывности процесса управления

Для удовлетворения второму проблемному требованию — обеспечению системой непрерывности процесса управления — необходимо было обеспечить ряд новых прогрессивных решений, основные из которых состоят в следующем:

- выполнено функциональное и аппаратное резервирование всех видов аппаратуры;

- осуществлен автоматический функциональный контроль рабочих и резервных трактов аппаратуры, обеспечивающий автоматическое переключение на резервные;

- обеспечено сопряжение с трассовыми РЛС, выполняющими функции резерва для основного диспетчерского радиолокатора;

- создан двухмашинный вычислительный комплекс с каналом быстрого обмена, обеспечивающий горячее резервирование и автоматический переход на резервную ЭВМ без нарушения непрерывности в выдаче информации;

- реализован программно-логический контроль, обеспечивающий устойчивое функционирование программного комплекса при наличии сбоев в аппаратуре;

- осуществлен автоматический перезапуск в случае останова ЭВМ;

- реализована структура системы с «информационным шунтом», обеспечивающая сохранение на рабочих местах диспетчеров основной информации независимо от работоспособности средств автоматизации.

3.3. Новые задачи, решенные при создании АС УВД «Старт»

Для создания первой автоматизированной системы УВД «Старт» в условиях отсутствия приемлемых прототипов потребовалось решить ряд принципиально новых научно-технических задач. О творческом характере таких решений и их новизне свидетельствует то, что 24 из них признаны изобретениями. Новыми, решенными при создании системы задачами, являются:

1. Достигнута полная автоматизация обработки на основе разработки нового способа автоматической первичной обработки радиолокационных сигналов, при котором в скользящем окне реализуются накопление сигналов в пределах ширины радиолокационного пакета и их суммирование на каждой сигнальной позиции в масштабе реального времени для обнаружения и определения координат пакета, и впервые в мире созданной в АС УВД «Старт» аппаратуры автоматической совместной первичной обработки и объединения информации первичного и вторичного радиолокаторов, обеспечивающей наивысшие параметры обнаружения, точности и помехоустойчивости. Для реализации разработано специализированное гибридное вычислительное устройство с эквивалентной производительностью около 30 млн. операций в секунду.

2. Впервые в мире в аэродромных АС УВД решены задачи полностью автоматической обработки радиолокационной информации вторичного и первичного радиолокаторов и внедрена в эксплуатацию функция автоматического сопровождения и идентификации самолетов, не оборудованных ответчиками, по сигналам первичного радиолокатора. На основе этих решений осуществлена автоматизация процессов УВД по всем самолетам, включая и необорудованные радиолокационными ответчиками, что существенно повысило эффективность системы и безопасность воздушного движения.

3. Для обеспечения непрерывности функционирования АС УВД впервые в мире в АС УВД создан вычислительный комплекс высокой надежности на базе двух специализированных ЭВМ, обеспечивающий за счет канала быстрого обмена и автоматической передачи информации от ведущей (рабочей) ЭВМ в ведомую (резервную) возможность автоматического перехода на резервную ЭВМ с сохранением непрерывности процессов обработки, выдачи и отображения информации.

4. Разработан комплекс специального математического обеспечения, несмотря на скромные вычислительные ресурсы ЭВМ «Аргон-10М», решающий функциональные задачи первого уровня автоматизации и ряд задач второго уровня, автоматического сопровождения по сигналам первичного радиолокатора, выработки и отображения информации об экстраполированном положении самолетов, путевых скоростях и др.

5. Для обеспечения оптимального взаимодействия диспетчерского персонала с техническими средствами УВД впервые решена задача совмещенного на одном экране яркостного отображения аналоговой и цифровой радиолокационной координатной, знаковой и графической информации о воздушной обстановке и структуре зоны, что улучшило воспроизведение информации о текущей и прогнозируемой воздушной обстановке и ее восприятие, обеспечило работу диспетчеров в условиях нормального

внешнего освещения, повысило их работоспособность и, в целом, существенно повысило эффективность системы УВД. Это достигнуто за счет разработки нового высокоинформативного параллельного телевизионно-знакового способа совмещенного отображения. Для его реализации разработана специальная знаковая электронно-лучевая трубка.

6. С целью повышения оперативной эффективности системы реализованы эффективные средства ввода информации. Это достигнуто за счет минимизации нагрузки на диспетчеров УВД по вводу в систему информации о принимаемых диспетчерами решениях. Для этого разработана и реализована эффективная пооперационная технология, состоящая из совокупности более простых для выполнения операций, особенно часто повторяемых (обращение к объектам, ввод задаваемых высот, передача управления и др.), что обеспечило существенные преимущества в оперативной эффективности системы по сравнению с зарубежными системами *APTC-3* и *TERCAS*.

7. Для повышения качества работы диспетчерского персонала и ускорения ввода систем в эксплуатацию впервые в мире в аэродромных АС УВД реализована управляемая модель воздушной обстановки, обеспечивающая обучение и тренировку диспетчерского персонала.

8. На основе ряда принятых оригинальных решений системы созданы базовые конструкции наземной аппаратуры третьего поколения, принятые в качестве стандартных. Высокая степень стандартизации и унификации аппаратуры, ее технологичность в производстве и возможность изготовления прогрессивными технологическими методами обеспечили в короткие сроки освоение серийного производства и выпуск систем.

9. Для обеспечения эффективной разработки системы «Старт» решены задачи по созданию базы и проведению разработки системы прогрессивными методами с использованием полунатурного моделирования. С этой целью при разработке АС УВД «Старт» созданы модель управляемой воздушной обстановки на базе универсальной ЭВМ и уникальные комплексы полунатурного моделирования, включающие указанную модель и наладочный стенд системы. Для ускорения и повышения качества разработки специального математического обеспечения была создана автоматизированная система программирования для специализированной ЭВМ, используемой в вычислительном комплексе системы, которая обеспечила автоматизацию разработки программ во всех фазах, включая этап выпуска документации. В итоге впервые в мире создана аэродромная АС УВД, решающая по классификации стран — членов СЭВ задачи 1-го и 2-го уровней автоматизации, при разработке которой найдена и реализована совокупность решений по составу, уровню автоматизации и методам решения функциональных задач УВД и по взаимодействию диспетчеров с техниче-

скими средствами в большой биотехнической системе, как в части состава и формы представления необходимой для эффективного УВД информации, так и по вводу в систему информации о принимаемых решениях.

В итоге впервые в мире создана автоматизированная система, не имевшая аналога по уровню надежности ($T_0 = 18000$ часов) и обеспечивающая практически непрерывное функционирование.

3.4. Основные инструментальные характеристики системы

Количество одновременно сопровождаемых самолетов — 36.

Максимальное количество различных формуляров, отображаемых на СПИ системы — 63.

Количество каналов преобразования радиолокационной информации обзорных диспетчерских РЛС и совмещенного отображения информации на СПИ в зонах подхода и круга — 8.

Количество трактов СПИ, обеспечивающих отображение различной знаковой информации — 8.

Количество каналов преобразования и совмещенного отображения информации посадочной РЛС — 2 и 6.

Количество одновременно сопровождаемых самолетов в зоне посадки — 2.

Количество секторов управления (подхода, круга и посадки) — 4.

Обеспечена возможность увеличения инструментальной емкости системы:

— количества секторов управления до 7 модульным наращиванием системы;

— количества секторов управления до 13 и количества одновременно сопровождаемых самолетов до 72 дублированием комплектов оборудования.

3.5. Основные результаты внедрения системы в эксплуатацию

С 1977 по 1986 гг. выпущено 18 комплектов серийных АС УВД «Старт». Системы были установлены и введены в эксплуатацию в 14 аэропортах с интенсивным воздушным движением (Ленинград, Пулково, Ростов-на-Дону, Сочи, Куйбышев, Симферополь, Краснодар, Хабаровск, Ереван, Новосибирск, Волгоград, Иркутск, Красноярск, Одесса, Жуковский) и в четырех учебных заведениях (в городах Ленинград, Киев, Рига, Кировоград).

Система «Старт» продемонстрировала продолжительную жизнеспособность. К апрелю 1996 г. в эксплуатации оставались все серийные комплекты системы (был заменен на систему следующего поколения «Спектр» только опытный образец системы «Старт», наработавший 30 тыс. часов в а/п Пулково). При этом наработка первого серийного комплекта в а/п Ростов-на-Дону достигла 145 тыс. час. и более чем в 2,5 раза превысила назначенный технический ресурс.

Итоги создания и внедрения в эксплуатацию АС УВД «Старт»

1. Созданием и внедрением первой отечественной АС УВД «Старт» решена народно-хозяйственная проблема государственной важности, состоящая в обеспечении безопасности воздушного движения, повышении пропускной способности аэропортов и регулярности полетов, что обеспечивает дальнейшее развитие воздушного транспорта.

2. Внедрение системы дает большой экономический эффект, так как:

— значительно повышает безопасность полетов;

— повышает пропускную способность аэропортов с высокой интенсивностью полетов в 1,6 раза, поднимая ее до предельной пропускной способности взлетно-посадочных полос;

— существенно повышает экономичность воздушного движения, сокращая время пребывания самолетов в воздушном пространстве аэродромных районов на 15—20 %;

— увеличивает производительность диспетчеров УВД в 1,6 раза. Годовой экономический эффект на одну систему, получаемый от внедрения ее в аэропортах с высокой интенсивностью полетов только за счет сокращения времени пребывания самолетов в воздухе составил 2,5 млн. руб.

3. Создание системы и освоение в короткие сроки ее серийного производства обеспечило возможность удовлетворения потребностей страны в автоматизации УВД в районах аэропортов и полностью исключило необходимость затрат десятков и сотен миллионов валютных рублей на закупку автоматизированных систем УВД за рубежом.

За разработку, освоение серийного производства и внедрение в эксплуатацию АС УВД «Старт» присуждена Государственная премия в области науки и техники за 1979 г.

4. Аэродромно-узловая автоматизированная система УВД с повышенным уровнем автоматизации «Спектр» («Старт-2»)

Успешное создание автоматизированных систем УВД представляет собой научно-техническую и организационную проблему высокой сложности. Не случайно в США, где самая высокая интенсивность воздушного дви-

жения, проблемы УВД возникли значительно ранее: первая аэродромная АС УВД *ART-III*, внедренная в эксплуатацию, создана лишь с четвертой попытки в 1972 г. после ряда неудач (системы *ARTS* (1963 г.) и *ARTS-ia* (1968 г.), которая в единичном комплекте эксплуатировалась в аэроузле Нью-Йорка).

На основании анализа американского опыта создания аэродромных АС УВД в связи с пониманием сложности проблемы и неверием в возможность успешного создания отечественной АС УВД «Старт» и имевшейся необходимости автоматизации УВД, в особенности в Московской воздушной зоне, в процессе изготовления опытного образца системы «Старт» ВПК в 1974 г. были приняты:

— решение о закупке у зарубежных фирм систем для а/п Минеральные Воды, аэроузла Киев, аэроузла и района Москвы;

— решение о разработке новой системы аэродромно-узловой АС УВД с повышенным уровнем автоматизации «Старт-2» (в последующем — «Спектр»).

ТЗ на систему «Спектр» копировало ТЗ на «Старт-2», аналог АС УВД «*TERCAS*», контракт на поставку которых для аэроузла и района Москвы, аэропортов Киева, Минеральных Вод был заключен в середине 1975 г. и не учитывал всех положительных качеств системы «Старт».

Однако реальная действительность сделала негативный прогноз в отношении АС УВД «Старт» несостоятельным: разработка системы «Старт» была завершена в сроки, установленные Постановлением ЦК КПСС, а высокая оперативно-тактическая эффективность и надежность ($T_o = 28000$ час.) значительно превосходящая американский аналог — систему *ARTS-III*, явились основанием для передачи системы «Старт» в серийное производство.

В связи с занятостью коллектива разработчиков АС УВД «Старт» решениями задач освоения серийного производства системы и внедрения ее первых серийных комплектов в эксплуатацию, разработка АС УВД «Спектр» реально началась лишь в 1978 г.

Имели место существенные отличия условий разработки АС УВД «Спектр» относительно АС УВД «Старт», основные из которых состояли в следующем:

1. Сопровождение разработки АС УВД «Старт» со стороны Заказчика осуществляло техническое подразделение ГОСНИИГА.

2. При разработке АС УВД «Спектр» разработчик использовал богатый опыт разработки и внедрения АС УВД «Старт» и имел собственное мнение о путях решения основных системных задач.

3. Сопровождение разработки АС УВД «Спектр» осуществляло оперативно-тактическое подразделение НЭЦ АУВД, получившее хорошие знания по АС УВД «*TERCAS*».

В связи с отмеченными особенностями в период разработки АС УВД «Спектр»:

1. Специалисты Заказчика оказывали мощное давление на разработчика с целью заставить последнего копировать все решения, реализованные в АС УВД «TERCAS», несмотря на то, что не все из них этого заслуживали.

2. Специалисты Заказчика на основании знаний по системе «TERCAS» оказали большую помощь в освоении вопросов автоматизации сбора обработки и отображения плановой информации.

Для предотвращения возможных потерь в эффективности разрабатываемой АС УВД «Спектр» в связи с требованиями Заказчика по соответствию операционной технологии и структуре секторов АС УВД «Спектр» АС УВД «TERCAS» разработчиком был проведен анализ продуктивности (отношения пропускной способности сектора к штатному составу) АС УВД «TERCAS» относительно АС УВД «Старт», анализ выявил преимущества АС УВД «Старт».

Результаты анализа подтвердили целесообразность в АС УВД «Спектр» в отличие от АС УВД «TERCAS»:

1. Использования эшелонатора для повышения оперативности ввода заданных эшелонов, реализованного в АС УВД «Старт».

2. Использования индикатора формуляров сопровождения для упрощения обращения, реализованного в АС УВД «Старт».

3. Укорочения операций приема и передачи.

4. Реализации возможности диспетчеру процедурного контроля (ДПК) в периоды высокой ИВД выполнять функции помощи ДРУ по вводу заданных эшелонов и передаче управления ВС.

5. Сокращение максимального штатного состава сектора с 3 до 2,5 человек (один ассистент на два сектора подхода).

6. Отказа от бумажных стрипов хода полета, печатаемых автоматически, но требующих обработки вручную в процессе проводки ВС.

7. Обеспечения возможности диспетчеру радиолокационного управления (ДРУ) в периоды низкой ИВД одному в секторе без ДПК выполнять все функции УВД.

4.1. Основные отличия АС УВД «Спектр» от АС УВД «Старт»

АС УВД «Спектр» является системой УВД с повышенным уровнем автоматизации для аэродромных и аэроузловых районов. Она представляет собой систему второго поколения, в которой автоматизированы процессы 2-го и частично 3-го уровня.

Требования к разработке АС УВД «Спектр» были заданы исходя из необходимости удовлетворения возрастающих потребностей в автоматизации УВД и инструментальной емкости аэроузлов с наивысшей интенсивностью воздушного движения с учетом возможного прогнозируемого роста ИВД до 2000 г. и далее.

Основные принципиальные отличия АС УВД «Спектр» состоят в следующем.

В АС УВД «Спектр»:

1. Автоматизацией охвачена вся совокупность процессов УВД, начиная от суточного планирования и заканчивая завершающими процессами непосредственного УВД. С этой целью дополнительно реализована полномасштабная подсистема автоматизированной обработки плановой информации, обеспечивающая автоматизацию сбора, обработки и отображения этой информации на всех фазах планирования; суточного (предварительного), 1-й и 2-й фаз текущего планирования. При этом обеспечивается коррекция радиолокационной информации по плановой и коррекция плановой информации по радиолокационной.

2. На основе автоматической обработки радиолокационной и плановой информации решаются задачи автоматизации анализа как текущей, так и упрежденной воздушной обстановки.

3. Средствами автоматизации системы «Спектр» оснащаются все пункты управления и планирования: аэродромно-диспетчерские центры (АДЦ) сектора подхода и круга, аэродромные КДП (сектора посадки, старта, руления) базового и периферийных аэродромов аэроузла и АДП базового и периферийных аэродромов аэроузла.

4.2. Новые функциональные задачи, решаемые в АС УВД «Спектр»

С целью дальнейшего повышения оперативной эффективности в АС УВД «Спектр» по сравнению с АС УВД «Старт» дополнительно автоматизируется решение ряда новых функциональных задач или существенно повышается уровень автоматизации задач, решаемых АС УВД «Старт», что превращает АС УВД «Спектр» в систему 2-3 уровня автоматизации.

Так, с целью внесения непосредственного вклада в повышение безопасности полетов в системе «Спектр» на основе автоматического анализа информации о текущей и прогнозируемой воздушной обстановке автоматически решены задачи обнаружения:

- нарушения норм эшелонирования;
- потенциально опасных сближений ВС;
- потенциально опасных сближений ВС с наземными препятствиями.

Решены задачи сбора, обработки и отображения метеоинформации, в результате чего информация об опасных метеоявлениях и воздушном пространстве отображается на ИВО, что очень важно для обеспечения безопасности полетов, а информация о фактической погоде на аэродромах аэроузла и запасных — на ИВО и на таблично-знаковых индикаторах (ТЗИ).

В системе осуществляется автоматический сбор, хранение, обработка, распределение и отображение информации планов полетов.

Информация планов полетов в виде снимков прибывающих и вылетающих ВС отображается на ТЗИ ДПК, обеспечивая с упреждением анализ складывающейся воздушной обстановки, а также на ИВО ДРУ.

Представление на ИВО ДРУ маршрутов полета по плану на основе точного расчета пространственно-временных траекторий полета обеспечивает возможность ДРУ со значительным упреждением анализировать и обнаруживать потенциально конфликтные ситуации.

В системе на основе точного расчета пространственно-временных траекторий полета по плановой информации, корректируемой по радиолокационной, автоматизируется решение задачи упорядочения потока ВС, заходящих на посадку и вылетающих, что вносит непосредственный вклад в повышение пропускной способности аэропорта.

В АС УВД «Спектр» обеспечивается прием информации от трех РЛК: двух основных и одного резервного. При этом обеспечивается объединение информации от двух РЛК.

В связи с отказом, как и ожидал разработчик, диспетчерского состава а/п Пулково работать с бумажными стрипами, поскольку эта работа — ручная и требует наличия второго диспетчера в секторе, и реализованными в системе по требованию Заказчика, разработчик для обеспечения гарантированного сохранения информации в случае катастрофического отказа системы вынужден был обеспечить автоматическую неразрушаемую фиксацию основной информации о текущей воздушной обстановке. Эта задача была решена использованием стрипопечатающих устройств, имевшихся в пультах.

Таким образом, существенно повышена продуктивность системы.

Система предоставляет возможность руководителю полетов АДЦ:

— с упреждением на всю глубину смены анализировать нагрузку аэродрома и принимать обоснованные решения по организации работы диспетчерского персонала;

— контролировать с рабочего места в реальном времени работу диспетчерского персонала и в случае необходимости оперативно оказывать помощь;

— оперативно получать информацию и проводить анализ сигналов о потенциально конфликтных ситуациях и ряда других.

В АС УВД «Спектр» реализовано документирование информации о воздушной обстановке и процессе управления во всех деталях, включая выполнение диспетчерами технологических операций и их воспроизведение на резервных рабочих местах.

4.3. Особенности архитектуры и основные технические решения

С целью улучшения экономических характеристик предусмотрена возможность комплектования систем различной инструментальной емкости и уровня автоматизации для обеспечения экономичного удовлетворения потребностей аэропортов и аэроузлов с различными объемами движения. Для этого система разработана модульной с распределенной обработкой и структурой.

Центральный комплекс обработки информации выполнен с тремя уровнями производительности:

- на базе 4- и 2-процессорного вычислительного комплекса модульной аппаратуры сопряжения со средствами отображения и каналами передачи данных;

- на базе встраиваемых микро-ЭВМ в виде модуля радиолокационного шунта, включающего в себя средства сопряжения с источниками информации и аппаратурой отображения.

Создание на базе микро-ЭВМ модуля радиолокационного шунта, осуществляющего автоматизацию решения функциональных задач на уровне, аналогичном АС УВД «Старт», наиболее экономично решает задачу обеспечения непрерывности функционирования системы «Спектр» при отказах центрального комплекса обработки полномасштабной системы. Кроме того, этот модуль обеспечивал возможность создания на базе технических средств АС УВД «Спектр» системы 1-го уровня автоматизации, допускающей ее наращивание как по уровню автоматизации, так и по инструментальной емкости. При этом наращивание может производиться без замены оборудования.

На базе встраиваемых микро-ЭВМ, кроме модуля радиолокационного шунта, выполнен и ряд других модулей системы:

- первичной обработки радиолокационной информации АПОИ-С2;
- группового управления передачей данных;
- унифицированного модуля яркостного отображения;
- аппаратуры сопряжения АКДП и каналов передачи данных.

Исполнение ряда модулей на базе микро-ЭВМ вследствие расширения их функциональных возможностей снизило загрузку ЦВК и, таким

образом, дало возможность в более широких масштабах изменять емкость и уровень автоматизации системы.

Индикаторы воздушной обстановки созданы на вновь разработанной для АС УВД «Спектр» ЭЛТ «Габарит» ($d = 60$ см) и реализуют координатно знаковый способ отображения, предложенный специалистами ВНИИРА в 1966 г. еще в период разработки АС УВД «Старт». В них реализовано строковое, полностью цифровое формирование изображения.

Для предотвращения аппаратурной избыточности при изменении комплектации системы в широких пределах выполнены распределенными по структуре:

- системы электропитания;
- аппаратура коммутации радиосвязи;
- аппаратура наземной голосовой связи.

4.4. Основные данные АС УВД «Спектр»

В состав системы входят:

- аэродромно-диспетчерский центр (АДЦ);
- аэродромные командно-диспетчерские пункты (АКДП) аэродрома базирования и двух смежных;
- выносные индикаторы аэродромных диспетчерских пунктов (АДП) и метеопунктов аэродрома базирования и смежных аэродромов.

По инструментальной емкости (числу секторов управления, охватываемых автоматизацией без учета резервирования) системы могут комплектоваться пультами или выносными индикаторами следующим образом:

АДЦ — 1 комплект в составе:

- пульта подхода и круга 2—10 шт.
- пульта ассистента 1—3 шт.
- пульта посадки 1—2 шт.
- пульт руководителя полетов 1 шт.

АКДП — 1—3 комплекта в составе:

- пульт РПА 1—3 шт.
- пульта руления 1—4 шт.
- пульта старта 1—4 шт.
- пульта посадки 1—4 шт.

АДП — 1—4 комплекта, метеопункты — 1—4 комплекта.

Система сопрягается и обеспечивает прием, обработку информации и решение функциональных задач при использовании следующих источников:

- до двух радиолокационных комплексов, включающих первичную и вторичную РЛС;

- до трех 8-канальных автоматических радиопеленгаторов с возможностью удаления их на большие расстояния;
- до четырех комплексных радиотехнических метеорологических станций (КРАМС);
- центра коммутации сообщений сети АФТН;
- автоматизированного МРЛ.

АС УВД «Спектр» разработана как модульная система, в результате чего обеспечивается возможность комплектования унифицированного ряда систем различной производительности для аэродромных и аэроузловых диспетчерских районов путем использования одного из базовых исполнений системы и модульного наращивания необходимым количеством указанных выше пультов подхода и круга, посадки и выносного пункта в зависимости от потребностей конкретного аэропорта или аэроузла.

В аэроузловом варианте система «Спектр» может обслуживать зону аэродрома базирования системы и до двух смежных аэродромов аэроузла.

Первый серийный комплект АС УВД «Спектр», выполненный в расширенной аэроузловой комплектации, введен в эксплуатацию в 1996 г. в аэропорту Минск-2 в качестве районно-аэродромной АС УВД, обеспечивая процессы УВД в Минском аэроузле и районе, охватывающем Республику Беларусь.

Головной образец системы «Спектр» на протяжении более 6 лет эксплуатируется в аэропорту Пулково и подтвердил высокую надежность: за 50 тыс. час. эксплуатации имел место один отказ по причине дефекта в системе гарантированного электропитания.

Успешное решение в АС УВД «Спектр» задач комплексной обработки как радиолокационной, так и плановой информации и успешной интеграции радиолокационной и плановой подсистем (в отличие от РЛС УВД «Стрела») по результатам госиспытаний привели Заказчика к выводу о целесообразности поручения ВНИИРА разработки интегрированной аэродромно-районной АС УВД «Синтез». В результате разработка АРЛС УВД «Синтез» была задана ВНИИРА Постановлением Совета Министров СССР от мая 1988 г.

5. Интегрированная аэродромно-районная АС УВД «Синтез»

Достигнутые ВНИИРА успехи в создании аэродромно-узловой АС УВД «Спектр», успешно решающей задачи автоматизации и сбора, обработки и отображения как радиолокационной, так и плановой информации, а также их интеграции, обеспечили в 1986 г. выбор Заказчиком ВНИИРА в качестве разработчика интегрированной аэродромно-районной АС УВД средней емкости.

Разработка АРЛС УВД «Синтез» задана Постановлением Совета Министров СССР от 5.05.1988 г. Ее выполнение предусматривалось на базе ТС и ПО аэроузловой АС УВД «Спектр» путем наращивания районной частью.

Задержки в согласовании ТЗ (1989 г.) и заключении договора (1990 г.), стремительное развитие вычислительных средств и средств отображения, изменившаяся ситуация в части возможности использования новейших вычислительных средств производства западных фирм привели разработчика к выводу о целесообразности разработки АРЛС УВД «Синтез» не путем наращивания АС УВД «Спектр», а как новой системы третьего поколения: базовой, модульной, с распределенной обработкой и открытой архитектурой, выполняемой на новейших технических средствах, обеспечивающей создание унифицированного ряда систем, экономически эффективно удовлетворяющих потребности в УВД любых районов, аэроузлов и аэродромов.

Предложения по этому поводу были приняты Заказчиком.

Финансирование разработки АРЛС УВД «Синтез» было возобновлено с сентября 1994 г. после совместного приказа Минтранса РФ и Госкомоборонпрома (май — июнь 1994 г.), определившего в качестве Заказчика Комиссию по регулированию воздушного движения «Росаэронавигация».

Принципиальное отличие условий разработки АРЛС УВД «Синтез» от АС УВД «Старт» и «Спектр» состоит в следующем.

Раньше разработчику системы приходилось разрабатывать практически полный спектр необходимых технических средств и исключительно на отечественной элементной базе, что приводило к значительному отставанию отечественных систем по техническому уровню. Ко времени разработки открылась возможность использования современных технических средств западного производства (имеют место только экономические ограничения), что, при соответствующем их выборе, обеспечивало возможность создания эффективных АС УВД, не уступающих по техническому уровню западным, но существенно более низких по стоимости.

Рациональным подходом к выбору вычислительных средств и средств отображения разработчик АРЛС УВД «Спектр» считал выбор стандартных средств, производимых широким кругом фирм разработчиков и производителей, что обеспечивало их быстрое развитие и высокий технический уровень, относительно низкую стоимость, исключало возможность ценового произвола и включало возможность использования новейших средств по мере их развития.

В результате по совокупности факторов в качестве вычислительных средств выбран ряд *IBM*-совместимых *PC AT*.

Разработчик системы добивался максимальной стандартизации и средств системного программного обеспечения (ПО). Использование стандартных технических средств и стандартного системного ПО позволят обеспечить не только возможность использования новейших вычислительных средств и средств отображения при укомплектовании головного образца системы, но также возможность их применения при тиражировании системы, а также в будущем упростит переход на новую вычислительную платформу.

Открылись принципиально новые возможности по кардинальному усовершенствованию взаимодействия человек — машина, являющегося решающим фактором по обеспечению высокой оперативной эффективности системы. Такие возможности открываются оконной технологией работы (вместо клавишной), позволяющей значительно упростить пультые операции, сократить время их выполнения и снизить умственную нагрузку и исключить ошибки диспетчеров.

Стационарная интегрированная аэродромно-районная автоматизированная система УВД (АРАС УВД) «Синтез» предназначена для обеспечения безопасности и повышения экономичности полетов авиации различных ведомств:

- на воздушных трассах и во внутрассовом пространстве;
- в районах аэродромов и аэроузла, включая аэродромы совместно базирования и аэроузлы, используемые авиацией различных ведомств;
- в зонах взлета и посадки аэродромов ГА и других ведомств.

5.1. Основные задачи, решаемые системой АРАС УВД «Синтез»

- автоматический сбор, обработка, объединение информации от нескольких РЛК и отображение информации о воздушной обстановке;
- автоматический сбор, обработка, распределение, отображение и рассылка информации планов полетов;
- отображение плановой информации;
- проверка текущих планов на бесконфликтность между самолетами, самолетами с зонами ограничений, самолетами с опасными метеоявлениями и отображение конфликтующих планов;
- автоматический расчет планируемых пространственно-временных траекторий полета и отображение их на индикаторах планирования управления;

- решение задачи анализа воздушной обстановки и выработки рекомендаций по обеспечению бесконфликтности планов полетов;
- контроль за нагрузкой секторов, отдельных точек входа, аэропортов и регулирование потоков;
- автоматическая выработка рекомендаций о необходимости поддержки ВС по причине занятости ВПП или перегрузки секторов;
- автоматизированное оставление разрешений и управляющих команд на этапе текущего планирования;
- автоматизированное представление на индикаторе планирования управления секторов УВД прогнозируемой воздушной обстановки и обеспечение выработки бесконфликтной траектории полета при полетах по фиксированным маршрутам, а также со свободным использованием воздушного пространства с учетом наличия на борту средств зональной навигации;
- автоматический контроль за выдерживанием бесконфликтной траектории полета с выдачей рекомендаций для принятия решения диспетчером;
- автоматическая выработка управляющих команд при заходе на посадку с целью выдерживания очередности и безопасных интервалов;
- обнаружение потенциально конфликтных ситуаций по данным автосопровождения и предупреждение диспетчеров УВД об опасностях;
- документирование и воспроизведение информации о воздушной обстановке и процессе управления и технического состояния системы;
- тренировка диспетчерского персонала;
- контроль функционирования и управления системой.

В дальнейшем предусматривается возможность наращивания АРАС УВД «Синтез» функциями спутниковой системы автоматического зависящего наблюдения (АЗН) и цифровой линией передачи данных (ЦЛПД).

5.2. Состав и структура системы

Система состоит из аэродромно-районного диспетчерского центра (АРДЦ), аэродромных командно-диспетчерских пунктов ГА (АКДП ГА) аэропорта базирования аэроузла, аэродромного командно-диспетчерского пункта ведомственной авиации (АКДП ВА), АКДП периферийных аэропортов района (АКДП ПАР) и выносных абонентских пультов аэродромов и командных пунктов ведомственной авиации (КП ВА). По своей архитектуре АРАС УВД «Синтез» является открытой модульной системой, построенной вокруг локальной вычислительной сети (ЛВС) с распределенной структурой и обработкой информации.

АРАС УВД «Синтез» реализуется на основе использования стандартных вычислительных средств и средств отображения широкого применения и стандартных средств системного и общего программного обеспечения. В АРАС УВД «Синтез» использовались *IBM* совместимые ПЭВМ типа *PC AT486* (586) и растровые индикаторы высокого разрешения.

Использование *UNIX* подобной операционной системы реального времени *OS-9000* обеспечивало возможность, при необходимости, относительно простого перехода на другие вычислительные средства (платформы).

По своим характеристикам АРАС УВД «Синтез» удовлетворяла рекомендациям *ICAO*, *FANS*, *FEATS*, Евроконтроля.

АРАС УВД «Синтез» является базовой системой и обеспечивает возможность создания на ее основе аппаратно-программных модулей унифицированного ряда АС УВД:

- аэродромно-районных (АРАС УВД);
- районных (РАС УВД);
- аэроузловых (АУАС УВД);
- аэродромных (ААС УВД);
- средств малой автоматизации.

5.3. Инструментальные характеристики системы

Реализуемая в АРАС УВД «Синтез» новая структура и выбранные новые вычислительные средства и средства отображения обеспечивают следующие инструментальные характеристики:

- количество обзорных РЛК аэродромных и районных — до 10;
- количество автоматических радиопеленгаторов — до 10;
- количество аппаратуры «Метеоячейка-С» — до 8;
- количество повторяющихся планов полетов — до 10000;
- количество суточных и текущих планов полетов — до 3000;
- количество активных планов полетов — до 300–400;
- количество одновременно сопровождаемых самолетов — до 300;
- суммарное количество рабочих диспетчерских пультов круга, подхода и района — до 25;
- количество АКДП ГА, включающих пульты руководителя полетов, старта и руления — до 5;
- АКДП ведомственной авиации — до 2;
- выносных ТЗИ:
- АДП — до 5;
- ОПН — до 3;
- АМСГ — до 3;
- АТИС — до 3.

6. Заключение

Работы, выполненные коллективом ученых и специалистов НИИ-33 — ВНИИРА, оказали существенное влияние на повышение эффективности и безопасности воздушного движения в СССР и Российской Федерации.

Анализ деятельности НИИ-33 — ВНИИРА в области создания автоматизированных систем управления воздушным движением демонстрирует использование специалистами ВНИИРА актуальных подходов к решению научно-технических задач, соответствующих технологическому уровню развития.

Методология «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ) с использованием ленты времени (*timeline*), рис. 1, является важным инструментом снижения размерности контента и визуализации информации в историографии науки и техники.

Настоящей статьей в научный оборот введены новые сведения, касающиеся деятельности НИИ-33 — ВНИИРА в области создания автоматизированных систем управления воздушным движением.

Табл. 1. Общие параметры автоматизированных систем управления воздушным движением, разработанных в НИИ-33 — ВНИИРА.

Table 1. General parameters of automated air traffic control systems developed at Research Institute 33 – VNIIRA

Название оборудования	Годы разработки	Особенности
АС УВД «Марка»	1958—1962	— отображение на разных индикаторах — потери автосопровождения — серийный выпуск — нет
АС УВД «Старт»	1972—1975	— резервирование — сопряжение с трассовыми РЛС — «информационный шунт» — производство: 1976—1986 — количество комплектов: 18
АС УВД «Спектр» («Старт-2»)	1978—1979	— контроль норм эшелонирования — контроль опасных сближений ВС — производство: с 1979 — количество комплектов: 2
АС УВД «Синтез»	1988—1994	— работа на и вне воздушных трасс — совместимость с оборудованием различных ведомств

Благодарности

Авторы статьи благодарят рецензента — доктора технических наук, профессора СПбГУ ГА Ю. Т. Криворучко за ряд ценных замечаний и уточнений.

Список литературы

1. Криворучко Ю. Т., Шатраков Ю. Г. Создание микроволновой радиомаячной инструментальной системы посадки для высокоманевренных самолетов в СССР // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. Т. 7, № 4. С. 780—797.
2. Криворучко Ю. Т. 50 лет в строю Всесоюзного научно-исследовательского института радиоаппаратуры (ВНИИРА) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 5. С. 835—860.
3. Ермолов П. П. Методология «компендиум — таблица — инфографика» (КТИ) в историографии науки и техники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 1. С. 124—151.
4. Ермолов П. П., Катеринчук В. И., Слёзкин Г. В. История создания радиотехнических систем ближней навигации в НИИ-33 — ВНИИРА (1951—2005) // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 493—522.
5. НИИ-33 / ВНИИРА (рукопись). СПб., 2011. 377 с.

Сведения об авторах

Ермолов Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, профессор инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

Слёзкин Геннадий Витальевич, старший преподаватель инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация.

Катеринчук Виктор Иванович, аспирант инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация.

Годы разработки систем управления воздушным движением в НИИ-33 – ВНИРА

	1958	1962	1972	1975	1978	1979	1988	1994
«Марка»	– отображение на разных индикаторах – потери автоматического управления – серийный выпуск – нет							
«Смарт»	– резервирование – сопряжение с трассовыми РЛС – «информационный шунт» – производство: 1976–1986 – количество комплектов: 18							
«Спектр» [«Смарт-2»]	– контроль норм эшелонирования – контроль опасных сближений ВС – производство: с 1979 – количество комплектов: 2							
«Синтез»	– работа на и вне воздушных трасс – совместимость с оборудованием различных ведомств							
	1958	1962	1972	1975	1978	1979	1988	1994

Рис. 1. – Fig. 1.

History of the Creation of Automated Air Traffic Control Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1958–1994)

P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

ppyermolov@sevsu.ru

Received: March 14, 2026

Peer-reviewed: April 15, 2026

Accepted: April 15, 2026

Abstract: This article presents the history of the development of automated air traffic control systems (ATCS) at Research Institute 33 — VNIIRA from 1958 to 1994. It examines the early development of automated ATCS systems (the “Marka” ATCS), the domestic “Start” ATCS, the “Spektr” (“Start-2”) aerodrome-junction automated ATCS with an advanced level of automation, and the “Sintez” integrated aerodrome-district ATCS. The results of this study are visualized using the “compendium-table-infographics” (CTI) methodology, based on three sequential levels of content transformation.

Keywords: Research Institute-33, All-Russian Research Institute of Radio Equipment (VNIIRA), automated air traffic control systems (ATCS) “Marka”, ATCS “Start”, ATCS “Spektr”, ATCS “Sintez”, visualization, “compendium – table – infographics” methodology.

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin, “History of the Creation of Automated Air Traffic Control Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1958–1994),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 687–715, 2026, doi: 10.21227/1ajc-1g69. (In Russ.).

References

- [1] Yu. T. Krivoruchko and Yu. G. Shatrakov, “Creation of Radio Beacon Instrument Landing Systems for the Highly-Maneuverable Aircrafts in USSR,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 7, no. 4, pp. 780–797, 2024.
- [2] Yu. T. Krivoruchko, “Fifty Years in the Troops of All-Union Scientific Research Institute of Radio Equipment,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 5, pp. 835–860, 2025. (In Russ.).
- [3] P. P. Yermolov, “The Compendium–Table–Infographics (CTI) Methodology in the Historiography of Science and Technology,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 124–151, 2025.
- [4] P. P. Yermolov, V. I. Katerinchuk, and G. V. Slyozkin, “History of the Development of Short-Range Radio Navigation Systems at Research Institute 33 – VNIIRA (1951–2005),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 493–522, 2026. (In Russ.).
- [5] Research Institute – 33 / VNIIRA (mss). St. Petersburg, 2011. (In Russ.).

Information about the authors

Pavel P. Yermolov, Candidate of Technical Sciences, Professor in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

Gennady V. Slyozkin, Senior Lecturer in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Viktor I. Katerynychuk, Postgraduate Student in the Engineering Department of the Higher Technological School “Sevastopol Instrument-Making Institute” of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 654.1:93/94(075.4)

История испытаний гидроакустических средств на Черноморском флоте

Ермолов П. П.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

ppyermolov@sevsu.ru

Получено: 15 января 2026 г.

Отрецензировано: 22 января 2026 г.

Принято к публикации: 22 января 2026 г.

Аннотация: В статье рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте гидроакустических средств связи и шумопеленгования за период 1905—1941 гг., гидроакустических средств подводного наблюдения в 1929—1956 гг. и средств гидроакустического противодействия и подавления в 1924—1968 гг. Результаты исследования изложены в формате компендиума, сведены в таблицы и проиллюстрированы инфографикой.

Ключевые слова: прибор Р. Г. Ниренберга, «Сатурн-12», «Орион», «Пегас», «Плутоний», «Геркулес-2М» («ГС-572»), «Волхов», «Удав-14».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П. История испытаний гидроакустических средств на Черноморском флоте // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2026. Т. 9, № 4. С. 716—736.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. История испытаний гидроакустических средств на Черноморском флоте / П. П. Ермолов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2026. — Т. 9, № 4. — С. 716—736.

1. Введение

Черноморский флот стал полигоном для испытаний радиоэлектронных средств еще с начала 1-го периода¹ (в конце XIX в.), когда под руководством А. С. Попова в 1899 и 1901 гг. на ЧФ проводились первые в мировой практике испытания систем радиосвязи в условиях «практической эскадры». В статье [2] с использованием методологии «компендиум —

¹ Здесь и далее периодизация соответствует [1].

таблица — инфографика» (КТИ) [3] рассмотрена краткая предыстория развития радиолокации и история испытаний на Черноморском флоте РЛС общего обнаружения в четырех периодах: 1939—1940, 1941—1945, 1946—1964 и 1965—1986 гг. В статье [4] с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте РЛС управления артиллерийским и торпедным оружием. В статье [5] с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте навигационных РЛС, РЛС опознавания и приемопередатчиков РЛС. В статье [6] с использованием КТИ рассмотрена история испытаний на Черноморском флоте РЛС в составе управления ракетным оружием.

В настоящей статье с использованием КТИ рассмотрена история испытаний гидроакустических средств на Черноморском флоте.

История развития гидроакустических средств на Военно-Морском Флоте в целом детально рассмотрена в диссертациях [7] и [8], а также в статье автора первой из названных диссертаций [9]. В исследовании будем основываться на этих работах, а также на публикации выпускника Высшего военно-морского училища радиоэлектроники им. А. С. Попова, специалиста радиотехнической службы Черноморского флота, капитана 1 ранга А. В. Вальданова.²

2. Средства связи и шумопеленгования

1-й период. В 1905 г. был создан первый прибор гидроакустической связи, в котором роль передающего устройства играла специальная подводная сирена, управляемая телеграфным ключом, а приемником сигналов служил угольный микрофон, закрепленный изнутри на корпусе корабля. Сигналы регистрировались аппаратом Морзе и на слух. Были изготовлены две станции, которые прошли успешные испытания на подводных лодках Черноморского флота. Позднее сирену заменили излучателем мембранного типа. Эффективность прибора, названного гидрофонической станцией, значительно повысилась. Морские испытания новой станции состоялись в марте 1908 г. также на Черном море. Уверенный прием сигналов осуществлялся на расстоянии более 10 км. Подобные работы за рубежом были развернуты лишь через три года [10].

Первые серийные станции звукоподводной связи («приборы Р. Г. Ниренберга») в 1909—1910 гг. были установлены на подводной лод-

² Вальданов А. В. Краткая история создания радиоэлектронных средств ВМФ. В сб. : Служим отечеству. Ч. 4 / Под общ. ред. В. Н. Иванова [К 100-летию изобретения радиосвязи...]. Севастополь, 2005. С. 468—481.

ке «Карп» и линкоре «Три святителя» Черноморского флота. При установке станций на подводных лодках в целях уменьшения помех при приеме приемник располагался в специальном обтекателе, буксируемом за кормой на кабель-тросе. К подобному решению англичане пришли лишь во время первой мировой войны. Затем эту идею забыли и только в конце 50-х годов ее снова стали использовать в разных странах при создании помехоустойчивых гидролокационных корабельных станций [10].

Испытания этих станций («приборов Р. Г. Ниренберга») показали, что новая конструкция может быть принята на вооружение флота для подводной сигнализации в боевых условиях. Однако процесс внедрения и доработки приборов не был решен по причине отсутствия «специально предназначенных для опытов плавучих средств, так как до сих пор все выходы в море для упомянутых опытов производились на различных судах при наличии условия не отвлекать их от несения прямых своих обязанностей. Благодаря этому за все время производства опытов на Черном море в прошлом и текущем годах было совершено не более 10 выходов в море для гидрофонических опытов» [7].

Созданная в 1935 г. шумопеленгаторная станция «Сатурн-12» также испытывалась на Черноморском флоте². Станция с дальностью обнаружения до 50 каб. имела круговую базу из 12 приемников, смонтированных на общей станине, которая выносилась в море на 12 км от берега. База приемников соединялась подводным кабелем с компенсатором, установленным на береговом посту [8].

3-й период. На Черноморском флоте береговая шумопеленгаторная станция «Сатурн-12» была установлена в августе 1941 г. на посту НиС в районе мыса Херсонес. Ее установка вначале была встречена с некоторым недоверием со стороны отдельных оперативных работников. Однако вскоре им пришлось изменить свое мнение, так как БШПС «Сатурн-12», взаимодействуя с тепlopеленгатором БТП-36, значительно облегчила работу оперативной службы Севастопольского оборонительного района и охраны водного района главной базы флота. Она полностью обеспечивала контроль за подводной обстановкой в районе основного фарватера, являвшегося фактически единственным проходом для надводных кораблей [10].

В дальнейшем, как правило, звукоподводная связь стала опцией в гидроакустических станциях подводного наблюдения.

Самые общие сведения об испытаниях на Черноморском флоте гидроакустических средств связи и шумопеленгования за период 1905—1941 гг. приведены в таблице 1. С использованием средств инфографики эти данные отображены на рис. 1.

Таблица 1. Сведения об испытаниях на Черноморском флоте гидроакустических средств связи и шумопеленгования.

Table 1. Information on testing of hydroacoustic communication and noise direction-finding equipment in the Black Sea Fleet

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	Дальность, км	Частота, Гц	Основные особенности
1.	Первый прибор гидроакустической связи	1905	ПЛ ЧФ	—	—	Передающее устройство — подводная сирена
2.	Гидрофиническая станция	1908	ЧФ	10	—	Излучатель мембранного типа
3.	«Прибор Р. Г. Ниренберга»	1910	ПЛ «Карп», ЛК «Три святителя» ЧФ	—	—	Приемник располагался в обогревателе, буксируемом на кабель-тросе
4.	«Сатурн-12»	после 1935	ЧФ	9	—	Береговая ШПС с круговой базой из 12 приемников
5.	«Сатурн-12»	1941	м. Херсонес	—	—	Взаимодействие с тепlopеленгатором БТП-36

3. Средства подводного наблюдения

2-й период. В Советском Союзе освоением гидроакустических средств начали заниматься с 1929 г. после закупки в Германии первой партии гидроакустических приборов связи и наблюдения, которые и были положены в основу разработки отечественной аппаратуры [9].

В июне 1929 г. «изготовлен макет гидроакустической линии барьерного типа силами Остехбюро, доставлен на Черное море и испытан. Результаты положительные» [7].

В 1930—1933 гг. инженер С. Я. Соколов на кораблях Черноморского флота провел испытания кварцевых ультразвуковых преобразователей, ставших впоследствии основой для создания гидроакустических радиолокаторов и станций звукоподводной связи. Работы С. Я. Соколова были использованы при создании первой станции ультразвукового подводного наблюдения «Орион», первый образец которой был установлен на подводной лодке «Д-5» Черноморского флота.²

14 июня 1931 г. был подписан протокол о положительных результатах испытаний пятиячейковой гидрофонной цепочки на Черном море с пролетом по 1 км между ячейками [7].

О создании станции ультразвукового подводного наблюдения (УЗПН) «Орион» в [10] сообщается, что другой известный специалист, В. Н. Тюлин, который одновременно с исследованиями руководил разработкой ряда гидроакустических станций, в этот период сформулировал методы расчета гидроакустических излучателей и приемников. Постепенно к теоретическим и экспериментальным исследованиям физики ультразвуковых колебаний подключалось все большее количество ученых-энтузиастов. В результате этого в 1936 г. создается макет станции УЗПН «Орион», в которой использовалась антенна, состоявшая из кварцевых пластин, приклеенных к стальным электродам. Станцию испытывали на подводной лодке Д-5 (типа «Декабрист») на Черном море. Во время испытаний кварцевые пластины отклеились от стальных электродов. Найти более надежный материал для склеивания в то время не удалось, и станция в серийное производство не пошла. Поэтому начиная с 1937 г. во всех последующих разработках стали использовать магнетострикционные излучатели вместо пьезоэлектрических [10].

20 июня 1939 г. на Черноморском флоте проведены испытания заводского образца установки типа «Орион». Установка работала на частоте 20 000 Гц. Направленность излучателя по вертикали 8° , по горизонтали 9° . Направленность приемника по вертикали 96° , по горизонтали 28° . Цель — ПЛ типа «Щ» — была обнаружена на дистанциях 800—1600 м при курсовых углах 90 — 115° . Ближе 800 м ПЛ обнаружена не была из-за маскирующего действия рассеянного эха от дна. Точность пеленгования составила $2,5^\circ$. Испытания проводились в районе с глубиной моря 70 м, температура воды составляла 16°C , плотность воды 1,0137, волнение на море 2 балла, ветер 3 балла. Результаты испытаний установки «Орион» получили следующие объяснения:

— маскирующий эффект рассеянного эха на дистанциях до 800 м объясняется недостаточной направленностью приемной камеры по вертикали и горизонтали;

— малую точность пеленгования ($2,5^\circ$) нужно в основном отнести к недостаткам механизма вращения камер;

— при испытаниях выяснилось, что малая направленность приемной камеры по вертикали (96°) способствует увеличению дистанции мешающего действия рассеянного эха.

Для устранения указанных недостатков пришлось увеличить ширину мембраны приемной камеры с 55 до 100 мм. На основании испытаний установки «Орион» была разработана камера с амортизацией мембраны, работающая на частоте 57 000 Гц, с направленностью излучателя по гори-

зонтали 42° , по вертикали 6° ; приемника — по горизонтали 15° , по вертикали 40° [9].

В 1934—1935 гг. был разработан и изготовлен первый ультразвуковой прибор наблюдения («УЗПН на принципе эхолота»). Его испытание состоялось 17 июня 1935 г. в Финском заливе в районе Нарвской губы. Результаты испытаний:

— обнаружена подводная шаровая мина и измерено расстояние до этой мины (200 м);

— обнаружена и запеленгована подводная лодка на расстоянии 300 м;

— обнаружен и запеленгован надводный корабль на расстоянии 600 м.

Прибор работал на частоте 35 000 Гц. В нем использовался кварцевый однослойный излучатель одностороннего действия, а возбудителем являлась искровая импульсная схема [9].

На основании проведенных испытаний впоследствии был разработан и изготовлен макет УЗПН для ПЛ. Испытания прибора проводились в 1936 г. на Черноморском флоте на ПЛ «А-1». Их целью являлось определение дальности пеленгования подводного объекта горизонтальным эхолотом при различных курсовых углах. Испытания проходили в районе Балаклавы. Глубина моря была от 600 до 800 м, волнение моря 1—1,5 балла. ПЛ «А-3» (объект) стояла на месте в позиционном положении, а ПЛ «А-1» ходила вокруг нее на перископной глубине. В результате испытаний обнаружены отраженное эхо на курсовом угле 90° на расстоянии четырех каб; отчетливое эхо на расстоянии 3,3 каб. в продолжение всего времени циркуляции. С увеличением расстояния до 4,5 каб. отраженное эхо исчезло. Во все время испытаний регистрировались помехи от волн вследствие недостаточной направленности излучателей. По результатам испытаний данной конструкции макета были сделаны следующие выводы:

— дальности, полученные УЗПН при испытаниях, недостаточны из-за малой излучаемой мощности и недостаточной чувствительности приемной камеры;

— на дальность работы УЗПН повлияли недостаточная направленность излучающих и приемных систем. При передаче имелись добавочные максимумы, которые при приеме давали большое рассеянное эхо от дна и от поверхности воды (волн) и маскировали приходящее слабое эхо [9].

Для получения больших дальностей и точностей были разработаны мощный четырехслойный полосовой направленный излучатель и приемник на частоту 20 000 Гц. Направленность излучателя по горизонту 82° , по вертикали 3° . Направленность приемника по горизонту 16° , по вертикали 82° . Излучатели испытывались в Севастопольской бухте [9].

8 апреля 1937 г. в Южной бухте Севастополя проведены испытания по обнаружению стоящих кораблей, давшие следующие результаты:

— для ПЛ, стоящей у пирса, с расстояния 300 м получено четкое отраженное эхо на телефоне и регистрирующем устройстве;

— при направлении прибора на берег восточной стороны получено также отчетливое эхо на телефоне и регистрирующем устройстве;

— при направлении прибора вдоль бухты на берег холодильника с расстояния 900 м получено отчетливое эхо на телефоны [9].

14 апреля 1937 г. УЗПН вновь испытывался в Южной бухте. Цель испытания — проверка работы на острых кормовых и носовых углах. Объектом испытания являлась дифференцирующая ПЛ типа «Щ». При дифферентовке ПЛ, а также при полной циркуляции отраженные сигналы непрерывно обнаруживались на телефоны и регистрирующее устройство на расстоянии 2 каб. [9].

22 апреля 1937 г. проведено испытание в открытом море. Цель испытания — определение дальности получения отраженного эха при различных курсовых углах. УЗПН был установлен на тральщике «Т-12», объектом являлась ПЛ «Щ-207». «Т-12» стоял на якоре, ПЛ маневрировала в подводном и в надводном положениях. Волнение на море 3 балла, ветер 4 балла, глубина моря 40—50 м. Дальность обнаружения ПЛ в надводном положении составила 5 каб. независимо от курсовых углов, а от борта перпендикулярно прибору — 6,5 каб. [9].

26 ноября 1937 г. в Черном море производились испытания УЗПН, установленного на ПЛ «А-1». Цель испытаний — определение дальности работы прибора в реальных условиях. Глубина моря 70 м, волнение на море 2—3 балла. ПЛ «А-1» погрузилась и пошла курсом «вест», делая зигзаги (длиной 0,5 каб. через 1 милю) на «норд». ПЛ «М-55» погрузилась в исходную точку и шла курсом «вест». После погружения ПЛ «А-1» было установлено надежное пеленгование ПЛ «М-55» по отраженному эху и измерено расстояние между ПЛ. На основании записей курсовых углов, определявшихся по углу поворота ультразвуковой камеры, и расстояния, отсчитывавшегося по регистрирующему устройству, установлено, что УЗПН имел надежное определение курсовых углов и дистанций до ПЛ «М-55» на расстоянии 15 каб. с точностью 2—3°, причем отраженное эхо на этой дистанции было очень сильным. На основании испытаний УЗПН с полосовыми камерами на частоте 20 000 Гц, проведенными в 1937 г., были сделаны следующие выводы:

— излучаемые акустические мощности соответствуют техническому заданию;

- направленности излучателя и приемника обеспечивают тактико-технические требования;
- рассеянное эхо от дна незначительно;
- подтвердился принцип работы полосового излучателя;
- для обнаружения мин необходимо повысить частоту излучения;
- для обнаружения подводных лодок данная частота удовлетворительна;
- к недостаткам нужно отнести большие массу и габариты [9].

4-й период. Опытный образец станции «Пегас» был принят 12.04.50 г. на стендовых испытаниях. Заводские испытания в море опытного образца были проведены на ЭМ «Огневой» Черноморского флота в октябре 1950 г. Государственные испытания были проведены на Черноморском флоте в период с 29.12.1950 г. по 04.02.1951 г. Станция «Пегас» имела автоматический прокладчик противолодочных атак, позволяющий наблюдать на экране картину взаимного маневрирования своего корабля и подводной цели в географических координатах, а также определять параметры движения подводной лодки. Станция имела систему гироскопической стабилизации вибратора, обеспечивающую удержание вибратора в заданном направлении с точностью $0,75^\circ$ при бортовой качке корабля 10° и килевой качке 7° . На испытаниях средняя ошибка в определении угла места погруженной подводной лодки при дистанции 5—7 каб. составила 1° , что соответствовало ошибке по глубине 6—15 м. Станция обеспечивала минимальную дистанцию поддержания эхоконтакта с погруженной подводной лодкой, равную одной глубине погружения, в то время как серийные станции «Тамир-11» — 1,5—2 глубины, «Тамир-5Н» — 4 глубины. Станция «Пегас» обеспечивала обнаружение подводных лодок на дистанции 15 каб., при скорости корабля 20 узлов. Одновременно станция позволяла при наличии эха от подводной лодки увеличивать скорость корабля с 20 до 24 узлов при сближении с ПЛ с дистанции 6—8 каб. без потери контакта. Система стабилизации «Стабилизатор» обеспечивала возможность производить поиск и атаку подводных лодок при бальности моря до 6 баллов (станция «Тамир-11» обеспечивала поиск и атаку ПЛ при состоянии моря до 3 баллов). Механическая прочность подъемно-опускного устройства станции «Пегас» была рассчитана и обеспечивалась на скорости хода корабля 40 узлов, в то время как подъемно-опускное устройство станции «Тамир-1» было рассчитано на скорость корабля до 30 узлов. Подъем и спуск обтекателя в станции «Пегас» обеспечивалось электродвигателем на скорости корабля до 25 узлов, подъем и спуск обтекателя в станции «Тамир-11» производился вручную и был рассчитан на скорость до 8 узлов [7].

Постановлением правительства от 15 августа 1948 г. было предусмотрено разработать корабельную гидролокационную станцию «Плутоний» для вооружения подводных лодок среднего и большого водоизмещения пр. 611, 613. Станция должна была удовлетворять следующим требованиям:

— дальность обнаружения НК в режиме эхопеленгования на ходу ПЛ 20 узлов — 20 каб;

— в режиме ШП на подводном ходу ПЛ 6 узлов — 25 каб;

— дальность направленной телеграфной связи между двумя ПЛ на подводном ходу 20 узлов — 40 каб;

— средняя точность определения дистанции — 2 % [7].

Государственные испытания должны были быть проведены в 4-м квартале 1950 г. Однако опытный образец станции «Плутоний» был изготовлен и установлен для испытаний на ПЛ № 409 пр. 613 закладки только 4-го квартала 1951 г. Испытания были проведены с 19.02.1954 г. по 09.03.1954 г. на ПЛ «С-71» пр. 613 Черноморского флота. С 28 августа по 6 сентября 1954 г. проведены дополнительные глубоководные испытания станции «Плутоний». По результатам испытаний были достигнуты следующие результаты:

— дальность эхопеленгования НК на полном подводном ходу ПЛ 12 узлов — 30 каб;

— дальность шумопеленгования средних надводных кораблей на скорости 8—10 узлов на подводном ходу ПЛ 6 узлов — 25 каб;

— средняя точность эхо- и шумопеленгации — $\pm 1\%$;

— точность определения дистанции — $\pm 2\%$;

— дальность односторонней ТЛГ связи между двумя ПЛ — 160 каб.

В 1952 г. было принято решение о проведении опытно-конструкторской работы «Геркулес-2М»: «Доработка и изготовление гидролокационной станции кругового поиска (непрерывного наблюдения) ультразвукового диапазона для обнаружения подводных лодок, минных полей и отдельных мин с кораблей большого водоизмещения». Станция предназначалась для вооружения кораблей большого водоизмещения типа «крейсер» и должна была удовлетворять следующим тактико-техническим требованиям при скорости хода корабля 20 узлов:

— дальность обнаружения подводной лодки — 18 каб;

— дальность обнаружения отдельных якорных мин — 3—5 каб;

— средняя точность эхопеленгования — $1,5^\circ$;

— средняя точность определения дистанции — $\pm 2\%$.

Станция должна была иметь визуальные индикаторы для объективного определения дистанции и слуховой тракт, обеспечивающий лучшую классификацию контакта. 15.09.1953 г. было утверждено тактико-техни-

ческое задание на доработку гидролокационной станции «Геркулес-2» кругового и шагового поиска ультразвукового диапазона для обнаружения подводных лодок в подводном положении, минных полей и отдельных мин — «Геркулес-2М». Опытный образец был разработан для СКР пр. 50 и прошел государственные испытания на СКР «Ягуар» Черноморского флота в июле 1956 г. В мае 1957 г. станция «Геркулес-2М» принята на вооружение под шифром «ГС-572».

Станция «ГС-572», не уступая находящимся на вооружении ВМФ станциям «Тамир-5Н» и «Пегас-2М» по дальности действия, имела преимущества [7]:

- автоматический круговой поиск со временем обследования не более 8—10 секунд;
- одновременное непрерывное наблюдение за несколькими целями, определение их пеленга и дистанции;
- обнаружение торпед с дистанции до 18 каб;
- независимость ширины эффективной полосы поиска от скорости цели.

Комплексная береговая гидролокационная и шумопеленгаторная станция «Волхов» предназначалась для вооружения береговых постов наблюдения и для обнаружения и определения местонахождения погруженных подводных лодок. Станция состояла из аппаратуры, размещаемой на береговом посту, общей приемно-излучающей системы, устанавливаемой в море на глубине 200 м с выносом в море до 5 миль. В состав станции, размещаемой на береговом посту, входила следующая основная аппаратура:

- импульсный генератор мощностью 50 кВт;
- генератор телеграфного типа;
- приемный тракт кругового обзора;
- приемный тракт шагового пеленгования;
- приемный тракт шумопеленгования.

Станция позволяла одновременно работать в режиме кругового обзора с обнаружением всех целей, находящихся в радиусе ее действия, в режиме шагового поиска — для уточнения элементов движения цели и в режиме шумопеленгования для пеленгования шумящих объектов в широком диапазоне частот. В режиме эхопеленгования станция работала на частоте 10 кГц. Акустическая база опытного образца станции «Волхов» была установлена на глубине 92 м с выносом от берега на 3,2 мили. Государственные испытания проходили на Черноморском флоте в районе мыса Херсонес в период февраль — апрель 1956 г. Результаты испытания показали, что образец обеспечивает выполнение предъявленных ТТТ. На испытания были получены следующие основные ТТД:

— дальность эхопеленгования средней ПЛ в режиме шагового поиска — 40 каб., при курсовых углах ПЛ 90°, и 30 каб. — при курсовых углах ПЛ 0° и 180°;

— дальность обнаружения средней ПЛ в режиме кругового обзора — 30 каб. при курсовых углах ПЛ 90°, и 20 каб. при курсовых углах ПЛ 0° и 180°;

— дальность обнаружения в режиме шумопеленгования средней ПЛ, находящейся на перископной глубине, на ходу 4 узла — 30 каб., на ходу 10 узлов — 60 каб.;

— по ходу 2,5—3 узла ПЛ в режиме ШП обнаруживалась на дистанции 4—10 каб. (При погружении ПЛ на большие глубины дальность ШП резко сокращалась. Так, средняя ПЛ на ходу 4,5 и 6 узлов при маневрировании на глубине 60 м обнаруживалась станцией в режиме ШП на дистанциях не свыше 15 каб. При увеличении скорости хода до 8 узлов обнаруживалась на дистанциях порядка 20—30 каб.);

— срединная ошибка пеленгования — 1,5°;

— срединная ошибка определения дистанции — 2 %.

В связи с положительными результатами государственных испытаний опытного образца станции «Волхов» признано целесообразным принять на вооружение ВМФ БГАС «Волхов» со следующими ТТД:

— дальность обнаружения ПЛ среднего водоизмещения в режиме эхопеленгования в гидрологических условиях, обеспечивающих расчетную дальность — 30 каб.;

— станция обеспечивает шумопеленгование погруженной ПЛ;

— срединная ошибка в определении дистанции — 2 %;

— срединная ошибка эхо- и шумопеленгования — 1,5° [7].

Самые общие сведения об испытаниях на Черноморском флоте гидроакустических средств подводного наблюдения за период 1929—1956 гг. приведены в таблице 2. С использованием средств инфографики эти данные отображены на рис. 2.

Таблица 2. Сведения об испытаниях на Черноморском флоте гидроакустических средств подводного наблюдения.

Table 2. Information on tests of hydroacoustic underwater surveillance systems in the Black Sea Fleet

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	Дальность, км	Частота, Гц	Основные особенности
1.	Макет гидроакустической линии барьерного типа	1929	Черное море	—	—	—

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	Дальность, км	Частота, Гц	Основные особенности
2.	Испытания кварцевых ультразвуковых преобразователей (С. Я. Соколов)	1930 — 1933	ЧФ	—	—	—
3.	Пятичечковская гидрофонная цепочка	1931	ЧФ	—	—	Пролет между ячейками 1 км
4.	«Орион»	1936	ПЛ «Д-5» («Декабрист») ЧФ	—	—	Во время испытаний кварцевые пластины отклеились от стальных электродов
5.	«Орион»	1939	ПЛ типа «Щ» ЧФ	1,6	20 000	Разработана камера с амортизацией мембраны на частоте 57 000 Гц
6.	«УЗПН на принципе эхолота»	1936 — 1937	ПЛ «А-1», «А-3», «М-55», «Щ-207», ТР «Т-12» ЧФ, Севастопольская бухта, Южная бухта, Балаклава	—	35 000	В качестве возбудителя использована искровая импульсная схема
7.	«Пегас»	1950 — 1951	ЭМ «Огневой» ЧФ	2,8	—	Автоматический прокладчик противолодочных атак
8.	«Плутоний»	1954	ПЛ «С-71» пр. 613 ЧФ	5,5 30 (связь)	—	Вооружение ПЛ среднего и большого водоизмещения пр. 611, 613
9.	«Геркулес-2М» («ГС-572»)	1956	СКР «Ягуар» ЧФ	3,3 (торп.)	—	Вооружение кораблей типа «крейсер»; одновременное наблюдение за несколькими целями
10.	«Волхов»	1956	м. Херсонес, глубина 92 м, вынос в море 6 км	7,5	10 000	Вооружение береговых постов наблюдения, глубина до 200 м, вынос в море до 9 км

4. Средства противодействия и подавления

2-й период. В 1923 г. в составе Государственного электротехнического треста заводов слабого тока в Ленинграде была образована Центральная радиолaborатория (ЦРЛ). С 1924 г. в ЦРЛ начались работы по созданию пьезокварцевых излучателей для гидроакустических антенн, проводились испытания излучателей в качестве элементов гидроакустических антенн, а также опытных образцов донных (стационарных) шумопеленгаторов, разрабатываемых для прослушивания проходящих кораблей. Здесь же демонстрировалась новая гидроакустическая антенна для излучения мощных ультразвуковых импульсов. Акустическая лаборатория ГЭИ в 1924 г. была преобразована в отдел, который осенью того же года провел на Севастопольском рейде первые экспериментальные наблюдения шумов кораблей.

4-й период. В 1954 г. была выполнена НИР-7305 «Изыскание возможности создания усовершенствованных противогидролокационных покрытий (ППП) для подводных лодок и мин». Работа была посвящена анализу испытаний ППП на подводных лодках на Черном море, выполненных в 1951—1954 гг. в различных гидрологических условиях и рассмотрению тактических возможностей ППП [8].

5-й период. В 1966—1968 гг. была выполнена НИР «Исследование возможных и целесообразных путей создания активных средств борьбы с торпедами», шифр «Удав-14».

Основные требования ТТЗ:

— исследовать возможность создания эффективных средств гидроакустического противодействия и подавления (ГПД) акустических систем самонаведения (АССН) торпед, идущих на надводный корабль (НК);

— определить достижимое снижение вероятности поражения НК при использовании средств ГПД АССН торпед;

— исследовать возможности использования существующих и создания эффективных средств ГПД АССН торпед, идущих на НК;

— принять участие в исследованиях возможности создания эффективных средств ГПД и устройств для выстреливания их с НК;

— исследование эффективности различных средств активного противодействия торпедам, выбор наиболее рациональных средств, а также их целесообразное сочетание;

— разработка и обоснование требований к средствам ГПД АССН.

В результате выполнения НИР:

1. Разработана модель противоторпедной защиты НК с использованием средств ГПД.

2. Определена связь энергетических характеристик приборов ГПД с параметрами АССН торпедного оружия и акустическими полями НК.

3. Произведена оценка эффективности использования существующих, разрабатываемых и перспективных средств ГПД на математических моделях с применением ЭЦВМ.

4. Проведены экспериментальные испытания на Черном море по определению возможности выстреливания существующих приборов ГПД из корабельных бомбометных установок.

5. Произведен анализ возможностей использования существующих и разрабатываемых ГАС для обнаружения торпед.

6. Разработаны принципы построения гидроакустических ложных целей с использованием принципиально новых схемных решений формирования ответных сигналов.

7. Произведен расчет акустических систем для гидроакустических ложных целей.

8. Экспериментально проверена возможность обеспечения одновременной имитации первичного и вторичного гидроакустического поля в гидроакустических ложных целях.

9. Произведено макетирование основных узлов гидроакустических ложных целей.

10. Показано, что разрабатываемая гидроакустическая ложная цель позволит обеспечить эффективную защиту НК от торпед с акустическими системами самонаведения.

11. Разработаны ТТТ на новые образцы средств ГПД, а также ТТТ к НИР по изысканию путей построения узлов приборов ГПД с использованием микромодульных элементов и интегральных схем [8].

Самые общие сведения об испытаниях на Черноморском флоте средств гидроакустического противодействия и подавления за период 1924—1968 гг. приведены в таблице 3. С использованием средств инфографики эти данные отображены на рис. 3.

Таблица 3. Сведения об испытаниях на Черноморском флоте средств гидроакустического противодействия и подавления.

Table 3. Information on tests of hydroacoustic countermeasures and suppression systems in the Black Sea Fleet

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	Дальность, км	Частота, Гц	Основные особенности
1.	Оборудование ЦРЛ	1924	Севастопольский рейд	—	—	Исследование донных (стационарных) шумопеленгаторов

№ п/п	Наименование	Год испытаний	Носитель или место испытаний	Дальность, км	Частота, Гц	Основные особенности
2.	НИР-7305	1951 — 1954	ПЛ ЧФ	—	—	Испытания противогидролокационных покрытий для подводных лодок и мин
3.	«Удав-14» (НИР)	1966 — 1968	ЧФ	—	—	Исследование путей создания активных средств борьбы с торпедами

5. Заключение

Для гидроакустических средств связи и шумопеленгования, которые проходили испытания на Черноморском флоте в 1905—1941 гг., характерны: использование подводной сирены в качестве излучателя и излучателя мембранного типа, размещение приемника в обтекателе, буксируемом на кабель-тросе, применение 12 приемников в береговой ШПС с круговой базой, взаимодействие ШПС с теплопеленгатором.

Для гидроакустических средств подводного наблюдения, которые проходили испытания на Черноморском флоте в 1929—1956 гг., характерны: повышение рабочей частоты до 57 000 Гц, использование в качестве возбудителя искровой импульсной схемы; вооружение ПЛ среднего и большого водоизмещения пр. 611, 613 и кораблей типа «крейсер»; одновременное наблюдение за несколькими целями; вооружение береговых постов наблюдения с выносом в море до 9 км.

Для средств гидроакустического противодействия и подавления, которые проходили испытания на Черноморском флоте в 1924—1968 гг., характерны: исследование донных (стационарных) шумопеленгаторов; испытания противогидролокационных покрытий для подводных лодок и мин; исследование путей создания активных средств борьбы с торпедами.

Анализ инфографики (рис. 1—3), выполненной на основе рекомендаций [3], показывает, что испытания гидроакустических средств на Черноморском флоте достаточно хорошо отражены в открытых источниках только за период 1905—1968 гг.

Список литературы

1. 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.

2. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС общего обнаружения // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2025. Т. 8, № 4. С. 666—686.
3. 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.
4. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС управления артиллерийским и торпедным оружием // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 1. С. 152—166.
5. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. Навигационные РЛС, РЛС опознавания и приемопередатчики РЛС // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 2. С. 350—365.
6. Ермолов П. П. История испытаний систем радиолокации на Черноморском флоте. РЛС в составе управления ракетным оружием // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2026. Т. 9, № 3. С. 547—559.
7. Захаров И. С. Развитие отечественных гидроакустических средств : начало 20-х годов — конец 50-х годов XX века: дис. ... д-ра техн. наук : 07.00.10. СПб, 2004. 390 с.
8. Корж И. Г. Зарождение и развитие отечественного гидроакустического противодействия и подавления (40-е — 60-е годы XX века) : дис. ... канд. техн. наук : 07.00.10. СПб, 2010. 193 с.
9. Захаров И. С. Из истории развития в СССР ультразвуковых приборов подводного наблюдения (1933—1941 гг.) // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2006. Вып. 1. С. 66—77.
10. Попов Г. П., Старцев Г. В. Радиоэлектроника на флоте вчера и сегодня. М. : Воениздат, 1993. 240 с.

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.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИЯХ
НА ЧЕРНОМОРСКОМ ФЛОТЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ СВЯЗИ И ШУМОПЕЛЕНГОВАНИЯ

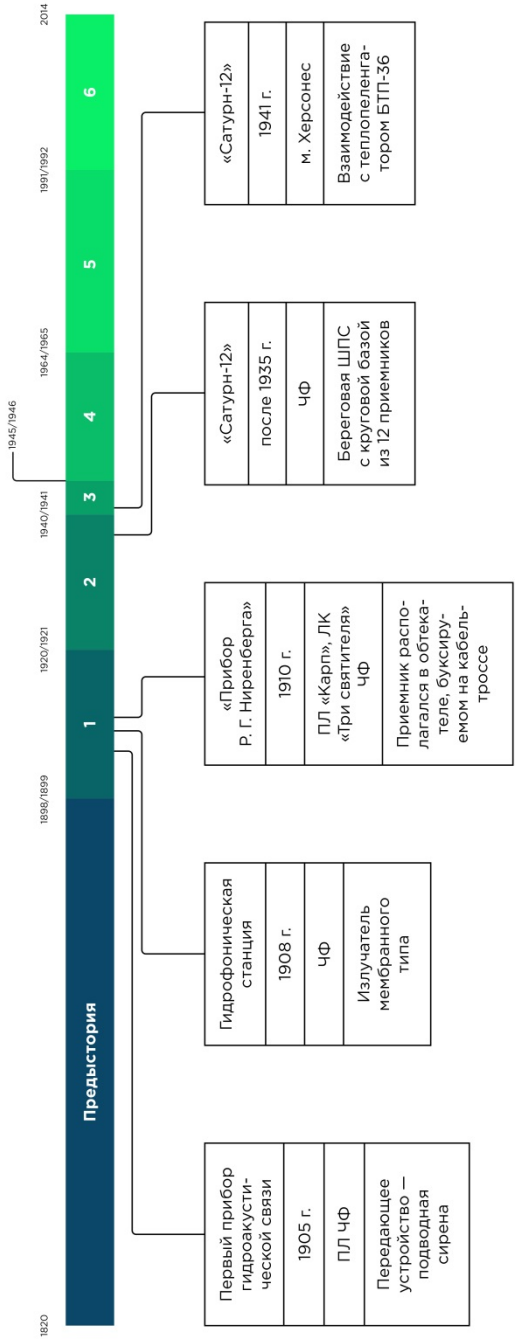


Рис. 1. – Fig. 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИЯХ
НА ЧЕРНОМОРСКОМ ФЛОТЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

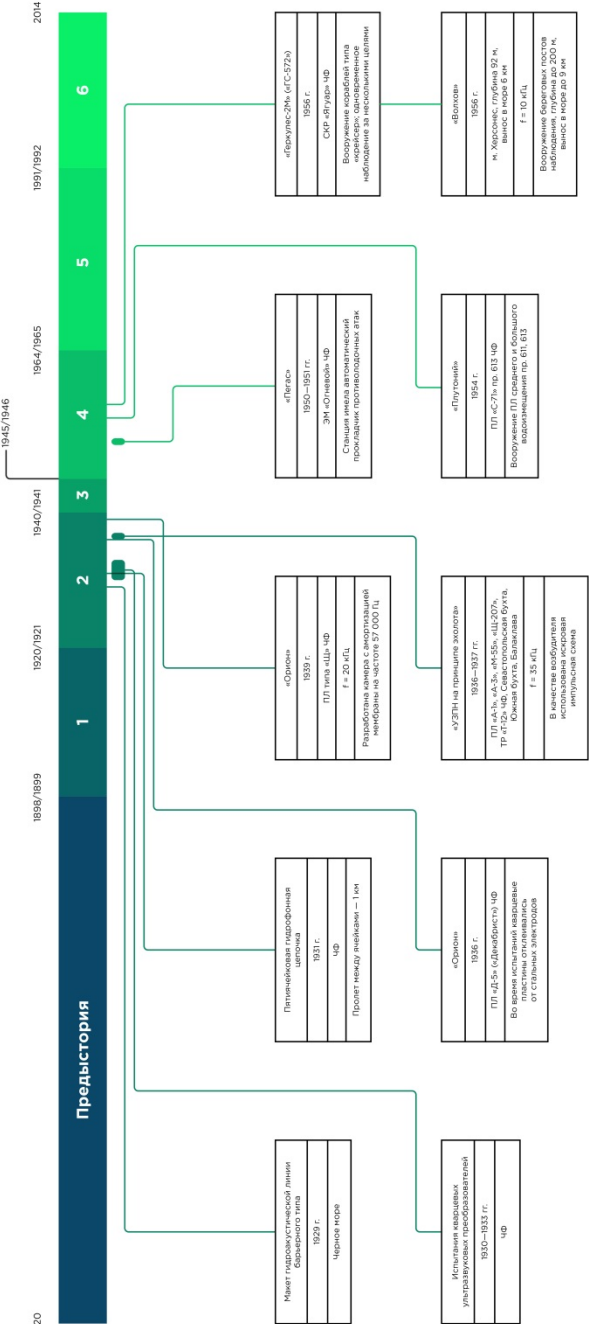


Рис. 2. — Fig. 2

СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИЯХ НА ЧЕРНОМОРСКОМ
ФЛОТЕ СРЕДСТВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ

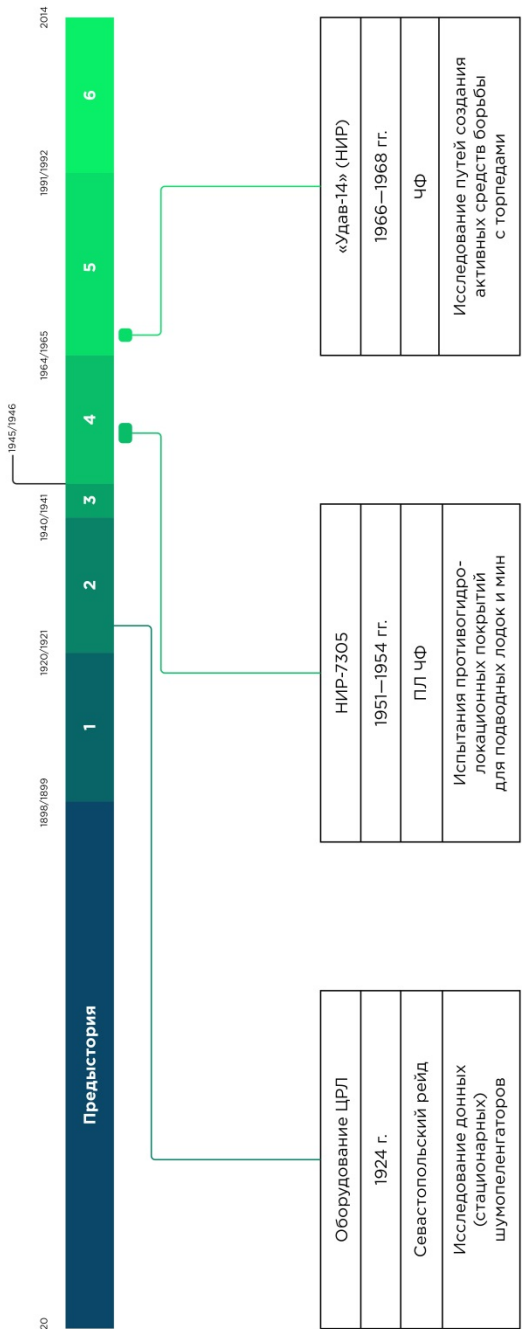


Рис. 3. – Fig. 3

History of Hydroacoustic Testing in the Black Sea Fleet

P. P. Yermolov

Sevastopol State University

33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

ppyermolov@sevsu.ru

Received: January 15, 2026

Peer-reviewed: January 22, 2026

Accepted: January 22, 2026

Abstract: *This article examines the history of testing of hydroacoustic communication and noise direction-finding equipment in the Black Sea Fleet from 1905 to 1941, hydroacoustic underwater surveillance equipment from 1929 to 1956, and hydroacoustic countermeasure and suppression equipment from 1924 to 1968. The research results are presented in a compendium format, summarized in tables, and illustrated with infographics.*

Keywords: *R. G. Nirenberg's device, "Saturn-12", "Orion", "Pegas", "Plutoniya", "Gerkules-2M" (GS-572), "Volkhov", "Udav-14".*

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, "History of Hydroacoustic Testing in the Black Sea Fleet," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 716–736, 2026, doi: 10.21227/1m5f-dr47. (In Russ.).

References

- [1] 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.).
- [2] P. P. Yermolov, "History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. General Detection Radar," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 8, no. 4, pp. 666–686, 2025, doi: 10.21227/gwkd-f371. (In Russ.).
- [3] 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.).
- [4] P. P. Yermolov, "History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Artillery and Torpedo Weapon Control Radar," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 1, pp. 152–166, 2026. (In Russ.).
- [5] P. P. Yermolov, "History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Navigation Radars, Identification Radars and Radar Transceivers," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 350–365, 2026. (In Russ.).
- [6] P. P. Yermolov, "History of Testing of Radar Systems in the Black Sea Fleet. Radar as Part of Missile Weapons Control," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 547–559, 2026. (In Russ.).

- [7] I. S. Zakharov, “Development of domestic hydroacoustic means: early 1920s – late 1950s,” Doctor of Engineering Sciences diss., St. Petersburg, 2004. (In Russ.).
- [8] I. G. Korzh, “The origin and development of domestic hydroacoustic counteraction and suppression (1940s – 1960s),” Cand. Engineering Sciences diss., St. Petersburg, 2010. (In Russ.).
- [9] I. S. Zakharov, “From the history of the development of ultrasonic underwater surveillance devices in the USSR (1933–1941),” *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, iss. 1, pp. 66–77, 2006. (In Russ.).
- [10] G. P. Popov and G. V. Startsev, *Radio electronics in the navy yesterday and today*, Moscow: Voenizdat, 1993. (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.