

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications and Radio Technologies

**Том 6
№ 2**

**Vol. 6
No. 2**



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

2023

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2023

Том 6

№ 2

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (Крым, 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)

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

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия) — заместитель главного редактора

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Калошин Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Электродинамика композиционных сред и структур» Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор кафедры «Радиотехника и системы управления» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт — национальный исследовательский университет» (Москва, Россия)

Кураев Александр Александрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени 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)

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный институт 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» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (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, заведующий кафедрой радиофизики и электроники Физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

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

Ipev Dimov Stojce — professor at Durban University of Technology (South Africa)

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

Нечаев Владимир Дмитриевич — доктор политических наук, профессор РАО, ректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Физические науки (1.3)

Вольвач А. Е., Коган Л. П., Канониди К. Х., Вольвач Л. Н., Боборыкина О. В., Бубукин И. Т., Штернберг В. Б., Дмитроца А. И., Неяченко Д. И. Геофизические исследования землетрясения 6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции	127
---	-----

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Кузьмин Л. В., Ефремова Е. В., Ицков В. В., Владыка П. А. Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиопульсов	139
Алыбин В. Г., Авраменко С. В. Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов	166
Букрин И. В., Плохих О. В., Иванов В. Э. Разработка и результаты испытаний радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц	177
N. A. Torkhov and A. A. Mosunov Diode Character of Local Conductivity of Human Buccal Epithelial Cell Membranes	187
N. A. Torkhov, V. V. Vertegel, M. O. Tkachenko, and A. S. Manko Optimization of the Planar Schottky Diode Structure in THz Range	194
N. A. Bogatov Autonomous Broadband Current Meter on a High-Voltage Electrode	201

История науки и техники (5.6.6)

Пестриков В. М. Продажа Ли де Форестом прав на аудион AT&T и ее значение для развития радиотехники	211
Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 4	250
Пузанков Л. А. Роль радиолюбителей в исследованиях космоса и судьба крымских центров дальней космической связи	260

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2023

Vol. 6

No. 2

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yury Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the RAS (Moscow, Russia)

Editor in Chief

Volvach Alexander Evgenievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Federal State Budgetary Institution of Science “Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences” (Crimea, 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)

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)

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Basic Department “Innovative Radio Electronics” of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia) – Deputy Editor-in-Chief

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 the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

Kaloshin Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Electrodynamics of Composite Media and Structures” of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Professor of the Department of Radio Engineering and Control Systems of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Moscow Institute of Physics and Technology – National Research University” (Moscow, Russia)

Kuraev Aleksandr Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

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 the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

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

Pestrikov Victor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State Institute of Film and Television” (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexander 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 the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow Technical University of Communications and Informatics” (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexander Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems named after V. A. Trapeznikov RAS (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky” (Simferopol, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

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

Ilicev Dimov Stojce – Professor at Durban University of Technology (South Africa)

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

Nechaev Vladimir Dmitrievich – Doctor of Political Sciences, Professor of the Russian Academy of Education, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

Novikov Vladimir Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education “Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P. S. Nakhimov” (Sevastopol, Russia)

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@mail.ru
Website: <http://icrtjournal.com>

Contents

Physical sciences

A. E. Volvach, L. P. Kogan, K. Kh. Kanonidi, L. N. Volvach 1, O. V. Boborykina, I. T. Bubukin, V. B. Shternberg, A. I. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko Geophysical Studies of the February 6, 2023 Earthquake in the Southeast of Turkey	127
---	-----

Electronics, photonics, instrumentation and communications

L. V. Kuzmin, E. V. Efremova, V. V. Itskov, and P. A. Vladyka An Experiment on the Generation of Microwave Chaotic Radio Pulses with Reproducible Waveform	139
V. G. Alybin and S. V. Avramenko Twofold Reserved Solid-State Amplifier of UNF Power for Onboard Equipment of Spacecraft's	166
I. V. Bukrin, O. V. Plokhikh, and V. E. Ivanov Development and Test Results of the 1680 MHz Wind Parameters Radar	177
N. A. Torkhov and A. A. Mosunov Diode Character of Local Conductivity of Human Buccal Epithelial Cell Membranes	187
N. A. Torkhov, V. V. Vertegel, M. O. Tkachenko, and A. S. Manko Optimization of the Planar Schottky Diode Structure in THz Range	194
N. A. Bogatov Autonomous Broadband Current Meter on a High-Voltage Electrode	201

History of science and technology

V. M. Pestrikov Lee de Forest's Sale of Audion Rights to AT&T and Its Importance for the Development of Radio Technics	211
Ye. V. Kondratova1 and V. P. Kolomiychenko IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 4	250
L. A. Puzankov The Role of Radio Amateurs in Space Exploration and the Destiny of the Crimean Centers of Deep Space Communication	260

УДК 550.343

Геофизические исследования землетрясения 6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции

¹ Вольвач А. Е., ² Коган Л. П., ³ Канониди К. Х., ¹ Вольвач Л. Н.,
⁴ Боборыкина О. В., ⁵ Бубукин И. Т., ² Штернберг В. Б.,
¹ Дмитроца А. И., ¹ Неяченко Д. И.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
Ялта, 298688, Российская Федерация

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
ул. Ильинская, д. 65, г. Нижний Новгород, 603000, Российская Федерация

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН
Калужское шоссе, д. 4, г. Москва, г. Троицк, 108840, Российская Федерация

⁴ ФГБУН «Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН»
ул. Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Российская Федерация

⁵ Научно-исследовательский радиофизический институт
при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского
ул. Б. Печерская, д. 25/12а, г. Нижний Новгород 603950, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 22 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрены предвестники землетрясений, произошедших 6 февраля 2023 года с интервалом в девять часов на юго-востоке Турции. Эпицентр первого, с магнитудой 7,8 ($\pm 0,1$), находился в районе Шехиткамиль в Газиянтепе, эпицентр второго, с магнитудой 7,5 ($\pm 0,1$) — в районе Экинёзю в Кахраманмараше. Применяемый подход связан с исследованием изменения энтропии измеряемых полей, которое возникает вследствие активизации процессов разломов литосферных плит непосредственно перед землетрясением. Удалось выявить феномен процессов с высокой степенью детерминированности, возникающих перед сейсмическим событием. Зарегистрировано изменение характера движения станций космической геодезии и геодинамики КРАО по всем координатам за несколько дней до начала блока турецких землетрясений, что говорит об изменении баланса сил в регионе.

Ключевые слова: Земля, магнитное поле, землетрясение, предвестник, Турция.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Геофизические исследования землетрясения 6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции / А. Е. Вольвач и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 127—138.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Геофизические исследования землетрясения 6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции / А. Е. Вольвач, Л. П. Коган, К. Х. Канониди и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. Т. 6, № 2. — С. 127—138.

1. Введение

Земля является очень сложным физическим объектом, изучение которого до сих пор наталкивается на трудности, связанные с необходимостью создания новых методов интерпретации теоретических и экспериментальных данных о глубинных процессах, происходящих в земной коре и окружающем ее пространстве — геосфере. Для изучения этих процессов используются разные методы и инструменты, способные регистрировать низкочастотные акустические, сейсмические и электромагнитные поля.

В последнее время внимание было обращено на возможность использования динамики магнитного поля Земли для проведения диагностики и прогнозирования возникновения явлений, связанных с земными катаклизмами. Вариации магнитного поля могут являться следствием движений земных пород, которые приводят к гравитационным и магнитным возмущениям и отражаются в УНЧ диапазоне длин волн, в том числе на этапе перед возникновением землетрясений. В связи с этим возникает вопрос о разработке новых высокочувствительных магнитометров, необходимых для регистрации незначительных отклонений в величине магнитного поля Земли. Из сказанного следует, что для решения научной задачи прогнозирования катастрофических процессов на Земле необходимо создание научно-технической инфраструктуры, которая могла бы включить в себя станции с аппаратурно-программным обеспечением по слежению и регистрации изменений магнитного поля Земли.

Научная задача по прогнозированию таких сложных процессов на Земле включает в себя такую важнейшую составляющую, как создание систем земной и космической привязки координат друг к другу. Это необходимо для учета движения земных литосферных плит, которые возникают на границах разлома земной коры и часто проходят по дну океанов. Сталкиваясь, плиты «наезжают» одна на другую, создавая мощнейшее давление в земной коре и способствуя прорыву магмы из земных глубин. Это — прямая опасность возникновения мощной активности вулканической деятельности.

Таким образом, контроль над движением литосферных плит земной поверхности является составной частью научной проблемы прогнозирования земных катастроф. Эту часть исследований «обслуживает» геодинамика, которая изучает движение континентов.

В последние десятилетия сформировался набор измерительных средств, позволяющих проводить позиционные наблюдения наивысшего на сегодняшний день уровня точности. К этим средствам относятся радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ, VLBI), спутниковые (SLR) дальнометрические измерения, навигационную систему определения положения (GPS/GLONASS). Эти измерительные технологии позволяют решать широкий круг задач астрометрии, геодезии, геодинамики, в частности, задачи высокоточного координатно-временного обеспечения: определение параметров вращения Земли (ПВЗ), уточнение небесной (ICRF) и земной (ITRF) систем отсчета. С помощью РТ-22 впервые измерено абсолютное значение горизонтальной скорости движения (34,8 мм/год) Крыма в северо-восточном направлении. Определено, что полуостров перемещается относительно Евразийской тектонической плиты с скоростью 3,2 мм/год в северо-восточном направлении.

Для того, чтобы предотвратить значительный ущерб от сейсмической активности, необходимо владеть методами краткосрочного прогнозирования эпицентра будущего землетрясения. С целью исследования геодинимических явлений и выявления предвестников катастрофических событий станциями геодинимического полигона «Симеиз — Кацивели» проведены непрерывные измерения вариаций магнитного поля Земли и создана методика обработки данных с целью получения прогноза возникновения возможных экстремальных событий (землетрясений, вулканов, селей). Вариации магнитного поля, полученные с помощью магнитовариационной станции полигона «Симеиз — Кацивели», планируется рассмотреть в связи с сейсмическими, гравитационными движениями горных пород, которые приводят к гравитационно-магнитным возмущениям в УНЧ диапазоне, в том числе, на заключительном этапе перед землетрясениями.

2. Наблюдения и обработка

Турецкое землетрясение произошло в Восточно-Анатолийском разломе на границе Аравийской тектонической плиты и имело на протяжении суток более 150 толчков с магнитудой $M > 4$, включая 22 толчка с $M = 5,1—5,8$ и 4 мощных толчка с $M = 7,8; 7,5; 6,7$ и $6,0$. Длительное время воздействия и большая магнитуда могли изменить величину и/или направление вектора скорости движения южной части Евразийской плиты.

Мы изучаем свойства статистического функционала из данных измерений магнитного поля Земли, проведенных с 22 января по 6 февраля 2023 года на нескольких магнитовариационных станциях сети *INTERMAGNET*, расположенных в Греции, Крыму и на Кавказе: соответственно магнитометры *PEG*, *SIM*, *BAK* и *GLK*. Данный период времени включает 15 суток перед недавним крайне трагическим землетрясением в Турции с магнитудами 7,8 и 7,5, которое произошло 06.02.2023 в 01:17:34 *UTC* и в 10:24:49 *UTC* соответственно, а также измерения в день данного события (Рис. 1).



Рис. 1. Расположение эпицентра указанного землетрясения и четырех рассматриваемых магнитовариационных станций.

Fig. 1. Location of the epicenter of the indicated earthquake and four considered magnetic variation stations

На Рис. 1 показано расположение эпицентра рассматриваемого землетрясения магнитудой 7,8, начало которого имело место 6 февраля 2023 года в 01:17:35 *UTC* вблизи города Шехиткамиль (Турция). Места распо-

ложения указанных магнитометров выделены красными кружками — заполненными 1 секундные и не заполненными — 1 минутные.

Создан геодинимический полигон «Симеиз — Качивели» (Рис. 2), имеющий наблюдательные средства: РСДБ-станция на базе телескопа РТ-22 «Симеиз», два лазерных спутниковых дальномера («*Simeiz-1873*», «*Katsively-1893*») и две станции *GPS/GLONASS* («*GPS-CrAO*», «*Katsively*»). В силу специфики процесса наблюдений и корреляционной обработки данных оперативность РСДБ-данных не превышает нескольких дней. Поэтому в целях оперативности применяются различные методы комбинации данных РСДБ и спутниковых данных для исследования изменения со временем северной, вертикальной и восточной компоненты координат.

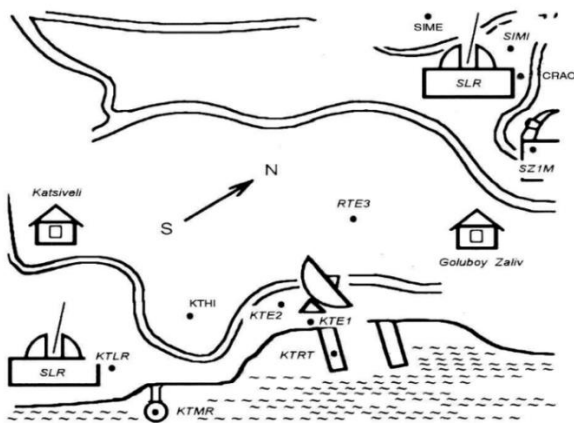


Рис. 2. Геодинимический полигон «Симеиз — Качивели».

Fig. 2. Geodynamic polygon "Simeiz-Katsiveli"

3. Результаты

С 1994 года в Крымской астрофизической обсерватории начаты исследования по геодинимическим программам. Радиотелескоп РТ-22 вместе с двумя лазерными станциями, расположенными в радиусе 3 км, образуют геодинимический полигон «Симеиз — Качивели», который расположен на южном побережье Крымского полуострова около поселка Симеиз, в 20 км к западу от города Ялта. Станции космической геодезии и геодинимики КрАО с самой высокой на сегодняшний день точностью проводят координатные измерения для уточнения скорости и направления движения Крыма.

На Рис. 3 приведены спутниковые данные изменения северной (*N*), вертикальной (*U*) и восточной (*E*) компоненты координат за период январь—февраль 2023 года.

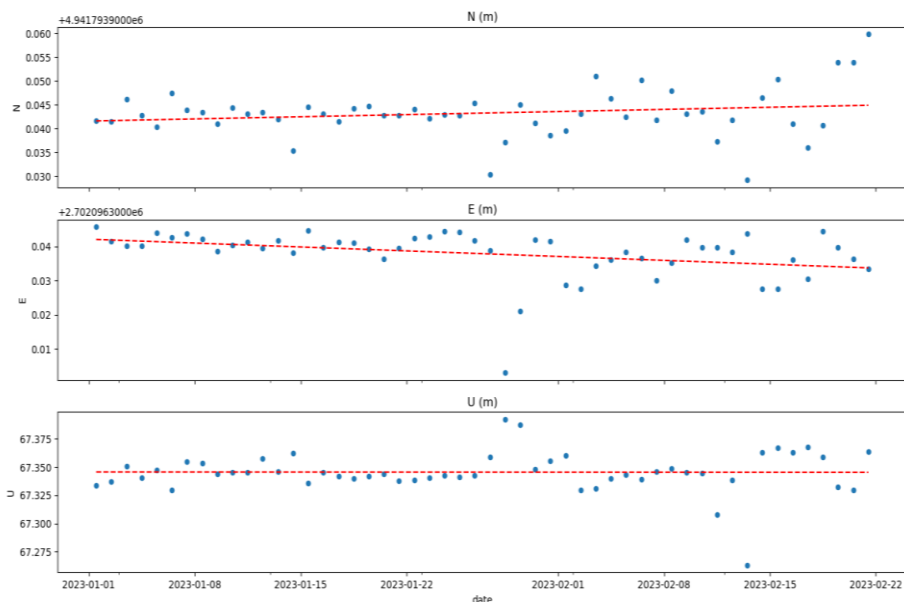


Рис. 3. Геодинамический полигон «Симеиз — Кацивели» — изменения со временем северной, вертикальной и восточной компоненты координат станций.

Fig. 3. Geodynamic polygon “Simeiz–Katsiveli” — changes with time of the northern, vertical and eastern components of the coordinates of the stations

В кооперации ведущих институтов КраО, ИЗМИРАН, ИФЗ, ИПГ, ННГАСУ с помощью модернизированного оборудования проведен непрерывный мониторинг магнитовариационных и наклономерных измерений в пункте Кацивели. Проведено изучение свойств статистического функционала из набора измерений магнитного поля, проведенных с 22 января по 6 февраля 2023 года на нескольких магнитовариационных станциях, расположенных Крыму, на Кавказе и в Греции. Данный период времени включает 15 суток перед недавним крайне трагическим землетрясением в Турции с магнитудой 7,5, которое произошло 6.02.2023 в 01:17:35 UTC, а также измерения непосредственно в день данного события. Использован метод, развитый в [1—5].

С целью исследования геодинамических явлений и выявления предвестников катастрофических событий разработана методика, позволяющая обнаруживать влияние процесса «итоговой подготовки» сейсмических событий. Применяемый подход связан с исследованием изменения энтропии измеряемых полей, которое возникает вследствие активизации процессов разломов литосферных плит непосредственно перед землетрясением.

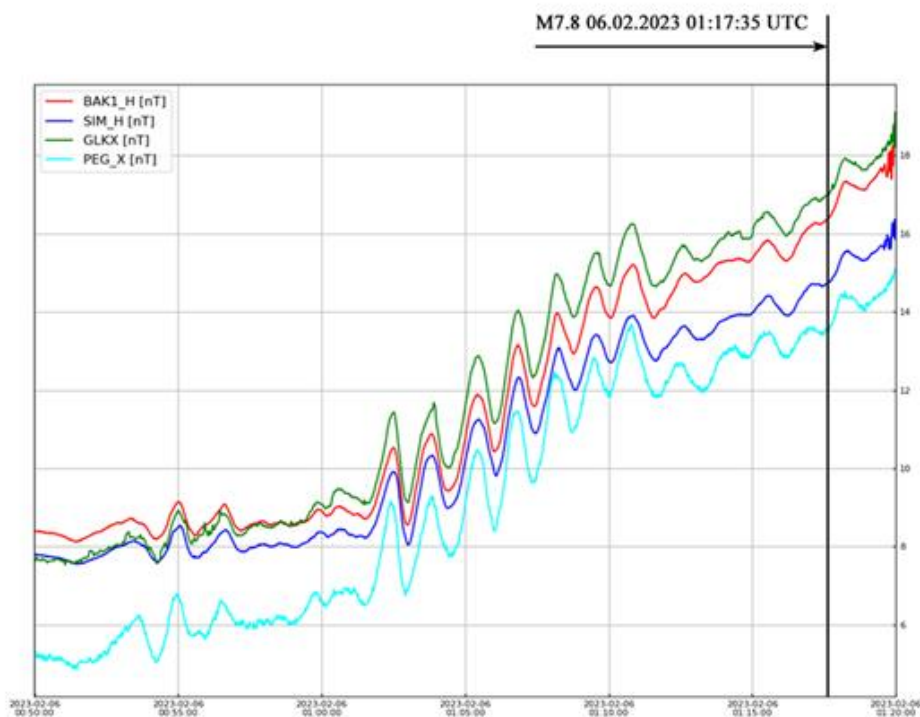


Рис. 4. X-компонента геомагнитного поля по данным магнитометров *BAK*, *SIM*, *GLK* и *PEG* (кривые 1, 2, 3, 4).

Fig. 4. X-component of the geomagnetic field according to the *BAK*, *SIM*, *GLK*, and *PEG* magnetometers (curves 1, 2, 3, 4)

На Рис. 5 приведены зависимости $L(n)$ (кривые 1—4, см (1)) и $S(n)$ (линия 5, см. (3)), построенные по измерениям X-компоненты геомагнитного поля на четырех указанных магнитометрах. Синяя кривая 1 отвечает данным магнитовариационной станции *SIM*, красная линия 2, желтая кривая 3 и бирюзовая линия 4 — соответственно магнитометрам *GLK*, *BAK* и *PEG*. Зеленая кривая 5 отвечает значениям разностного коррелятора $S(n)$. Пунктирными контурами выделены области наибольшего топологического подобия кривых 1—4, которым соответствуют три наиболее высоких максимума зависимости 5. Соответствующие интервалы времени выделены утолщенными зелеными отрезками на оси абсцисс.

В основе применяемого подхода лежит обнаружение эффекта значительного изменения амплитуды мелкомасштабных вариаций плотности вероятности любого случайного процесса, когда в его составе появляется

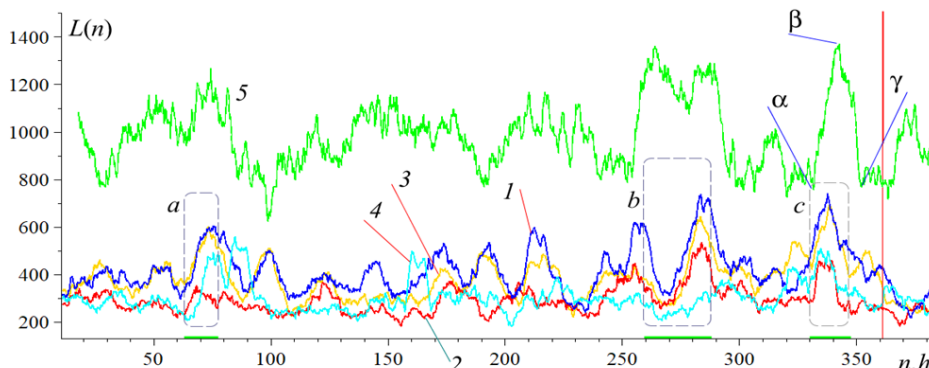


Рис. 5. Зависимости $L(n)$ для измерений X -компоненты геомагнитного поля по данным магнитометров *SIM*, *GLK*, *BAK* и *PEG* (соответственно кривые 1, 2, 3 и 4), а также коррелятор $S(n)$ (кривая 5). Пунктирными контурами выделены области с наиболее значительным уровнем топологического подобия кривых 1—4.

Fig. 5. Dependences $L(n)$ for measurements of the X -component of the geomagnetic field according to the magnetometers *SIM*, *GLK*, *BAK*, and *PEG* (curves 1, 2, 3, and 4, respectively), as well as the correlator $S(n)$ (curve 5). The dotted contours highlight the regions with the most significant level of topological similarity of curves 1—4

даже небольшой дополнительный член, который независим или слабо зависит от фоновой шума. Под фоновым шумом мы понимаем набор обычно наблюдаемых случайных процессов (включая, в частности, шум измерительного оборудования), которые не связаны или слабо связаны с возмущениями, возникающими при разрыве литосферных плит.

Принципиально важным является вывод о том, что влияние процесса «итоговой подготовки» приближающегося сейсмического события, и в особенности это относится к сильным землетрясениям, с высокой вероятностью одновременно будет приводить к квазисинхронным вариациям статистики измерений в разных, и в том числе достаточно удаленных, географических районах. Далее это утверждение верифицируется по данным четырех магнитовариационных станций, расположенных в Греции, в Крыму, на Северном Кавказе и в Армении (соответственно магнитометры *PEG*, *SIM*, *BAK* и *GLK*).

4. Дискуссия и выводы

С 1994 года в Крымской астрофизической обсерватории начаты исследования по геодинамическим программам. Радиотелескоп РТ-22 вместе с двумя лазерными станциями, расположенными в радиусе 3 км, образуют геодинамический полигон «Симеиз — Кацивели», который расположен на южном побережье Крымского полуострова около поселка Симеиз, в 20 км к за-

паду от города Ялта. После создания GNSS пунктов у станции лазерной локализации *Simeiz-1873* в 2000 году (CRAO) и около СЛЛ Кацивели-1893 в 2009 году (KTVL), была организована локальная обработка своих данных и данных других станции. Для этого используется пакет программ *GAMIT/GLOBK*. По результатам обработки (Рис. 3) зарегистрировано изменение характера движения станций по всем координатам за неделю до начала блока турецких землетрясений, что говорит об изменении баланса сил в регионе.

Для обнаружения предшественника мы использовали сеть магнитометров, что позволило отфильтровать геомагнитные вариации различной природы. Кроме того, при поиске возможной реакции геомагнитного поля на предстоящее землетрясение мы проверяли состояние в этот момент геомагнитной активности по трехчасовым индексам K_p .

Как следует из анализа Рис. 4, по мере приближения момента начала землетрясения появляются области выраженного топологического сходства кривых геомагнитного поля для магнитовариационных станций *SIM*, *GLS*, *PEG* и *BAK*. В частности, для X -компоненты геомагнитного поля отчетливо выделяется область топологического подобия в интервале от 25 до 30 мин до землетрясения. Эффект сходства топологии кривых геомагнитного поля можно объяснить как следствие синхронного влияния процесса «окончательной подготовки» приближающегося события. Первый наиболее значительный уровень топологического подобия кривых X -компоненты геомагнитного поля для четырех магнитометров 1—4 (область a , выделенная пунктирными контурами на рис. 5) находится в интервале 280—300 часов до землетрясения.

Учитывая статистический смысл функционала $L(n)$, эффект подобия топологии зависимостей $L(n)$ можно объяснить как следствие синхронного влияния влияния «окончательной подготовки» процесса приближающегося события; зона такого влияния с большой вероятностью должна была охватить весь регион в радиусе до нескольких тысяч километров от точки будущего эпицентра.

Указанное свойство зависимости $L(n)$ для магнитометра *BAK* можно интерпретировать как следствие значительно более интенсивного, по сравнению с тремя другими станциями, влияния случайного члена, связанного с подготовкой землетрясения. В случае подобного явления по отношению к другим сильным сейсмическим событиям этот эффект может помочь определить направление на точку будущего эпицентра.

Подобный эффект был ранее зарегистрирован для землетрясений гораздо меньшей магнитуды [6, 7] и, в случае дальнейшего подтверждения, может быть использован для прогнозирования предстоящих сейсмических событий.

Список литературы

1. Вольвач А. Е., Коган Л. П., Канониди К. Х. Способ определения вероятности возникновения землетрясений на основе выявления феноменов с высоким уровнем детерминированности / Патент. 2778972 РФ, СПК G01V 1/008 (2022.08); G01V 3/38 (2022.08). № 2021122118 : заявл. 26.07.2021 : опубл. 29.08.2022. 2022. Бюл. № 25. 7 с.
2. Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor / A. E. Volvach et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2022. Т. 108. С. 106200.
3. Kogan L. P., Bubukin I. T., Shtenberg V. B. To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Т. 145. С. 110807.
4. A possible relationship between the sets of quasi-linear local trends statistically detected in the variations of the magnetic field parameters before earthquakes in seismically active zones of the Black Sea, Caucasus, and western Asia / A. E. Volvach et al. // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Т. 13. № 5. С. 0680.
5. Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula / A. E. Volvach et al. // Heliyon. 2022. Т. 8. №. 8. С. e10200.
6. About Statistical Precursor Earthquakes on October 12, 2021 with a Magnitude of 6.4 on the Island of Crete / A. Volvach et al. // Romanian Journal of Physics. 2023. Т. 68, № 1-2. С. 801.
7. О сопоставлении свойств статистического функционала от измерений магнитного поля в середине русской континентальной платформы и в сейсмически активном регионе / А. Е. Вольвач и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63, № 2. С. 257—272.

Информация об авторах

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

Коган Лев Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Канониди Константин Харлампиевич, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Российская Федерация.

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

Боборыкина Ольга Викторовна, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, Москва, Российская Федерация.

Бубукин Игорь Тимофеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Штенберг Валерия Борисовна, кандидат физико-математических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Российская Федерация.

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

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

Geophysical Studies of the February 6, 2023 Earthquake in the Southeast of Turkey

A. E. Volvach¹, L. P. Kogan², K. Kh. Kanonidi³, L. N. Volvach¹,
O. V. Boborykina⁴, I. T. Bubukin⁵, V. B. Shternberg²,
A. I. Dmitrotsa¹, and D. I. Neyachenko¹

¹Department of Radio Astronomy and Geodynamics,
Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,
Yalta, 298688, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Ilinskaya str., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation

³Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
n. a. N. V. Pushkov RAS
4, Kaluga highway, Moscow, Troitsk, 108840, Russian Federation

⁴Institute of Physics of the Earth n. a. O. Yu. Schmidt RAS
10, B. Gruzinskaya str., build. 1, Moscow, 123242, Russian Federation

⁵Research Radiophysical Institute
at the Nizhny Novgorod State University n. a. N. I. Lobachevsky
25/12a, B. Pecherskaya str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: May 22, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: The precursors of earthquakes that occurred on February 6, 2023 with an interval of nine hours in the southeast of Turkey are considered. The epicenter of the first, with a magnitude of 7.8 (± 0.1), was located in the Shehitkamil area in Gaziantep, the epicenter of the second, with a magnitude of 7.5 (± 0.1), was in the Ekinyozu area in Kahramanmaraş. The approach used is related to the study of the change in the entropy of the measured fields, which occurs as a result of the activation of the processes of faults of lithospheric plates immediately before an earthquake. It was possible to reveal the phenomenon of processes with a high degree of determinism that occur before a seismic event. A change in the nature of the movement of stations of space geodesy and geodynamics of the CrAO for all coordinates was registered a few days before the start of the block of Turkish earthquakes, which indicates a change in the balance of forces in the region.

Keywords: Earth, magnetic field, earthquake, precursors, Türkiye.

For citation (IEEE): A. E. Volvach et al., “Geophysical Studies of the February 6, 2023 Earthquake in the Southeast of Turkey”, Infocommunications and Radio Technologies, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 127–138, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.11. (In Russ.).

References

- [1] A. E. Volvach, L. P. Kogan, and K. Kh. Kanonidi, Method for determining the probability of occurrence of earthquakes based on the detection of phenomena with a high level of determinism : Patent. 2778972 RF, SPK G01V 1/008 (2022.08); G01V 3/38 (2022.08). No. 2021122118 : App. 07/26/2021 : publ. 08/29/2022. 2022. Bull. No. 25. (In Russ.).
- [2] A. E. Volvach et al., "Changes in the properties of the statistics of physical and biophysical fields as earthquake precursor," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 108, pp. 106200–106200, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cnsns.2021.106200.
- [3] L. P. Kogan, I. T. Bubukin, and V. B. Shtenberg, "To the question of calculating the probability of strong earthquakes in real time," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 145, pp. 110807–110807, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.chaos.2021.110807.
- [4] A. E. Volvach et al., "A Possible Relationship between the Sets of Quasi-Linear Local Trends Statistically Detected in the Variations of the Magnetic Field Parameters before Earthquakes in Seismically Active Zones of the Black Sea, Caucasus, and Western Asia," *Geodynamics & Tectonophysics*, vol. 13, no. 5, p. 0680, doi:10.5800/GT-2022-13-5-0680.
- [5] A. E. Volvach et al., "Statistical precursors of a strong earthquake on April 6, 2009 on the Apennine Peninsula," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10200, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10200.
- [6] A. Volvach et al., "About Statistical Precursor Earthquakes on October 12, 2021 with a Magnitude of 6.4 on the Island of Crete," *Romanian Journal of Physics*, vol. 68, no. 1-2, 2023.
- [7] A. Volvach et al., "On a comparison of the properties of a statistical functional from measurements of the magnetic field in the mid of the Russian continental platform and in a seismically active region," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 63, no. 2, pp. 257–272, 2023. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016794022600454.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Lev P. Kogan, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Konstantin Kh. Kononidi, Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Propagation of Radio Waves. N.V. Pushkov RAS, Moscow, Russian Federation.

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Olga V. Boborykina, O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russian Federation.

Igor T. Bubukin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Research Institute of Radio Physics, N. I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Valeria B. Shtenberg, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Andrey I. Dmitrotsa, researcher of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, town. Nauchny, Crimea, Russian Federation.

Dmitry I. Neyachenko, junior researcher of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, town. Nauchny, Crimea, Russian Federation.

УДК 621.396

Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов

Кузьмин Л. В., Ефремова Е. В., Ицков В. В., Владыка П. А.

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, д.11, стр. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
lvkuzmin@gmail.com*

Получено: 19 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: *Предлагается метод генерации хаотических радиоимпульсов при помощи аналогового генератора хаотических колебаний. Метод позволяет воспроизводить форму импульсов как одним и тем же экземпляром генератора хаотических колебаний, так и разными экземплярами конструктивно идентичных генераторов. Форма импульсов управляемо изменяется и воспроизводится путем изменения напряжения питания генератора хаотических колебаний. Разработан макет из четырех генераторов, экспериментально доказывающий данную возможность в диапазоне частот от 100 до 500 МГц. Предлагаемый метод необходим для создания способов когерентного приема хаотических СШП колебаний СВЧ диапазона и для когерентного излучения хаотических сигналов в задачах диаграммобразования.*

Ключевые слова: *сверхширокополосные хаотические радиоимпульсы, сверхширокополосные сигналы, хаотические сигналы, когерентное излучение хаотических сигналов.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов / Л. В. Кузьмин и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 2. С. 139—165.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Эксперимент по генерации близких по форме сверхвысокочастотных хаотических радиоимпульсов / Л. В. Кузьмин, Е. В. Ефремова, В. В. Ицков, П. А. Владыка // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 139—165.

1. Введение

С конца XX века использование сверхширокополосных (СШП) сигналов [1], [2] в беспроводных системах массового назначения находится в центре внимания научного сообщества. Начало работы над массовым внедрением СШП-решений, предназначенных для использования на безлицензионной основе, связывают с внедрением спектральной маски FCC США [3], [2] и последующей разработки ряда международных стандартов СШП беспроводной связи, таких как IEEE 802.15.3a [4, 5] (в итоге не принят), IEEE 802.15.4a [6], IEEE 802.15.6 [7] и IEEE 802.15.4z [8–10]. Ряд крупных производителей бытовой электроники уже включили в свои устройства СШП-решения [11, 12].

Новое на то время направление массовой СШП связи стало стимулом для поиска сигналов нового типа, которые сочетали бы в себе возможность удовлетворять требованиям спектральной маски (распределение энергии сигнала по СШП диапазону частот), формировать сигналы с требуемой энергетикой на бит, управлять спектром и формой колебаний. В этом контексте внимание исследователей привлекла идея использования хаотических сигналов и генераторов хаоса для получения шумоподобных колебаний при помощи технически простых устройств и использования таких сигналов в схемах связи [13–16].

На сегодняшний день сложились два подхода к применению хаотических сигналов: в качестве псевдослучайных последовательностей, предназначенных для расширения спектра и организации накопления, и в качестве несущих колебаний в радиодиапазоне.

И в том, и в другом случае имеется проблема синтеза сигналов с заданными спектральными, кросс- и автокорреляционными свойствами. На сегодняшний день имеется множество примеров синтеза сигналов специальной формы как для ортогонализации сигналов, так и для синтеза сигналов с минимальной взаимной корреляцией. С вовлечением хаотических сигналов в поле зрения специалистов по передаче информации эта задача также стала решаться и для них.

В первую очередь следует упомянуть различные способы применения фрагментов хаотических сигналов при передаче цифровой информации при помощи позиционной модуляции (ПМ) [17, 26, 27, 29], и частотной модуляции несущей [20] хаотическим сигналом, применения дискретных систем (отображений) с хаосом для реализации перескока по частоте [28]. Хаотические последовательности применяются для модуляции положения и знака сверхширокополосных ультракоротких импульсов (УКИ) [18, 19, 21, 24, 25] в рамках позиционной модуляции, где символы коди-

руются последовательностями УКИ с хаотическим интервалом между ними. Позиционная модуляция с использованием хаотических сигналов применяется в подводной связи [22, 23].

Популярным является применение хаотических последовательностей и хаотических сигналов, как сигналов с большой размерностью (базой), для организации расширения спектра и накопления. Например, в [30] рассматриваются кодовые последовательности из УКИ на базе хаотических последовательностей в сочетании с ПМ модуляцией. В [31] анализируется возможность использования дискретных хаотических последовательностей для расширения спектра в CDMA. В [32] также рассматривается использование СШП УКИ, из которых составляются последовательности $+1$ и -1 , которые генерируются логистическим отображением, в том числе для отбеливания спектра сигнала. В [33] предлагаются расширяющие последовательности, получаемые на базе пространственно-временных отображений с хаосом. В [34] рассматриваются хаотические расширяющие последовательности в комбинации с преобразованием Фурье. В работах [35–37] развивается подход к синтезу импульсных хаотических сигналов, допускающих когерентный прием без знания копии сигнала в приемнике.

Хаотические последовательности и хаотические отображения используются как средство для синтеза дискретных последовательностей с заданными авто- и кросскорреляционными свойствами. Например, в [40] предлагается метод генерации таких последовательностей. В [39] предлагается метод формирования хаотических последовательностей, который устраняет периодичность при использовании хаотических отображений из-за конечной машинной точности. В [38] рассматривается задача синтеза последовательностей на базе логистического отображения и последовательности Фибоначчи для устранения периодичности в сигналах, генерируемых цифровыми системами. В [41] описывается способ генерации псевдослучайных хаотических последовательностей на базе ПЛИС. В [43] ставится и решается задача по синтезу расширяющих последовательностей, превосходящих по своим характеристикам последовательности Голда. В [42] улучшают статистические свойства дискретных последовательностей, полученных на базе логистического отображения с хаосом. В [44] предлагается метод синтеза расширяющих последовательностей на основе хаотических отображений для спутниковой навигационной системы.

В ряде работ исследуются аспекты оптимального обнаружения хаотических последовательностей за счет накопления. В [48] рассматривается задача восстановления хаотического отображения, используемого для хаотической ПМ, при помощи фильтра Калмана. В [45] предлагается способ

формирования хаотических последовательностей, которые по критерию достоверности их обнаружения в канале с шумом должны быть лучше, чем последовательности Голда. В [46] анализируют вопросы обнаружения дискретных хаотических последовательностей и устанавливаются критерии их обнаружения. В [47] исследуются вопросы слепого обнаружения хаотического сигнала при помощи нейронной сети.

Помимо цифровых методов генерации фрагментов хаотических сигналов, описанных выше, ведутся также работы по созданию методов аналогового формирования. Например, в [52] предлагается метод формирования последовательности импульсов с хаотическими интервалами между ними, для чего применяется система Лоренца. В [50] предлагается генератор гауссовых импульсов в виде микросхемы для СШП импульсных радиосистем. В [51] описывается генератор последовательности хаотических радиоимпульсов при помощи клистрона, а в [49] те же авторы описывают генератор хаотического СШП сигнала в СВЧ диапазоне на основе ЛБВ с пиковой мощностью 22,5 Вт.

Наконец, нельзя не упомянуть о возможных и перспективных приложениях хаотических последовательностей для задач пространственного разделения сигналов и диаграммообразования в перспективных беспроводных системах. В [53] обсуждаются радары на основе *MIMO* (*multiple input multiple output*) с большим расстоянием между антеннами. В [54] ставится задача по формированию узких диаграмм направленности (функции неопределенности) для радаров на хаотических сигналах. В [55] обсуждается проблема направленной передачи информации за счет пространственно-частотного разделения, достигаемого при помощи хаотических последовательностей.

В упомянутых работах речь идет о синтезе хаотических сигналов при помощи цифровых систем. Вместе с тем за кадром остаются возможности по синтезу хаотических сигналов при помощи аналоговых систем, аналоговых генераторов. С инженерно-практической точки зрения это более удобно, так как отпадает необходимость в переносе цифрового сигнала на радиочастоту.

Применение аналоговых способов генерации хаотических колебаний наталкивается на принципиальную трудность, связанную с чувствительностью хаотических колебаний к начальным условиям, что препятствует управляемому (предсказуемому) формированию хаотических сигналов заданной формы и их повторению как одним и тем же генератором хаотических колебаний, так и разными экземплярами генераторов. Обзор показывает, что тематика воспроизводимости хаотических аналоговых сигналов практически не анализировалась. Вместе с тем это насущная

техническая проблема и принципиальная задача, если ставить вопросы о когерентных методах обработки хаотических сигналов, в которых в том или ином виде участвуют аналоговые источники хаотических колебаний.

Новизна настоящей работы в том, что ставится и решается задача создания источников хаотических колебаний на основе аналоговых генераторов хаоса, которые, во-первых, могут генерировать хаотические сигналы разнообразной формы непосредственно в СВЧ диапазоне; во-вторых, эту форму можно повторять и воспроизводить различными образцами генераторов.

Ранее было показано [56—58], что в определенных пределах возможно воспроизведение начального участка хаотического сигнала при формировании хаотических радиоимпульсов, которые используются в прямохаотической схеме передачи информации в микроволновом диапазоне частот (*DCC*) [59, 60]. Прямохаотические средства беспроводной передачи информации используются в персональных и локальных беспроводных сенсорных сетях [14, 61—65], в активных сенсорных сетях. В данной работе эти результаты стали основой для дальнейшего развития способов формирования хаотических радиоимпульсов, управляемых по форме и допускающих повторение формы импульсов.

Цель данной работы — показать, что при помощи аналогового генератора, формирующего СШП хаотический сигнал, можно решать задачи по формированию аналоговых импульсных сигналов различной формы, которые генерируются одним и тем же источником хаоса, и которые могут повторяться по форме от импульса к импульсу. Показывается, что можно воспроизводить импульсы одной и той же формы разными экземплярами конструктивно идентичных генераторов хаотических сигналов.

В статье описывается структура генератора хаоса, показывается, что в данной модели имеют место хаотические колебания. Приводится описание макета, состоящего из четырех различных экземпляров генераторов, на которых показывается возможность генерации близких по форме хаотических радиоимпульсов как в численной модели, так и в экспериментальном макете.

2. Структура генератора

Механизм и способ формирования близких по форме хаотических радиоимпульсов исследовался на базе схмотехнической модели генератора (использовалась при численном моделировании), и экспериментального макетирования. В макете были реализованы четыре экземпляра конструктивно идентичных генераторов. Экспериментальное подтверждение

возможности формирования и воспроизведения импульсов разной формы дает возможность оценить в полном объеме влияние факторов, которые будут влиять на форму хаотических колебаний из-за чувствительности траекторий к начальным условиям в хаотическом режиме генерации. Влияние таких факторов сложно учесть путем численного моделирования.

Рассматриваемый здесь генератор относится к семейству моделей одностранзисторных генераторов, теоретические и экспериментальные подходы к созданию которых разрабатывались в течение ряда лет. Отправной точкой был осциллятор Колпитца, существование хаотических режимов в котором было показано в [66].

Генератор, рассматриваемый в данной работе, появился в результате цикла работ [67—69], в которых были созданы источники хаотических колебаний, пригодные для практических инженерных приложений, которые обеспечивают хаотические колебания в требуемой полосе частот с широкими зонами хаотических мод в пространстве параметров, чем обеспечивается устойчивая генерация хаотических колебаний в условиях разброса номиналов радиодеталей и нестабильности электропитания в реальных технических системах.

Отличие предложенного в настоящей работе генератора от схемы Колпитца заключается, во-первых, в дополнении его частотно-избирательной системой, которая формирует СШП хаотические колебания в предписанном частотном диапазоне, во-вторых, в переходе к одному питанию, при помощи которого осуществляется управление режимом работы генератора (Рис. 1).

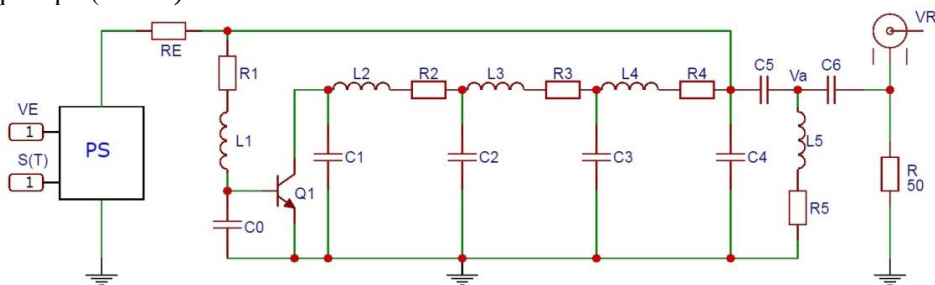


Рис. 1. Схема генератора хаотических колебаний: PS – модулятор питания, V_E – амплитуда питания, $s(t)$ последовательность видеоимпульсов, V_R – сигнал на выходе генератора.

Fig. 1. Scheme of the chaotic oscillation generator: PS is the power supply modulator, V_E is the power supply amplitude, $S(T)$ is the sequence of video pulses, V_R is the generator output signal

Согласно методу [56—58], СШП хаотические радиоимпульсы в таком генераторе формируются путем включения и выключения питания (V_E) в заданные интервалы времени. Питание включается и выключается

внешним видеосигналом $s(t)$. Режим работы генератора в моменты включения питания определяется амплитудой видеоимпульсов V_E . С точки зрения радиотехники возбуждение колебаний происходит, когда за счет подачи питания открывается переход база — эмиттер транзистора, если амплитуды V_E для этого достаточно.

Состояние покоя генератора эквивалентно стационарным токам и напряжениям, установившимся в системе на рис. 1 под действием постоянного напряжения питания V_E : токи через индуктивности равны нулю, разность потенциалов в точке A и на нагрузке R равны нулю, напряжения на емкостях $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ складывается в результате деления напряжения питания V_E сопротивлениями $R_E, R_1...R_4$.

Динамика системы исследовалась для значений параметров $L_1 = 55$ нН; $L_2 = 110$ нН; $L_3 = 47$ нН; $L_4 = 12$ нН; $L_5 = 33$ нН; $C_0 = 0.4$ пФ; $C_1 = 1.5$ пФ; $C_2 = 10$ пФ; $C_3 = 15$ пФ; $C_4 = 15$ пФ; $C_5 = 5$ пФ; $C_6 = 10$ пФ; $R_E = 150$ Ом; $R = 50$ Ом; $R_1 = 25$ Ом; $R_2 = 25$ Ом; $R_3 = 25$ Ом; $R_4 = 25$ Ом; $R_5 = 25$ Ом; $\beta = 200$, для которых имеют место режимы хаотических колебаний в широкой области значений напряжения питания V_E (рис. 2).

Данная модель генератора стала основой, на базе которой был разработан описываемый ниже экспериментальный макет.

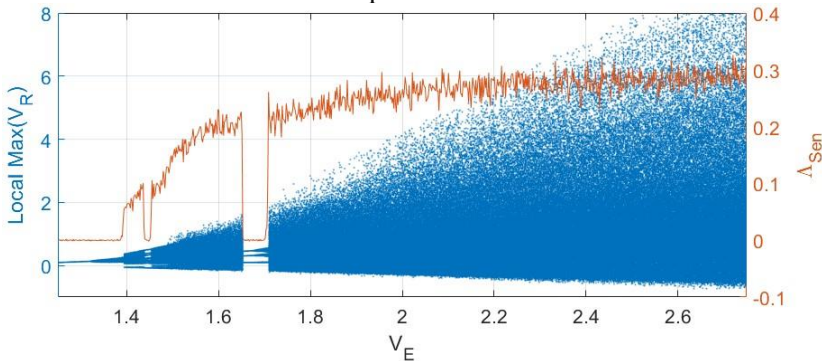


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма (синий, левая шкала) и старший показатель Ляпунова (красный, правая шкала) системы на рис. 1 от напряжения питания V_E .

Fig. 2. Bifurcation diagram (blue, left scale) and the leading Lyapunov exponent (red, right scale) of the system in Fig. 1 from supply voltage V_E

3. Экспериментальный макет

Экспериментальная проверка концепции, излагаемая в статье, проводилась путем сравнения хаотических колебаний, формируемых четырьмя различными экземплярами генераторов хаотических колебаний, выполненных на единой печатной плате из одностипных радиоэлементов (Рис. 3).

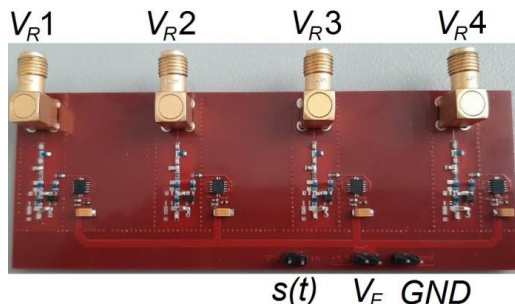


Рис. 3. Внешний вид макета из четырех однотипных генераторов хаоса (Рис. 1): $s(t)$ — вход для управляющего сигнала, V_E — вход для подачи общего для всех генератора питания, GND земля, $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ — СВЧ выходы генераторов.

Fig. 3. Appearance of a layout of four identical chaos generators (Fig. 1): $s(t)$ – input for a control signal, V_E – input for supplying a common power generator for all, GND ground, $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ – microwave outputs of generators

Точность подбора номиналов составляла 2 %. Использовались радиоэлементы общего назначения, доступные в свободной продаже. Топология генераторов была идентичной.

Принципиальная электрическая схема каждого генератора соответствует Рис. 1. В макете отсутствуют пассивные сопротивления индуктивностей в виде отдельных радиоэлементов ($R_1 = 0 \text{ Ohm}$, $R_2 = 0 \text{ Ohm}$, $R_3 = 0 \text{ Ohm}$, $R_4 = 0 \text{ Ohm}$, $R_5 = 0 \text{ Ohm}$). В численной модели эти сопротивления необходимы для имитации диссипации энергии, которые неизбежно присутствуют в реальном устройстве, и которую невозможно учесть в полном объеме в рамках математической модели на уровне законов Кирхгофа. В макете сопротивления в виде отдельных элементов не нужны, так как у индуктивностей имеется самостоятельное пассивное сопротивление, и имеется естественная диссипация и нелинейность реального транзистора, которая обеспечивает ограниченность амплитуды колебаний.

Экспериментальная проверка возможности формирования близких по форме хаотических радиоимпульсов и их воспроизведения разными экземплярами генератора осуществлялась на стенде (Рис. 4) в соответствии со схемой на Рис. 4а.

Подача питания на генераторы хаотических колебаний реализована через общий для всех генераторов вход питания V_E , от которого питание подводится на каждый генератор в отдельности. Длина проводников питания, соединяющих общий для всех генераторов вход по питанию со входом питания каждого генератора в отдельности, была выбрана равной для обеспечения совпадения момента времени включения генераторов. Постоянное питание с напряжением V_E , подаваемое от стабилизированного источника

питания, модулировалось ключами M_1 , M_2 , M_3 и M_4 под управлением модулирующего сигнала $S(t)$ так, что подача питания V_E на генератор осуществляется, если $s(t) = 0$, и питание на генератор не подается, если $s(t) = 1$.

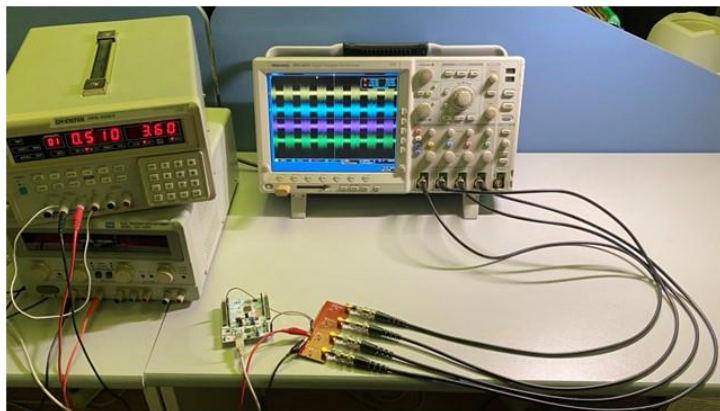
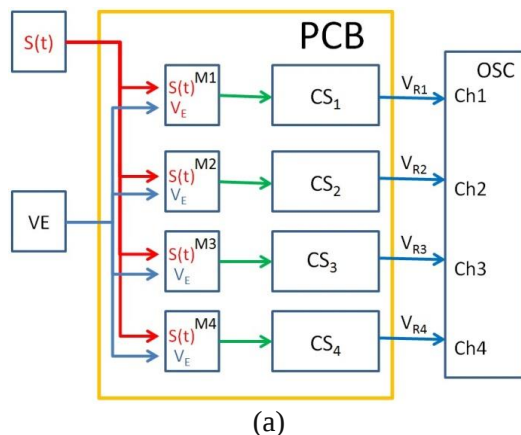


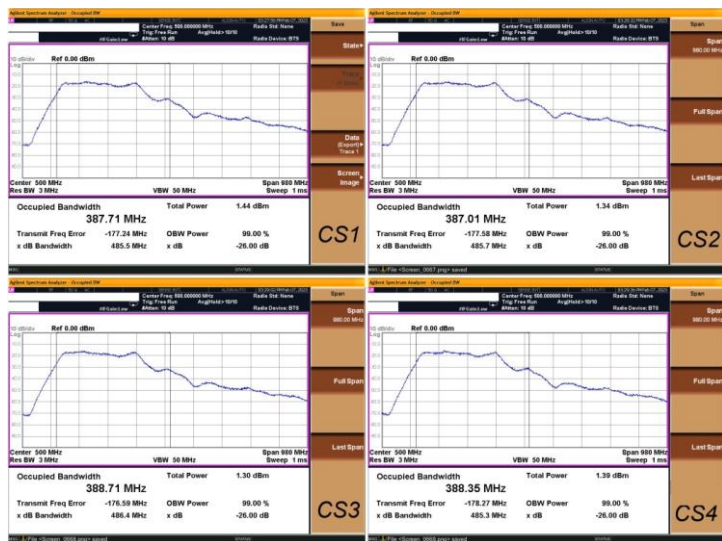
Рис. 4. а — Схема стенда: $S(t)$ модулирующий сигнал, V_E — напряжение питания, $M_1...M_4$ — модуляторы питания, $CS_1...CS_2$ — генераторы хаоса, $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ — выходной сигнал генераторов, OSC — 4-канальный осциллограф; б — фото экспериментального стенда.

Fig. 4. a — Bench layout: $S(t)$ modulating signal, V_E — supply voltage, $M_1...M_4$ — power supply modulators, $CS_1...CS_2$ — chaos generators, $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ — generator output signal, OSC — 4-channel oscilloscope; б — photo of the experimental stand

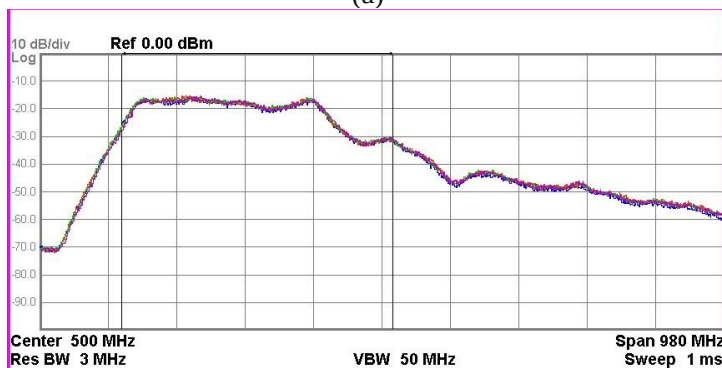
Варьирование напряжения питания V_E дает возможность варьировать режим колебаний генератора. Выходы $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ от каждого генератора соединялись коаксиальным кабелем с 4-х канальным осциллографом.

4. Режим постоянной генерации

При постоянной подаче питания генераторы работают в непрерывном режиме и формируют хаотический сигнал со спектром мощности, изображенным на Рис. 5. Мощность сигнала каждого генератора составляет 1,4 мВт при напряжении питания 3,6 В и потребляемом токе 50 мА.



(a)



(b)

Рис. 5. а – спектры мощности генераторов CS_1 , CS_2 , CS_3 , CS_4 для напряжения питания $V_E = 3.6$ В (спектроанализатор Agilent 9444N); б – те же спектры мощности генераторов в сравнении друг с другом: желтый – CS_1 , зеленый – CS_2 , красный – CS_3 , синий – CS_4 .

Fig. 5. а – power spectra of generators CS_1 , CS_2 , CS_3 , CS_4 for supply voltage $V_E = 3.6$ V (spectrum analyzer Agilent 9444N); б – the same power spectra of the generators in comparison with each other: yellow – CS_1 , green – CS_2 , red – CS_3 , blue – CS_4

Сравнение спектров мощности сигналов от генераторов (Рис. 5а) показывает, что они с высокой степенью точности совпадают (Рис. 5б), что свидетельствует о хорошей повторяемости генераторов.

5. Формирование близких по форме хаотических радиоимпульсов

Ниже приводятся результаты по формированию близких по форме хаотических радиоимпульсов в экспериментальном макете. Механизм и способ формирования близких по форме импульсов, которые рассматриваются в данной работе, основан на модуляции питания генератора видеосигналом [56—58].

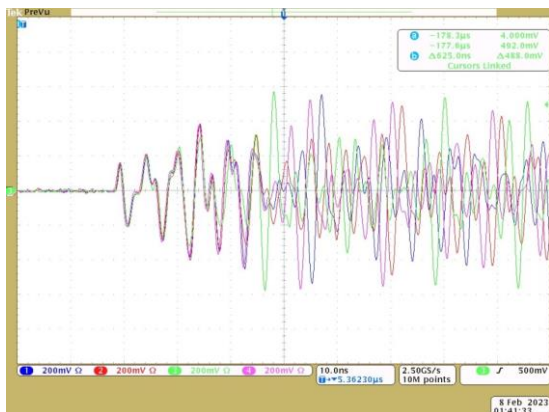
В случае воздействия видеоимпульсами, которые скачкообразно включают и выключают питание, генератор скачкообразно переводится из режима «покоя» в режим хаотической генерации. В режиме «покоя» динамическая система находится в устойчивом положении равновесия. При скачкообразном переводе системы из состояния покоя в режим генерации колебания каждый раз будут развиваться приблизительно с одних и тех начальных условий, благодаря этому будет обеспечиваться воспроизводимость сигнала на начальном участке колебаний. Отсюда следует, что система будет генерировать хаотические радиоимпульсы, начальные участки у которых будут близки друг другу.

Расчеты показывают, что такая ситуация имеет место и для рассматриваемого в данной работе генератора. В случае коротких модулирующих импульсов и достаточно больших межимпульсных интервалов, на длительности которых система имеет возможность релаксировать к устойчивому положению равновесия (состоянию покоя), система будет стартовать по приходу очередного модулирующего импульса с одних и тех же начальных условий. В результате чего в системе на рис. 1 будут воспроизводиться начальные участки импульсов.

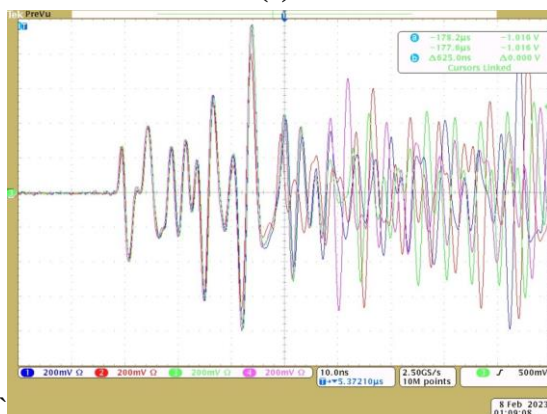
Демонстрация возможности по формированию близких по форме хаотических радиоимпульсов и их сравнение проводилось для значений напряжения питания генераторов $V_E = 2,2$ В и $V_E = 3,6$ В. Изображение экрана осциллографа с сигналами $V_R^{(1)}$, $V_R^{(2)}$, $V_R^{(3)}$, $V_R^{(4)}$ от генераторов CS_1 , CS_2 , CS_3 , CS_4 представлены на Рис. 6. На них изображены начальные участки одного из импульсов от каждого из четырех генераторов.

Для установления степени повторяемости формы начального участка хаотических радиоимпульсов, формируемых конкретным генератором, проводилось прямое сравнение этих участков (использовалась возможность осциллографа оцифровывать сигналы с частотой оцифровки 2,5 ГГц.). Из сигнала (последовательности хаотических радиоимпульсов), формируемо-

го каждым генератором, выделялись фрагменты с начальными участками импульсов, и эти фрагменты накладывались друг на друга.



(a)



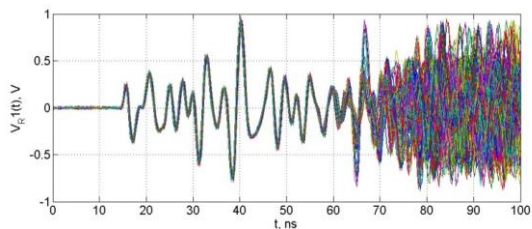
(b)

Рис. 6. Снимки экрана осциллографа с реализациями начальных участков хаотических радиоимпульсов от четырех различных генераторов для напряжения питания генераторов (a) $V_E = 2,2$ В и (b) $V_E = 3,6$ В.

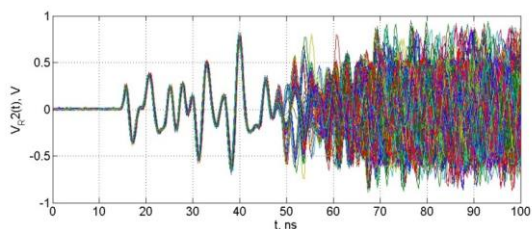
Fig. 6. Screen shots of the oscilloscope with realizations of the initial sections of chaotic radio pulses from four different generators for the generator supply voltage (a) $V_E = 2.2$ V and (b) $V_E = 3.6$ V

Результаты сравнения показаны на Рис. 7, на котором приведены реализации 1000 импульсов от каждого генератора, совмещенные по времени их начала для $V_E = 3,6$ В. Имеется возможность убедиться, что начальные формы импульсов совпадают как в сигнале от одного генератора, так и в сигналах, формируемых разными экземплярами генераторов. Длительность совпадающих участков составляет около ~ 35 нс.

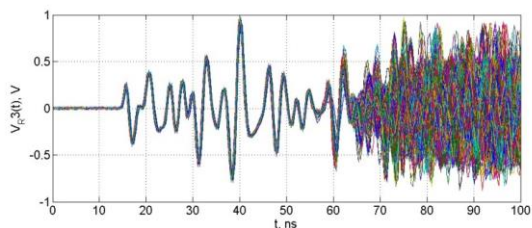
Таким образом, подавая в данном случае на вход питания генератора хаоса видеоимпульсы с длительностью ~ 35 нс, имеется возможность повторять (воспроизводить) форму импульсов и изменять эту форму, меняя амплитуду питающих видеоимпульсов.



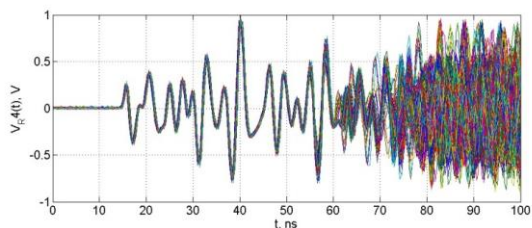
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 7. Формы начальных участков 1000 импульсов от генераторов CS1 (a), CS2 (b), CS3 (c), CS4 (d), напряжение питания $V_E = 3,6$ В.

Fig. 7. Shapes of the initial sections of 1000 pulses from generators CS1 (a), CS2 (b), CS3 (c), CS4 (d), supply voltage $V_E = 3.6$ V

6. Управление формой импульсов

Здесь рассматривается подход к управлению формой импульсов, основанный на двух дополняющих друг друга свойствах: возможности воспроизведения близких по форме колебаний на начальном участке импульсов и на экспоненциальной неустойчивости хаотической траектории по отношению к возмущениям. Объединение этих двух качеств позволяет формировать импульсы, имеющие различную форму начального участка импульсов (при различных напряжениях питания генераторов), которая может воспроизводиться от импульса к импульсу (если амплитуда напряжения питания сохраняется от импульса к импульсу).

Формирование одинаковых импульсов с различной формой достигается за счет модуляции питания генератора видеоимпульсами, длительность которых меньше или равна длительности повторяющейся от импульса к импульсу их начальной части. Выбор той или иной амплитуды видеоимпульсов при этом позволяет управлять формой хаотических радиоимпульсов.

В эксперименте на входы питания генераторов подавались видеоимпульсы питания длительностью 28 нс (скважность), с напряжением 3,6 В и 5 В.

В результате были получены импульсы двух разных форм, полностью воспроизводимые от импульса к импульсу, как одним генератором, так и разными экземплярами генераторов (Рис. 8).

7. Заключение

Идея применения свойств хаотических динамических систем для формирования сигналов различной формы сохраняет популярность с момента появления в радиотехнике генераторов хаотических колебаний. По сути, основной круг возможных идей по использованию хаотических динамических систем для беспроводной связи был обозначен в самом начале процесса исследований, после вхождения понятий и концепций динамического хаоса в обиход радиотехнических систем. Однако эти идеи так или иначе носили исключительно принципиальный характер, и сравнительно редко доводились до уровня конкретных реализаций (часть из них перечислена во введении), которые могли бы составить практически значимую конкуренцию существующим системам.

Если говорить о хаотических сигналах, генерируемых цифровыми системами, то неизбежно сравнение их характеристик с характеристиками регулярных цифровых сигналов, предназначенных для расширения спектра и для реализации приема с накоплением (функции Уолша, последовательности Голда, m -последовательности), которые уже хорошо знакомы

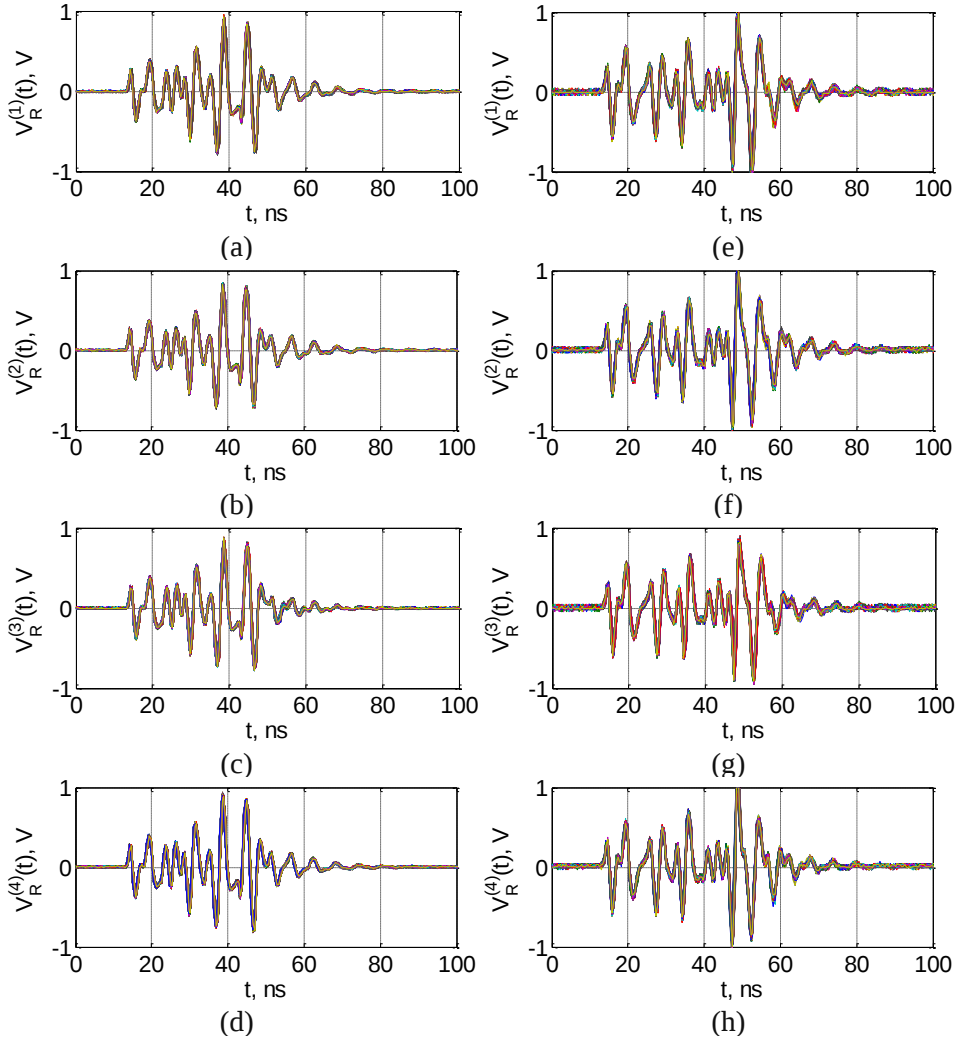


Рис. 8. Радиоимпульсы, формируемые генераторами хаотических колебаний под управлением видеоимпульсов питания длительностью 28 нс. На а, б, с, д изображены наложенные друг на друга 1000 импульсов от генераторов CS1, CS2, CS3, CS4, соответственно, (амплитуда видеоимпульсов питания $V_E = 3,6$ В). На рисунках е, ф, г, h — наложенные друг на друга 1000 импульсов от генераторов CS1, CS2, CS3, CS4, соответственно, (амплитуда видеоимпульсов питания $V_E = 5$ В).

Fig. 8. Radio pulses generated by generators of chaotic oscillations under the control of video power pulses with a duration of 28 ns. Figures a, b, c, d show 1000 pulses superimposed on each other from generators CS1, CS2, CS3, CS4, respectively (amplitude of power video pulses $V_E = 3.6$ V). Figures e, f, g, h show 1000 pulses superimposed on each other from generators CS1, CS2, CS3, CS4, respectively (amplitude of power video pulses $V_E = 5$ V).

специалистам, и которые обладают требуемыми сигнальными характеристиками. Поэтому прямое противопоставление цифровых систем генерации хаотических сигналов, традиционным цифровым системам шумоподобных сигналов не всегда в пользу первых.

В этой связи аналоговый способ формирования сигналов с неповторяющейся (нерегулярной) формой в СВЧ диапазоне имеет естественное преимущество перед цифровыми методами генерации, так как такие сигналы не требуют их переноса на радиочастоту. При этом форма этих сигналов зависит только от напряжения питания благодаря чувствительности хаотической траектории к начальным условиям.

Предложенный в статье способ генерации представляет интерес для использования в простых аналоговых устройствах, в которых не целесообразно применять энергозатратную цифровую обработку и цифровой синтез сигналов, но желательно иметь возможность генерации сигнала сложной формы для организации накопления и когерентного приема.

В свою очередь возможность воспроизведения формы сигналов непосредственно в СВЧ диапазоне создает предпосылки для разработки прямо-передающих систем, основанных на когерентном сложении сигналов в точке приема (за счет когерентного во времени излучения) и на их когерентной обработке приемником. Идея когерентного сложения сигналов находит все больше конкретных примеров реализации при создании беспроводных систем различного назначения. Управление формой сигнала через единственный параметр (питание) фактически дает возможность реализации когерентного излучения от нескольких источников хаотических колебаний, которые управляются цифровым образом. Это, в свою очередь, открывает некоторые возможности по формированию заданной диаграммы направленности излучения в задачах направленной передачи информации при помощи хаотических сигналов. Полученные в этой работе результаты позволяют сделать основанный на экспериментальных данных вывод, что когерентная обработка (излучение и прием) также принципиально доступна для СШП сигналов, полученных при помощи хаотических автоколебательных систем.

Генераторы хаоса могут играть роль универсальных источников, при помощи которых можно получать СШП сигналы СВЧ диапазона различной формы. При этом немаловажным фактом является то, такие сигналы формируются сразу в требуемом диапазоне частот, без необходимости дополнительных операций по их переносу в требуемый частотный диапазон. Это крайне полезно при создании источников колебаний сложной формы не только в СВЧ диапазоне, но также в мм- и в ТГц диапазоне частот, где основные принципы формирования хаотических колебаний сохраняются.

В итоге, в работе показана практическая возможность управляемого формирования СШП колебаний при помощи генераторов хаотических колебаний за счет использования фундаментального свойства хаотических динамических систем — неустойчивости хаотических траекторий. Предложенный метод позволяет формировать колебания разной формы естественным для радиотехники образом: путем варьирования напряжения питания генератора хаоса. Предложен и экспериментально продемонстрирован способ воспроизведения близких по форме хаотических радиоимпульсов. Это качество открывает возможность применения хаотических генераторов для создания методов когерентного излучения и приема хаотических радиоимпульсов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта РНФ 23-29-00297,
<https://rscf.ru/project/23-29-00297/>

Список итературы

1. Liuqing Y., Giannakis G. B. Ultra-wideband communications : An idea whose time has come // IEEE Signal Process. Mag. 2004. Т. 6. С. 26—54.
2. Niemelä V., Haapola J., Hämäläinen M., Iinatti J. An Ultra Wideband Survey : Global Regulations and Impulse Radio Research Based on Standards // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2017. Т. 19, № 2. С. 874—890.
3. Breed G. A summary of FCC rules for ultra wideband communications // High Freq. Electron. 2005. Т. 4, № 1. С. 42—44.
4. Mandke K., Nam H., Yerramneni L., Zuniga C., Rappaport T. The Evolution of Ultra Wide Band Radio for Wireless Personal Area Network // High Freq. Electron. 2003. № 5. С. 22—32.
5. IEEE 802.15 WPAN High Rate Alternative PHY Task Group 3a (TG3a). Available online: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html> (accessed on 24 January 2023).
6. IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Press : New York City, NY, USA, 2016. 709 c.
7. IEEE Std 802.15.6-2012; IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.6: Wire-less Body Area Networks. IEEE Press : New York City, NY, USA, 2012. 271 c.
8. IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE Press : New York City, NY, USA, 2020. 174 c.
9. Stocker M. et al. On the Performance of IEEE 802.15. 4z-Compliant Ultra-Wideband Devices // 2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench). IEEE, 2022. С. 28—33.
10. Chen H. et al. A 4-to-9 GHz IEEE 802.15. 4z-Compliant UWB Digital Transmitter with Reconfigurable Pulse-Shaping in 28nm CMOS // 2022 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). IEEE, 2022. С. 99—102.

11. Apple U1 TMKA75 Ultra Wideband (UWB) Chip Analysis.
Available online: <https://www.techinsights.com/blog/apple-u1-tmka75-ultra-wideband-uw-b-chip-analysis> (accessed on 24 January 2023).
12. What Is Ultra-Wideband, and How Does It Work?
Available online: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uw-b-ultrawideband-connectivity/> (accessed on 24 January 2023).
13. Tam W. M., Lau F. C. M., Tse C. K. *Digital Communications With Chaos : Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. Oxford, U.K. : Elsevier Science, 2010. 258 с.
14. Messaadi M. et al. GoF Based Chaotic On-Off Keying: A New Non-Coherent Modulation for Direct Chaotic Communication // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021. T. 66, Suppl 2. C. S194—S200.
15. *Chaotic Signals in Digital Communications*, 1st ed.; Eisencraft M., Attux R., Suyama R., Eds.; Boca Raton : CRC Press, 2014.
16. Kaddoum G. Wireless chaos-based communication systems : A comprehensive survey // *IEEE Access*. 2016. T. 4. C. 2621—2648.
17. Quyen N. X., Van Yem V., Hoang T. M. Chaotic modulation based on the combination of CPM and CPWM // *Proceedings of the Joint INDS'11 & ISTET'11*. IEEE, 2011. C. 1—6.
18. Munirathinam R. et al. Chaotic Non-Coherent Pulse Position Modulation Based Ultra-Wideband Communication System // *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. IEEE, 2021. C. 1—6.
19. Onunkwo U., Li Y. On the optimum pulse-position modulation index for ultra-wideband communication // *Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication*. IEEE, 2004. T. 1. C. 77—80.
20. Chien T. I. et al. Design of multiple-accessing chaotic digital communication system based on Interleaved Chaotic Differential Peaks Keying (I-CDPK) // *2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. IEEE, 2008. C. 638—642.
21. Hong Y. P., Jin S. Y., Song H. Y. Coded N-ary PPM UWB impulse radio with chaotic time hopping and polarity randomization // *2007 3rd International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications*. IEEE, 2007. C. 252—256.
22. Yao Z. J. et al. Non-crosstalk real-time ultrasonic range system with optimized chaotic pulse position-width modulation excitation // *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*. IEEE, 2008. C. 729—732.
23. Zhang L. et al. A new pulse modulation method for underwater acoustic communication combined with multiple pulse characteristics // *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*. IEEE, 2018. C. 1—6.
24. Yang H., Jiang G. P. Delay-variable synchronized chaotic pulse position modulation for ultra-wide bandwidth communication // *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*. IEEE, 2006. T. 4. C. 2692—2694.
25. Rulkov N. F. et al. Digital communication using chaotic-pulse-position modulation // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 2001. T. 48, № 12. C. 1436—1444.
26. Quyen N. X. et al. Digital communication using MxN-ary chaotic pulse width-position modulation // *The 2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications*. IEEE, 2012. C. 362—366.
27. Zhu Q., Zou C., Jia Z. Performance Analysis of Ultra Wideband Communication System with Time-Hopping M-ary Biorthogonal Pulse Position Modulation // *2006 First International Conference on Communications and Networking in China*. IEEE, 2006. C. 1—6.

28. Tang G. et al. A hybrid spread spectrum communication method based on chaotic sequence // 2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2021. C. 1—5.
29. Chen Z., Zhang L., Wu Z. NGD Analysis of Turtle-Shape Microstrip Circuit // IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS II-EXPRESS BRIEFS. 2020. T. 67, №. 11. C. 2492—2496.
30. Erkucuk S., Kim D. I. Combined M-ary code shift keying/binary pulse position modulation for ultra wideband communications // IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE, 2004. T. 2. C. 804—808.
31. Liu C., Cheng J., Zhang R. An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication // 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). IEEE, 2019. T. 2. C. 235—240.
32. Manikandan M. S. K. et al. A Novel Pulse Based Ultrawide Band System Using Chaotic Spreading Sequences // 2007 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware. IEEE, 2007. C. 1—5.
33. Kotti A. et al. Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences // 2009 First International Conference on Communications and Networking. IEEE, 2009. C. 1—5.
34. Yuan G. et al. Enhancing the security of chaotic direct sequence spread spectrum communication through WFRFT // IEEE Communications Letters. 2021. T. 25, № 9. C. 2834—2838.
35. Ren H. P., Bai C. Kong Q., Baptista M. S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication // Physica A. 2017. T. 478. C. 77—92.
36. Ren H. P. et al. Cross correction and chaotic shape-forming filter based quadrature multi-carrier differential chaos shift keying communication // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. T. 70, № 12. C. 12675—12690.
37. Yao J. L. et al. Chaos-based wireless communication resisting multipath effects // Physical Review E. 2017. T. 96, № 3. C. 032226.
38. Song D., Liu J., Wang F. Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map and Fibonacci sequence // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. IEEE, 2013. T. 1. C. 611—614.
39. Zhang J., Cheng J., Li G. Chaotic spread-spectrum sequences using chaotic quantization // 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. IEEE, 2007. C. 40—43.
40. Chengquan A., Tingxian Z. Design of chaotic spread-spectrum sequences with good correlation properties for DS/CDMA // 2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2003. T. 3. C. III—III.
41. Velavan P., Santhi M. Design and FPGA realization of MC-CDMA system using pseudo chaotic sequence generator // 2014 International Conference on Communication and Signal Processing. IEEE, 2014. C. 498—502.
42. Xiao L., Xuan G., Wu Y. Research on an improved chaotic spread spectrum sequence // 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). IEEE, 2018. C. 420—423.
43. Rastogi U. et al. Optimal chaotic sequences for DS-CDMA using genetic algorithm // 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). IEEE, 2017. C. 900—904.
44. Rui X. U. E., Xiong Y., Cheng Q. A novel ranging code based on improved logistic map chaotic sequences // 2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2019. C. 11—15.

45. Rao K. D., Raju B. Improved robust multiuser detection in non-Gaussian channels using a new M-estimator and spatiotemporal chaotic spreading sequences // APCCAS 2006-2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. IEEE, 2006. C. 1729—1732.
46. Sedaghatnejad S., Farhang M. Detectability of chaotic direct-sequence spread-spectrum signals // IEEE Wireless Communications Letters. 2015. T. 4, № 6. C. 589—592.
47. Xiao L., Xuan G., Wu Y. Blind estimation of chaotic spread spectrum sequences by neural network // 2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). IEEE, 2018. C. 1—9.
48. Houkpevi F. O., Yaz E. E. Chaotic-Pulse-Position Modulation: A third party intrusion scheme using Kalman Filter // 2004 IEEE Electro/Information Technology Conference. IEEE, 2004. C. 20—25.
49. Dmitriev B. S. et al. Ultra wide band UHF chaotic impulse generator // IVESC 2012. IEEE, 2012. C. 91—92.
50. Fierro G. V., Flores-Verdad G. E. A CMOS low complexity gaussian pulse generator for ultra wideband communications // 2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2009. C. 70—73.
51. Dmitriev B. S. et al. KLYSTRON-Generator of Chaotic Radioimpulses // 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources. IEEE, 2006. C. 105—106.
52. Wang Y. et al. Method of chaotic pulse sequence produced by continuous chaotic system // 2008 9th International Conference on Signal Processing. IEEE, 2008. C. 1892—1895.
53. Haimovich A. M., Blum R. S., Cimini L. J. MIMO Radar with Widely Separated Antennas // IEEE Signal Process Mag. 2008. T. 25, № 1. C. 116—129.
54. Jemaa Z. B., Belghith S. Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO Radar application // 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). IEEE, 2016. C. 1—5.
55. Zeng G. et al. Design of a Chaotic Index Modulation Aided Frequency Diverse Array Scheme for Directional Modulation // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. C. 1—6.
56. Dmitriev A. S., Efremova E. V., Kuz'min L. V. Chaotic pulse trains generated by a dynamical system driven by a periodic signal // Technical physics letters. 2005. T. 31. C. 961—963.
57. Dmitriev, A. S., Efremova E. V., Kuz'min L. V., Atanov N. V. A train of chaotic pulses generated by a dynamic system driven by an external (periodic) force // J. Commun. Technol. Electron. 2006. T. 51. C. 557—567.
58. Dmitriev A., Efremova E., Kuzmin L., Atanov N. Forming pulses in non-autonomous chaotic oscillator // Int. J. Bifurc. Chaos. 2007. T. 17, № 10. C. 3443—3448.
59. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Y., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurc. Chaos. 2003. T. 6. C. 1495—1507.
60. Dmitriev A. S., Zakharchenko K. V., Puzikov D. Y. Introduction to the Theory of Direct Chaotic Data Transmission // Journal of communications technology & electronics. 2003. T. 48, № 3. C. 293—302.
61. Andreyev Y. V. et al. Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary wireless communications // International journal of bifurcation and chaos. 2005. T. 15. №. 11. C. 3639—3651.
62. Dmitriev A. S. et al. Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. T. 62, № 4. C. 380—388.

63. Dmitriev A. S. et al. Self-organizing ultrawideband wireless sensor network // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINK-HROINFO). IEEE, 2017. С. 1—6.
64. Kuzmin L. V., Grinevich A. V., Ushakov M. D. An experimental investigation of the multi-path propagation of chaotic radio pulses in a wireless channel // Technical Physics Letters. 2018. Т. 44. С. 726—729.
65. Kuz'min L. V., Grinevich A. V. Method of blind detection of ultrawideband chaotic radio pulses on the background of interpulse interference // Technical Physics Letters. 2019. Т. 45. С. 831—834.
66. Kennedy M. P. Chaos in the Colpitts oscillator // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1994. Т. 41, № 11. С. 771—774.
67. Dmitriev A. S. et al. Generator of microwave chaotic oscillations based on a self-oscillating system with 2.5 degrees of freedom // Journal of Communications Technology and Electronics. 2007. Т. 52. С. 1137—1145.
68. Dmitriev A. S., Efremova E. V., Rumyantsev N. V. A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz // Technical Physics Letters. 2014. Т. 40. С. 48—51.
69. Efremova E. V., Dmitriev A. S. Ultrawideband microwave 3–7 GHz chaotic oscillator implemented as SiGe integrated circuit // Emergent Complexity from Nonlinearity, in Physics, Engineering and the Life Sciences : Proceedings of the XXIII International Conference on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Como, Italy, 7–11 September 2015. Cham : Springer International Publishing, 2017. С. 71—80.

Информация об авторах

Кузьмин Лев Викторович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. 0000-0003-0466-881X.

Ефремова Елена Валериевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. 0000-0001-9560-3469.

Ицков Вадим Викторович, младший научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. ORCID 0000-0001-9154-6401.

Владыка Павел Александрович, инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва. ORCID 0009-0002-7080-9350.

An Experiment on the Generation of Microwave Chaotic Radio Pulses with Reproducible Waveform

L. V. Kuzmin, E. V. Efremova, V. V. Itskov, and P. A. Vladyka

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
Mokhovaya str., 11, bldg. 7, Moscow, 125009, Russian Federation
lvkuzmin@gmail.com*

Received: May 19, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: A method for generating chaotic radio pulses using an analog generator of chaotic oscillations is proposed. The method makes it possible to reproduce the pulse waveform both by the same generator instance and by different instances of structurally identical generators. The pulse waveforms are controlled by the supply voltage of the generator. To prove the concept an experimental test-bed consisting of four identical generators of 100–500 MHz band has been developed. The proposed method can be applied both for coherent reception of chaotic UWB oscillations in the microwave band and for beamforming.

Keywords: ultra-wide band chaotic radio-pulses, ultra-wide band signals, chaotic signals, coherent emission of chaotic signals.

For citation (IEEE): L. V. Kuzmin, E. V. Efremova, V. V. Itskov, and P. A. Vladyka, “An Experiment on the Generation of Microwave Chaotic Radio Pulses with Reproducible Waveform,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 139–165, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.13. (In Russ.).

References

- [1] Y. Liuqing and G. B. Giannakis, “Ultra-wideband communications : An idea whose time has come,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 6, pp. 26–54, 2004, doi: 10.1109/MSP.2004.1359140.
- [2] V. Niemelä, J. Haapola, M. Hämäläinen and J. Iinatti, “An Ultra Wideband Survey : Global Regulations and Impulse Radio Research Based on Standards,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 874–890, second-quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2634593.
- [3] G. Breed, “A summary of FCC rules for ultra wideband communications,” *High Freq. Electron.*, vol. 4, no.1, pp. 42–44, 2005.
- [4] K. Mandke, H. Nam, L. Yerramneni, C. Zuniga, and T. Rappaport, “The Evolution of Ultra Wide Band Radio for Wireless Personal Area Network,” *High Freq. Electron.* No. 5, pp. 22–32, 2003.
- [5] IEEE 802.15 WPAN High Rate Alternative PHY Task Group 3a (TG3a). Available online: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html> (accessed on 24 January 2023).
- [6] IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Press : New York City, NY, USA, 2016; pp. 1–709.

- [7] IEEE Std 802.15.6-2012; IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wire-less Body Area Networks. IEEE Press: New York City, NY, USA, 2012; pp. 1–271.
- [8] IEEE Std 802.15.4z-2020 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2020); IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks—Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE Press: New York City, NY, USA, 2020; pp. 1–174.
- [9] M. Stocker, et al. “On the Performance of IEEE 802.15. 4z-Compliant Ultra-Wideband Devices,” *2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench)*. IEEE, pp. 28—33, 2022.
- [10] H. Chen, et al. “A 4-to-9GHz IEEE 802.15.4z-Compliant UWB Digital Transmitter with Reconfigurable Pulse-Shaping in 28nm CMOS,” in *Proceedings of the 2022 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, Denver, CO, USA, 19–21 June 2022; pp. 99–102.
- [11] Apple U1 TMKA75 Ultra Wideband (UWB) Chip Analysis. Available online: <https://www.techinsights.com/blog/apple-u1-tmka75-ultra-wideband-uw-b-chip-analysis> (accessed on 24 January 2023).
- [12] What Is Ultra-Wideband, and How Does It Work? Available online: <https://www.smartprix.com/bytes/phones-with-uw-b-ultrawideband-connectivity/> (accessed on 24 January 2023).
- [13] W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, *Digital Communications With Chaos : Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. Oxford, U.K. : Elsevier Science, 2010.
- [14] M. Messaadi et al. “GoF Based Chaotic OnOff Keying: A New Non-Coherent Modulation for Direct Chaotic Communication,” *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 66 (Suppl. 2), pp. S194–S200, 2021.
- [15] *Chaotic Signals in Digital Communications*, 1st ed. ; Eisencraft, M., Attux, R., Suyama, R., Eds. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2014.
- [16] G. Kaddoum, “Wireless Chaos-Based Communication Systems : A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2621–2648, 2016.
- [17] N. X. Quyen, V. Van Yem and T. M. Hoang, “Chaotic modulation based on the combination of CPPM and CPWM,” *Proceedings of the Joint INDS’11 ISTET’11*, Klagenfurt am Wörthersee, Austria, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1109/INDS.2011.6024801.
- [18] R. Munirathinam, A. Aboltins, D. Pikulins and J. Grizans, “Chaotic Non-Coherent Pulse Position Modulation Based Ultra- Wideband Communication System,” *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, Riga, Latvia, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/MTTW53539.2021.9607075.
- [19] U. Onunkwo and Ye Li, “On the optimum pulse-position modulation index for ultra-wideband communication,” *Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication* (IEEE Cat. No.04EX710), Shang-hai, China, vol. 1, pp. 77–80, 2004, doi: 10.1109/CASSET.2004.1322921.
- [20] T. I. Chien, N. Z. Wang, T. L. Liao and S. B. Chang, “Design of multiple-accessing chaotic digital communication system based on Interleaved Chaotic Differential Peaks Keying (I-CDPK),” *2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Graz, Austria, pp. 638–642, 2008, doi: 10.1109/CSNDSP.2008.4610717.
- [21] Y.-P. Hong, S.-Y. Jin and H.-Y. Song, “Coded N-ary PPM UWB Impulse Radio with Chaotic Time Hopping and Polarity Randomization,” *2007 3rd International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications*, Chengdu, China, pp. 252–256, 2007, doi: 10.1109/IWSDA.2007.4408370.

- [22] Z. -J. Yao, Q. -H. Meng, G. -W. Li and P. Lin, "Non-crosstalk real-time ultrasonic range system with optimized chaotic pulse position-width modulation excitation," *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Beijing, China, pp. 729–732, 2008, doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0174.
- [23] L. Zhang, J. Wang, J. Tao and S. Liu, "A New Pulse Modulation Method for Underwater Acoustic Communication Combined with Multiple Pulse Characteristics," *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Qingdao, China, pp. 1–6, 2018 doi: 10.1109/ICSPCC.2018.8567790.
- [24] H. Yang and G. P. Jiang, "Delay-Variable Synchronized Chaotic Pulse Position Modulation for Ultra-Wide Bandwidth Communication," *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Guilin, China, pp. 2692–2694, 2006, doi: 10.1109/ICCCAS.2006.285225.
- [25] N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring and A. R. Volkovskii, "Digital communication using chaotic-pulse-position modulation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 48, no. 12, pp. 1436–1444, Dec. 2001, doi: 10.1109/TCSI.2001.972850.
- [26] Nguyen Xuan Quyen, Vu Van Yem, Thang Manh Hoang and K. Kyamakyia, "Digital communication using MxN-ary chaotic pulse width-position modulation," *2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ha Noi, Vietnam, pp. 362–366, 2012, doi: 10.1109/ATC.2012.6404294.
- [27] Q. Zhu, C. Zou and Z. Jia, "Performance Analysis of Ultra Wideband Communication System with Time-Hopping M-ary Biorthogonal Pulse Position Modulation," *2006 First International Conference on Communications and Networking in China*, Beijing, China, pp. 1–6, 2006, doi: 10.1109/CHINACOM.2006.344655.
- [28] G. Tang, L. Zhu, Q. Wu, Q. He and L. Yu, "A Hybrid Spread Spectrum Communication Method Based on Chaotic Sequence," *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Dubai, United Arab Emirates, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/ISNCC52172.2021.9615817.
- [29] Z. Chen, L. Zhang and Z. Wu, "High Data Rate Discrete-Cosine-Spreading Aided M-Ary Differential Chaos Shift Keying Scheme With Low PAPR," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 11, pp. 2492–2496, Nov. 2020, doi: 10.1109/TCSII.2020.2980738.
- [30] S. Erkucuk and Dong In Kim, "Combined M-ary code shift keying/binary pulse position modulation for ultra wideband communications," *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'04*, Dallas, TX, USA, vol. 2, pp. 804–808, 2004, doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1378071.
- [31] C. Liu, J. Cheng and R. Zhang, "An orthogonal mixed chaotic spread spectrum algorithm for satellite communication," *2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, China, pp. 235–240, 2019, doi: 10.1109/ISCID.2019.10137.
- [32] M. S. K. Manikandan, S. Ravikumar, V. Abhaikumar and S. J. Thiruvengadam, "A Novel Pulse Based Ultrawide Band System Using Chaotic Spreading Sequences," *2007 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware*, Bangalore, India, pp. 1–5, 2007, doi: 10.1109/COMSWA.2007.382453.
- [33] A. Kotti, S. Meherzi, S. Marcos and S. Belghith, "Asynchronous DS-UWB communication using spatiotemporal chaotic waveforms and sequences," *2009 First International Conference on Communications and Networking*, Hammamet, Tunisia, pp. 1–5, 2009, doi: 10.1109/COMNET.2009.5373551.
- [34] G. Yuan, Z. Chen, X. Gao and Y. Zhang, "Enhancing the Security of Chaotic Direct Sequence Spread Spectrum Communication Through WFRFT," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 2834–2838, Sept. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3096388.

- [35] Hai-Peng Ren, Chao Bai, Qingju Kong, Murilo S. Baptista, and Celso Grebogi, "A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 478, pp. 77-92, 2017, doi: 10.1016/j.physa.2017.02.036.
- [36] H.-P. Ren, S.-L. Guo, C. Bai and X.-H. Zhao, "Cross Correction and Chaotic Shape-Forming Filter Based Quadrature Multi-Carrier Differential Chaos Shift Keying Communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 12, pp. 12675–12690, Dec. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3119176.
- [37] J.-L. Yao, C. Li, H.-P. Ren, and Celso Grebogi, "Chaos-based wireless communication resisting multipath effects," vol. 96, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.1103/physreve.96.032226.
- [38] D. Song, J. Liu and Fang Wang, "Statistical analysis of chaotic stochastic properties based on the logistic map and Fibonacci sequence," *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, Harbin, China, pp. 611–614, 2013, , doi: 10.1109/MIC.2013.6758038.
- [39] Jian Zhang, Jian Cheng and Guangxia Li, "Chaotic spread-spectrum sequences using chaotic quantization," *2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, Xiamen, China, pp. 40–43, 2007, doi: 10.1109/ISPACS.2007.4445818.
- [40] An Chengquan and Zhou Tingxian, "Design of chaotic spread-spectrum sequences with good correlation properties for DS/CDMA," *2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Bangkok, Thailand, pp. III–III, 2003, doi: 10.1109/ISCAS.2003.1204966.
- [41] P. Velavan and M. Santhi, "Design and FPGA realization of MC-CDMA system using pseudo chaotic sequence generator," *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*, Melmaruvathur, India, pp. 498–502, 2014, doi: 10.1109/ICCSP.2014.6949892.
- [42] L. Xiao, G. Xuan and Y. Wu, "Research on an improved chaotic spread spectrum sequence," *2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA)*, Chengdu, China, pp. 420–423, 2018, doi: 10.1109/ICCCBDA.2018.8386553.
- [43] U. Rastogi, S. Anuradha, R. C. Shekar, S. Singh and P. S. H. Rao, "Optimal chaotic sequences for DS-CDMA using genetic algorithm," *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, pp. 900–904, 2017, doi: 10.1109/WiSPNET.2017.8299892.
- [44] R. Xue, Y. Xiong and Q. Cheng, "A Novel Ranging Code based on improved Logistic Map Chaotic Sequences," *2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, PyeongChang, Korea (South), pp. 11–15, 2019, doi: 10.23919/ICACT.2019.8701898.
- [45] K. D. Rao and B. Raju, "Improved Robust Multiuser Detection in Non-Gaussian Channels Using a New M-Estimator and Spatiotemporal Chaotic Spreading Sequences," *APCCAS 2006 – 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Singapore, pp. 1729–1732, 2006, doi: 10.1109/APCCAS.2006.342131.
- [46] S. Sedaghatnejad and M. Farhang, "Detectability of Chaotic Direct-Sequence Spread-Spectrum Signals," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 6, pp. 589–592, Dec. 2015, doi: 10.1109/LWC.2015.2469776.
- [47] L. Xiao, G. Xuan and Y. Wu, "Blind Estimation of Chaotic Spread Spectrum Sequences by Neural Network," *2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, Bio-Medical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, Beijing, China, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1109/CISPBMEI.2018.8633136.
- [48] F. O. Hounkpevi and E. E. Yaz, "Chaotic-Pulse-Position Modulation : A third party intrusion scheme using Kalman Filter," *2004 IEEE Electro/Information Technology Conference*, Milwaukee, WI, USA, pp. 20–25, 2004, doi: 10.1109/EIT.2004.4569361.
- [49] B. S. Dmitriev, J. D. Zharkov, V. N. Skorokhodov and S. A. Sadovnikov, "Ultra wide band UHF chaotic impulse generator," *IVESC 2012*, Monterey, CA, USA, pp. 91–92, 2012, doi: 10.1109/IVESC.2012.6264162.

- [50] G. V. Fierro and G. E. Flores-Verdad, "A CMOS low complexity Gaussian pulse generator for ultra wideband communications," *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Cancun, Mexico, pp. 70–73, 2009, doi: 10.1109/MWSCAS.2009.5236151.
- [51] B. S. Dmitriev, Y. D. Zharkov, V. N. Skorokhodov and A. A. Biryukov, "KLYSTRON – Generator of Chaotic Radioimpulses," *2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources*, Monterey, CA, USA, pp. 105–106, 2006, doi: 10.1109/IVELEC.2006.1666206.
- [52] Youwei Wang, Liping Wang, Shuang Yu, Lei Zhang, Dongmei Yan and Yunhua Li, "Method of chaotic pulse sequence produced by continuous chaotic system," *2008 9th International Conference on Signal Processing*, Beijing, pp. 1892–1895, 2008, doi: 10.1109/ICOSP.2008.4697511.
- [53] A. M. Haimovich, R. S. Blum and L. J. Cimini, "MIMO Radar with Widely Separated Antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 1, pp. 116–129, 2008, doi: 10.1109/MSP.2008.4408448.
- [54] Z. Ben Jemaa and S. Belghith, "Chaotic sequences with good correlation properties for MIMO radar application," *2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772127.
- [55] G. Zeng, Y. Liao, J. Wang and Y.-C. Liang, "Design of a Chaotic Index Modulation Aided Frequency Diverse Array Scheme for Directional Modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1–6, Jan. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3253926.
- [56] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, L. V. Kuz'min, "Chaotic Pulse Trains Generated by a Dynamical System Driven by a Periodic Signal," *Technical Physics Letters*, vol. 31, no. 11, p. 961–963, 2005, doi: <https://doi.org/10.1134/1.2136965>.
- [57] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, L. V. Kuz'min, and N. V. Atanov, "A train of chaotic pulses generated by a dynamic system driven by an external (periodic) force," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 557–567, May 2006, doi: 10.1134/s1064226906050093.
- [58] A. Dmitriev, E. Efremova, L. Kuz'min, and N. Atanov, "Forming pulses in nonautonomous chaotic oscillator," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 17, no. 10, pp. 3443–3448, Oct. 2007, doi: 10.1142/s0218127407019184.
- [59] A. S. Dmitriev, B. Y. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, "Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 13, no. 6, 2003, pp. 1495–1507.
- [60] A. S. Dmitriev, K. V. Zakharchenko, and D. Y. Puzikov, "Introduction to the Theory of Direct Chaotic Data Transmission," *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 48, no. 3, pp. 293–302, 2003.
- [61] Yu. V. Andreyev, A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, A. D. Khilinsky, L. V. Kuzmin, "Qualitative theory of dynamical systems, chaos and contemporary communications," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 15, no. 11, 2005, pp. 3639–3651.
- [62] A. S. Dmitriev, M. Yu. Gerasimov, V. V. Itzkov, V. A. Lazarev, M. G. Popov, and A. I. Ryzhov, "Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses," *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 62, no. 4, pp. 380–388, 2017.
- [63] A. S. Dmitriev, L. V. Kuzmin, V. A. Lazarev, A. I. Ryzhov, Yu. V. Andreyev, and M. G. Popov, "Self-organizing ultrawideband wireless sensor network," *Proceedings of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, Kazan, Russia, pp. 1–6, 3–4 July 2017.
- [64] L. V. Kuzmin, A. V. Grinevich, and M. D. Ushakov, "An Experimental Investigation of the Multipath Propagation of Chaotic Radio Pulses in a Wireless Channel," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 44, pp. 726–729, 2018, doi: 10.1134/S1063785018080242.

- [65] L.V. Kuz'min and A. V. Grinevich, "Method of Blind Detection of Ultrawideband Chaotic Radio Pulses on the Background of Interpulse Interference," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 831–834, 2019, doi: 10.1134/S1063785019080261.
- [66] M. P. Kennedy, "Chaos in the Colpitts Oscillator," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 41, no. 11, pp. 771–774, 1994.
- [67] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, N. A. Maksimov, and E. V. Grigor'ev, "Generator of microwave chaotic oscillations based on a self-oscillating system with 2.5 degrees of freedom," *J. Commun. Technol. Electron.* vol. 52, no. 10, 2007, pp. 1137–1145, Oct. 2007, doi: 10.1134/s1064226907100105.
- [68] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, and N. V. Rumyantsev, "A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz," vol. 40, no. 1, pp. 48–51, Feb. 2014, doi: 10.1134/s1063785014010180.
- [69] E. V. Efremova, and A. S. Dmitriev, "Ultrawideband Microwave 3–7 GHz Chaotic Oscillator Implemented as SiGe Integrated Circuit," in: Mantica, G., Stoop, R., Stramaglia, S. (eds) *Emergent Complexity from Nonlinearity, in Physics, Engineering and the Life Sciences. Springer Proceedings in Physics*, vol. 191, pp. 71–80, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-47810-4_7.

Information about the authors

Lev V. Kuzmin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Elena V. Efremova, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0001-9560-3469.

Vadim V. Itskov, Junior researcher, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0000-0001-9154-6401.

Pavel A. Vladyka, Engineer, Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation, Moscow. ORCID 0009-0002-7080-9350.

УДК 621.378

Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов

Алыбин В. Г., Авраменко С. В.

АО «Российские космические системы»
г. Москва, 111250, Российская Федерация
avramenko.gv@spacecorp.ru

Получено: 18 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрены наиболее сложные в реализации структурные схемы и варианты известных и предложенной конструкции двукратно резервированного твердотельного усилителя СВЧ мощности (РТУМ) для бортовой аппаратуры космических аппаратов, работающих в одном из частотных диапазонов L, S, C, X, K в сеансном режиме при включенном одном из трех входящих в его состав усилителей. Отмечены современные ключевые требования к РТУМ: срок активного существования не менее 10 лет при вероятности безотказной работы не менее 0,995, минимизация массы и габаритов, включая площадь, занимаемую РТУМ на термостатированной плите (ТСП), при которой средняя плотность теплового потока на нее порядка 0,2 Вт/см². Показаны достоинства и недостатки «двухэтажных» конструкций и конструкций с вертикальным расположением плат усилителей мощности по отношению к ТСП. Предложен РТУМ, в котором его составные части (СЧ) с большим тепловыделением и непосредственно связанные с ними СЧ размещены на основании корпуса РТУМ, установленного на ТСП через теплопроводящую прокладку, а все остальные СЧ расположены на боковых стенках корпуса. С их внешних сторон размещены коаксиальные разъемы входов и выходов СВЧ сигналов, разъемы для подачи электропитания, управления телеметрии и штенгель для герметизации РТУМ. Предложенный РТУМ удовлетворяет всем отмеченным требованиям, проще по конструкции и имеет меньший вес. Усилитель перспективен для использования в бортовой аппаратуре, включая командно-измерительные системы.

Ключевые слова: резервированный троированный твердотельный усилитель СВЧ мощности, термостатированная плита космического аппарата, источники вторичного электропитания, тепловыделение, срок активного существования, масса, габариты.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Алыбин В. Г., Авраменко С. В. Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 166—176.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Алыбин, В. Г. Двукратно резервированный твердотельный усилитель СВЧ-мощности для бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. Г. Алыбин, С. В. Авраменко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 166—176.

1. Введение

Твердотельные усилители СВЧ мощности нашли широкое применение в бортовой аппаратуре космических аппаратов (КА) благодаря достижениям последних десятилетий в твердотельной электронике с применением транзисторных усилителей на нитриде галлия [1, 2]. Большой КПД, малые габариты и достаточно большие рабочие мощности в СВЧ диапазоне частот обеспечили им преимущества по сравнению с вакуумными усилителями мощности (в основном, на лампах бегущей волны) для большинства применений, за исключением работы КА в дальнем космосе.

Однако уровень современной космической техники ставит новые задачи перед бортовыми передающими устройствами, СЧ которых и являются усилители СВЧ мощности.

Практически для всех усилителей СВЧ мощности (кроме предназначенных для использования в сверхмалых КА) остается требование резервирования их для обеспечения необходимого срока активного существования (САС), в большинстве случаев в виде дублирования или троирования их или их функциональных узлов. Такие резервированные твердотельные усилители мощности (РТУМ) имеют соответственно большие массу и габариты, особенно когда изготавливаются в разных корпусах.

Характерной особенностью РТУМ является необходимость в течение САС отведения тепла от транзисторов выходных каскадов включенного усилителя мощности и их источников вторичного электропитания (ИВЭП). С этой целью РТУМ, как и другие приборы КА, размещаются на ТСП, содержащей жидкостное охлаждение и обеспечивающей поддержание рабочих температур в течение САС в диапазоне от минус 20—40 °C до плюс 40—50 °C [3].

При этом площадь части корпуса РТУМ, контактирующей с ТСП КА, не должна быть меньше величины, при которой средняя плотность теплового потока с нее в установившемся режиме не превышала бы 0,2 Вт/см² для современных ТСП КА. С другой стороны, нежелательно делать

площадь этой части корпуса РТУМ больше требуемой, т. к. при этом растут габариты всего передающего устройства КА и, соответственно, место, занимаемое им на ТСП.

Особенностью РТУМ является его работа в сеансном режиме бортовой аппаратуры КА, при котором включается только один из резервируемых твердотельных усилителей мощности (ТУМ), а в это время остальные ТУМ находятся в «холодном» резерве, как и их ИВЭП [3, 4, 5]. Это позволяет рассчитывать необходимую площадь РТУМ, занимаемую им на ТСП КА, исходя из его одного включенного ТУМ. Основной проблемой сокращения площади, занимаемой РТУМ на ТСП, является размещение его части СЧ не на основании корпуса, контактирующего с ТСП КА, а в других элементах конструкции корпуса РТУМ. При этом, чем больше степень резервирования РТУМ (троирование вместо дублирования его СЧ), а также чем больше его требуемая выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), тем сложнее решается эта задача.

В данной статье рассматривается вариант конструкции троированного РТУМ, как наиболее сложного при условии удовлетворения перечисленных выше требований.

2. Анализ известных технических решений для РТУМ с минимальной площадью корпуса, занимаемой им на ТСП

На рис. 1 показана типичная структурная схема одиночного твердотельного усилителя СВЧ мощности (ТУМ) [1]. Он содержит по два усилительных входных и выходных каскадов ТУМ ($>_{\text{вх}}$) и ($>_{\text{вых}}$), заграждающий фильтр гармоник (Ф), цепь автоматической регулировки мощности (АРМ), включающую направленный ответвитель (НО) с детектором (ДЕТ), операционный усилитель (ОУ), управляющий аттенуатором (АТТ) и формирующий выход датчика выходной мощности (ДАТ_{Р_{вых}}). За Ф и НО с ДЕТ цепи АРМ расположен циркулятор (Ц) с согласованной нагрузкой (СН), которая типично рассчитана на мощность, равную половине номинальной $P_{\text{вых}}$ для предохранения УМ при нештатном нарушении во время его работы выходного контакта с цепью внешней антенно-фидерной системы.

Цепь датчика входной мощности ДАТ_{Р_{вх}} расположена на входе УМ (Вх) и состоит из НО с ДЕТ и ОУ, формирующего значение ДАТ_{Р_{вх}}.

Электропитание каскадов ТУМ $\langle >_{\text{вх}} \rangle$ и $\langle >_{\text{вых}} \rangle$ осуществляется с помощью ИВЭП, имеющего входные и выходные каскады (ИВЭП_{вх}, ИВЭП_{вых}).

На рис. 1 цветом выделены СЧ ТУМ без значительного тепловыделения, т. е. не нуждающиеся в хорошем теплоотводе от них; остальные СЧ

ТУМ требуют хорошего теплоотвода и поэтому их целесообразно размещать на ТСП или вблизи нее. К таким СЧ следует отнести и СЧ, составляющие единое целое с выходными каскадами УМ, к которым относятся Ф, НО АРМ с ДЕТ, вентили и Ц с СН.

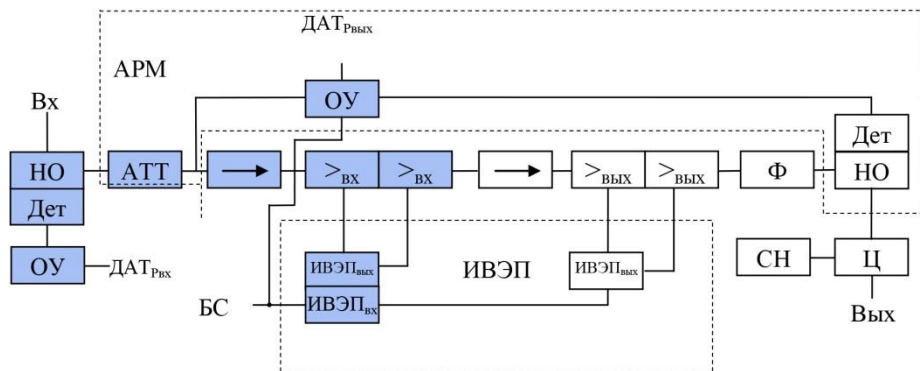


Рис. 1. Структурная схема одиночного ТУМ.

Fig. 1. Structural diagram of a single solid-state power amplifier

На рис. 2 показана типичная структурная схема РТУМ с двукратным резервированием (троированием) ТУМ.

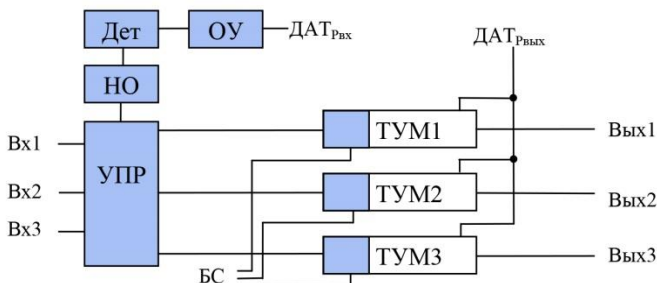


Рис. 2. Структурная схема троированного РТУМ.

Fig. 2. Structural diagram of a triple redundant solid state power amplifier

Отличием двукратно резервированного РТУМ является введение устройства перекрестного резервирования (УПР), имеющего два или три входа (V_{x1} , V_{x2} , V_{x3}) в зависимости от того, сколько резервируемых прямо-передающих устройств имеется в бортовой аппаратуре. Такие УПР строятся на микрополосковых линиях с применением мостов Ланге и делителей мощности Уилкинсона и имеют размерность 2×3 или 3×3 [6, 7] и реализуются в диапазонах частот, применяемых в бортовой аппаратуре КА (L , S , C , X , K).

Использование в троированном РТУМ УПР позволяет применить один ДАТ_{РВХ}, на который сигнал поступает от НО с ДЕТ с одного из выходов УПР, поскольку в УПР при подаче СВЧ сигнала на любой из его входов на любом из его выходов образуются сигналы одинаковой мощности, поступающие далее на входы ТУМ.

На рис. 2 цветом выделены СЧ РТУМ, которые целесообразно разместить не на плоскости корпуса, контактирующей с ТСП, включая СЧ ТУМ и цепь ДАТ_{РВХ}.

Известны технические решения для РТУМ, позволяющие сократить площадь его корпуса на ТСП, исходя из требований ограничения по тепловому потоку во время работы РТУМ.

На рис. 3 показана конструкция «двухэтажного» РТУМ [1]. На этаже, контактирующем с ТСП, целесообразно размещать каскады ТУМ с большим тепловыделением, а из соображений технологичности — все СЧ ТУМ, включая и их выходные каскады, вентили, циркулятор с СН и НО с ДЕТ цепи АРМ, а на «втором» этаже — УПР, цепь ДАТ_{РВХ}, входные каскады ИВЭП, выходные каскады ИВЭП для входных каскадов УМ и цепи СЧ АРМ с ДАТ_{РВЫХ}.

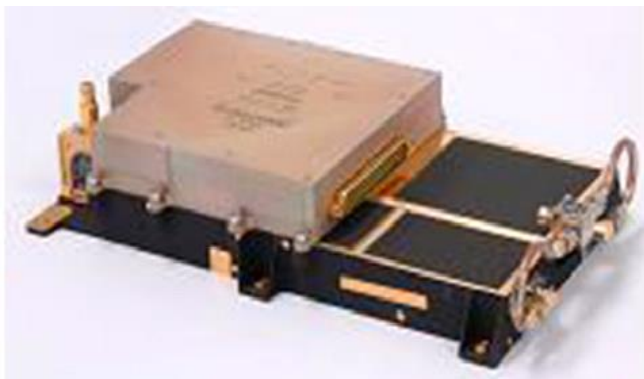


Рис. 3. Двухэтажная конструкция РТУМ С-диапазона частот.

Fig. 3. Double-deck redundant C-band solid-state power amplifier design

Недостатком этой конструкции является трудность размещения всех узлов троированного РТУМ на «втором» этаже, даже с учетом того, что в настоящее время уменьшение их габаритов диктуется возможностями использования многослойных печатных плат и создания гибридно-монолитных схем типа «система на кристалле» и «система в корпусе», а также технологическими трудностями реализации многочисленных межэтажных соединений.

На рис. 4 показана конструкция троированного РТУМ [5] с уменьшенной площадью, занимаемой им на ТСП до значения, удовлетворяющего требованиям теплоотвода при одном включенном ТУМ. Двукратно резервированный РТУМ содержит дублированный РТУМ и одиночный ТУМ, размещенные в двух корпусах, между которыми обеспечен тепловой контакт за счет теплопроводящей прокладки, размещенной между их частично перекрывающимися частями, обращенными к ТСП. Дублированный РТУМ содержит размещенную в корпусе пластину, параллельную двум его широким стенкам, на которой с обеих сторон размещены ТУМ1 и ТУМ2. Корпус РТУМ крепится на ТСП своей торцевой стенкой, перпендикулярной пластине с ТУМ1 и ТУМ2. В зоне, ближайшей к ТСП, пластина имеет увеличенную толщину, и в этой ее зоне размещаются узлы ТУМ1 и ТУМ2 с наибольшим тепловыделением. Уменьшение толщины пластины достигается с помощью паза, выполненного в верхней ее части. Тем самым обеспечивается уменьшение массы РТУМ.

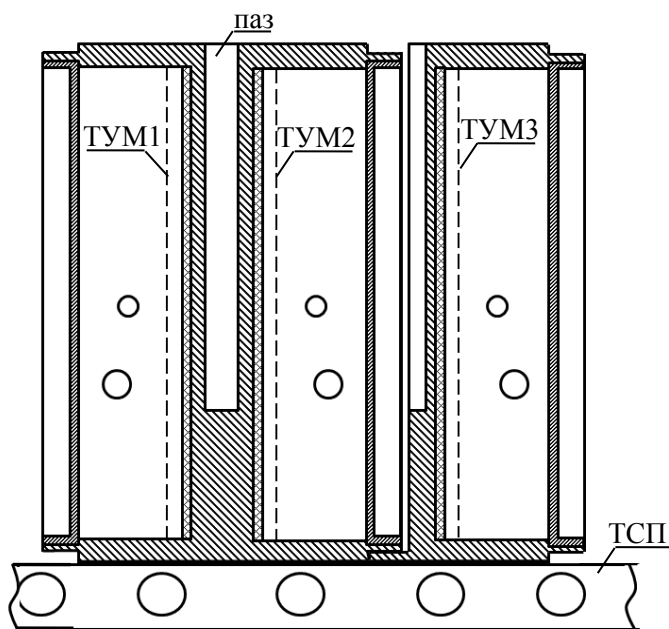


Рис. 4. Поперечное сечение троированного РТУМ.

Fig. 4. Cross section of a triple redundant solid state power amplifier

Одиночный ТУМ выполнен в отдельном корпусе и расположен на его широкой стенке, при этом толщина ее в зоне размещения тепловыделяющих элементов ТУМ3, контактирующей с ТСП, выполнена увеличен-

ной. Два корпуса троированного РТУМ скреплены между собой так, что ТУМ3 расположен параллельно ТУМ2.

Недостатком предложенной конструкции двукратно резервированного РТУМ является сложность конструкции, заключающаяся в необходимости изготовления двух корпусов РТУМ вместо одного с их отдельной герметизацией, изготовления трех герметичных крышек вместо одной, и ограничению максимально допустимой мощности из-за худшего теплоотвода, чем при контактировании тепловыделяющих частей РТУМ с частью корпусов, расположенных на ТСП.

3. Троированный РТУМ для БА КА

В данной работе предложен троированный РТУМ, который может быть реализован в одном из используемых в БА КА СВЧ-диапазонов (L , S , C , X , K). Его особенностью является размещение всех его СЧ в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2, в одном корпусе. При этом части УМ1, УМ2 и УМ3 и другие элементы РТУМ, выделенные цветом на рис. 2, размещены на боковых стенках корпуса, а СЧ РТУМ с большим тепловыделением и непосредственно связанные с ними СЧ размещены на основании корпуса, непосредственно контактирующего с ТСП.

На рис. 5 показана развертка корпуса РТУМ. Обозначения всех узлов РТУМ сохранены такими же, как и на рисунках 1 и 2. Для большей информативности у ряда из них поставлены порядковые номера ТУМ.

На основании 1 корпуса размещены вентили, выходные каскады ТУМ с выходными каскадами ИВЭП, загораживающие фильтры, направленные ответвители и циркуляторы с относительно малыми согласованными нагрузками.

На боковой стенке 2 корпуса расположены устройство перекрестного резервирования (УПР), совмещенное с двумя или тремя входами (в зависимости от числа приемо-передающих устройств БА) и входные каскады ТУМ с выходными каскадами ИВЭП.

Боковая стенка 3 корпуса свободна от размещения на ней СЧ РТУМ.

На стенке 4 корпуса с внешней стороны расположены разъемы выходов РТУМ и, при необходимости, штенгель для герметизации корпуса.

На стенке 5 корпуса с внешней стороны размещены разъемы входов электропитания, управления конфигурацией РТУМ, входные каскады ИВЭП, операционные усилители, формирующие показания датчиков $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$, а также выходы этих датчиков.

Крышка корпуса на рис. 5 не показана.

Таким образом, внутри корпуса организовано шесть угловых соединений СВЧ диапазона, развязанных с помощью вентиля и циркуляторов, и четыре низкочастотных угловых соединения.

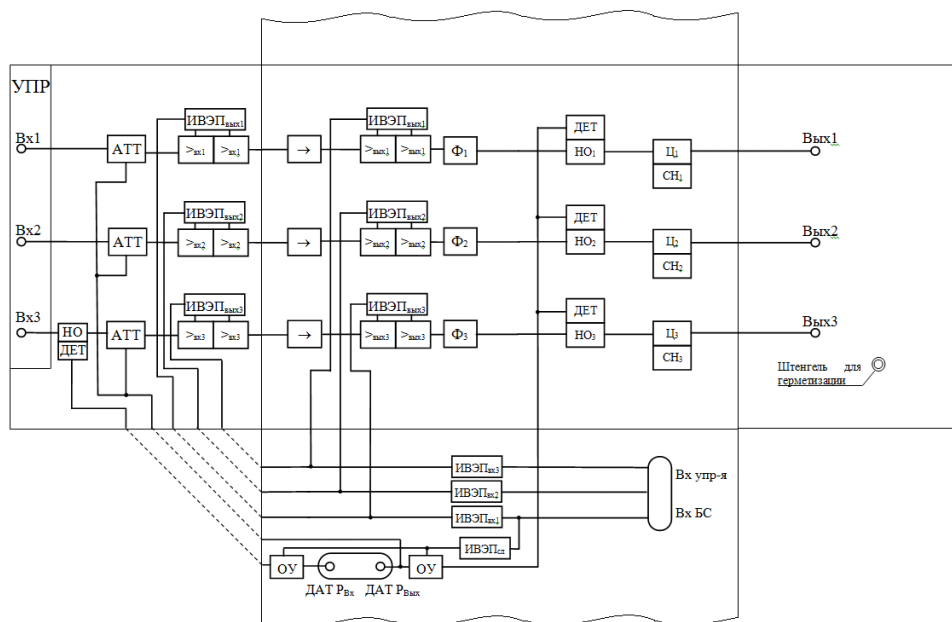


Рис. 5. Развертка корпуса троированного РТУМ.

Fig. 5. Trinity redundant solid state power amplifier case unfold

Предложенная конструкция РТУМ выгодно отличается от известных технических решений, т. к. имеет меньшую массу, конструктивно проще и обладает более благоприятными возможностями по достижению максимальной выходной СВЧ мощности. Наиболее приемлемым вариантом применения предложенного РТУМ является, в частности, бортовая аппаратура командно-измерительной системы для малых КА с массой порядка сотен кг, с САС 10—15 лет при вероятности безотказной работы не менее 0,995 и с минимальной площадью, занимаемой РТУМ на ТСП.

4. Заключение

Представлены современные конструкции РТУМ СВЧ диапазонов для БА КА, удовлетворяющие жестким требованиям по габаритно-массовым характеристикам, включая площадь, занимаемую РТУМ на ТСП, по САС, по максимальной выходной СВЧ мощности и по технологичности.

Предложен вариант реализации РТУМ с использованием для размещения его СЧ как основания корпуса, контактирующего с ТСП, так и его боковых стенок. Показаны преимущества этого варианта РТУМ по срав-

нению с известными техническими решениями. Предложенный двукратно резервированный РТУМ приемлем для создания как БА командно-измерительных систем для малых КА (порядка сотен кг) с относительно большим САС (10—15 лет), так и для БА более крупных КА.

Список литературы

1. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С. Бортовые твердотельные СВЧ-усилители мощности будущего для командно-измерительных систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, вып. 3. С. 89—97.
2. Гуляев В. И., Глазунов В. В., Зыкова Г. С., Мякишев Ю. Б., Мончарес Н. В. Усилитель с выходной мощностью 15 Вт диапазона 8,5—12,5 ГГц на GaN КМИС. В сб. : 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2012 (Севастополь, 10—14 сент. 2012 г.). 2012. С. 72—73.
3. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С., Рожков В. М., Авраменко С. В. Особенности конструкции усилителей СВЧ мощности для служебных систем космических аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 1. С. 70—78.
4. Коновалов С. Д., Тазиков А. А., Алыбин В. Г. Повышение надежности и улучшение массогабаритных параметров усилителя мощности СВЧ для бортовой аппаратуры командно-измерительных систем. В сб. : «Будущее российской космонавтики в информационных разработках молодых ученых и специалистов предприятий ракетно-космической промышленности Московской области. По итогам науч.-практич. конф... (Королев, 4—6 апреля 2011 г.). 2012. Ч. 1. С. 118—120.
5. Алыбин В. Г., Сёмочкин А. С. Управление современными автоматическими космическими аппаратами. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. Т. 2. С. 272—284.
6. Делитель мощности 2×3 , 3×2 для бортовой аппаратуры космических аппаратов : пат. 2766843 Рос. Федерация № 2021104707 ; заявл. 25.02.2021 ; опубл. 16.03.2022, Бюл. № 8. 9 с.
7. Делитель мощности 3×3 для бортовой аппаратуры космических аппаратов : пат. 2693877 Рос. Федерация № 2018141772 ; заявл. 27.11.2018 ; опубл. : 05.07.2019, Бюл. № 19. 8 с.

Информация об авторах

Алыбин Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник центра АО «Российские космические системы», г. Москва.

Авраменко Сергей Владимирович, кандидат технических наук, начальник бюро дирекции АО «Российские космические системы», г. Москва.

Twofold Reserved Solid-State Amplifier of UNF Power for Onboard Equipment of Spacecraft's

V. G. Alybin and S. V. Avramenko

Joint-stock company «Russian space systems»

Aviamotornaya str., 53, Moscow, 111250, Russian Federation

avramenko.gv@spacecorp.ru

Received: May 18, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: The paper considers a block diagram, known constructions, and proposed design of a double redundant solid-state microwave power amplifier (RSSPA) for spacecraft onboard equipment. Modern requirements of the RSSPA to a thermostatically controlled plate (TCP) used to remove heat from only one amplifier of the RSSPA are stated. The advantages and disadvantages of “two-storey” constructions and design with vertical positioning of power amplifier boards with respect to the TCP are shown. The paper proposes the RSSPA, in which its components with a high heat dissipation and the components directly connected with them are placed on the base of the RSSPA case mounted on the TCP via a thermally conductive pad, and all other components are placed on the side walls of the case. Its design is simpler and lighter. The proposed RSSPA is perspective for spacecraft onboard equipment including command and measurement systems.

Keywords: double redundant solid-state power amplifier, microwave power, thermostatically controlled plate, spacecraft, secondary power supply source, active operating life, mass, dimensions.

For citation (IEEE): V. G. Alybin and S. V. Avramenko, “Twofold Reserved Solid-State Amplifier of UNF Power for Onboard Equipment of Spacecraft's,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 166–176, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.13. (In Russ.).

References

- [1] V. G. Alybin and A. S. Syomochkin, “Onboard Microwave Solid-State Power Amplifiers for Future Command and Measurement Systems.” *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, vol. 3, pp. 89–97, 2016. (In Russ.). DOI: 10.17238/issn2409-0239.2016.3.89.
- [2] V. I. Gulyaev, V. V. Glazunov, G. S. Zukova, Y. B. Myakichev, and N. V. Monchares, “Amplifier with Power 15 W, 8,5–12,5 GHz on GaN CMIS,” in : 22nd International Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology,” Sevastopol, 2012. pp. 72–73. (In Russ.).
- [3] V. G. Alybin, A. S. Syomochkin, V. M. Rogkov, and S. V. Avramenko, “Major Items of Construction Amplifiers of UHF Power for the Auxiliary Systems of Spacecrafts.” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 70–78. (In Russ.). doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.05.

- [4] S. D. Konovalov, A. A. Tazikov, and V. G. Alybin, "Reliability rise and improvement of mass-gabarit parameters of onboard Equipment command and measurement systems," in : *Science-practice Conf. of young scientists. Rocket-Space Industry* (Korolyov, April 4–6, 2011), Part 1, 2012, pp. 118–120. (In Russ.).
- [5] V. G. Alybin and A. S. Syomochkin, "Directional of modern automatic Spacecrafts." 28th *Intern. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technologies"* (Sevastopol, Sept. 9–15, 2018), vol. 2, pp. 272–284. (In Russ.).
- [6] S. A. Zarapin et al., Pat. No. 2766843 (RF), "Power divider 2×3 , 3×2 for spacecraft onboard Equipment." Bull. of Inventions, no. 8, 2022. (In Russ.).
- [7] V. G. Alybin et al., Pat. No. 2693877 (RF), "Power divider 3×3 for onboard equipment spacecraft's," Bull. of Inventions, no. 19, 2019. (In Russ.).

Information about the authors

Vyacheslav G. Alybin, DSc., Russian space systems Co., Moscow, Russian Federation.

Sergey V. Avramenko, CSc, Russian space systems Co., Moscow, Russian Federation.

УДК 551.508.855

Разработка и результаты испытаний радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц

Букрин И. В., Плохих О. В., Иванов В. Э.

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
ул. Мира, 32, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
i.v.bukrin@urfu.ru*

Получено: 19 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: В работе представлены результаты разработки и испытаний разработанного сотрудниками ИРИТ-РТФ УрФУ рабочего образца радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц для исследования атмосферы. Приведены некоторые характеристики радиолокатора, в т. ч. спектры отраженных сигналов от метеорологических неоднородностей.

Ключевые слова: радиолокатор параметров ветра, профайлер, турбулентность атмосферы, пограничный слой.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Букрин И. В., Плохих О. В., Иванов В. Э. Разработка и результаты испытаний радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 2. С. 177—186.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Букрин, И. В. Разработка и результаты испытаний радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц / И. В. Букрин, О. В. Плохих, В. Э. Иванов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 177—186.

1. Введение

Известно, что наземные методы измерения параметров атмосферы имеют ограничения по высоте, радиозондовые измерения требуют длительного времени для подъема радиозондов до высот порядка 10—30 км и достаточно сильно дискретны по времени (2 раза в сутки) [1, 2]. Однако для построения климатической модели Земли необходимы оперативные данные для оценки метеорологической обстановки. По этой причине в ми-

ре построены глобальные сети радиолокаторов параметров ветра (РПВ), или профайлеров, для получения оперативных данных по состоянию атмосферы. На рисунке 1 изображена карта расположения глобальных сетей профайлеров, созданных к 2005 году [3]. На 9 марта 2005 года по территории всего земного шара (за исключением территории России) было размещено 852 таких профайлеров. В конце 80-х годов работы по разработке РПВ начались одновременно в США и СССР. С развалом Советского Союза эти работы были остановлены и больше не возобновлялись до настоящего времени.

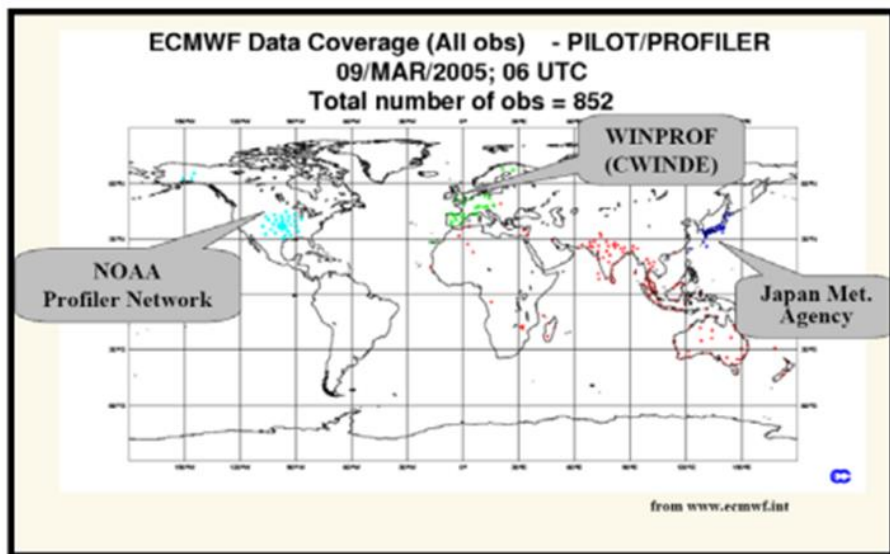


Рис. 1. Расположение глобальных сетей профайлеров в 2005 г.

Fig. 1. Location of global profiler networks in 2005

Большим достоинством РПВ является то, что они могут выдавать данные о ветре практически непрерывно, с разрешением в 10 мин. Обычно информация выдается с дискретностью 1 час. Другим достоинством радиолокационных средств зондирования является возможность практически автономной работы этих систем с автоматической передачей данных в центры сбора метеорологической информации [4—6].

За рубежом в основном используются РПВ двух диапазонов: 400—500 МГц для высот от 300 до 16000 м, и профайлеры пограничного слоя, работающие на частотах 900—1300 МГц. В работе [7] обсуждается возможность создания радиолокатора параметров ветра пограничного слоя, работающего на частоте 1680 МГц.

2. Состав и характеристики РПВ диапазона 1680 МГц

Одним из важнейших направлений исследований и разработок специалистов ИРИТ-РТФ УрФУ является создание опытных и промышленных образцов технических средств радиозондирования атмосферы. С 2018 года по контракту с Роскосмосом разрабатывался РПВ диапазона 500 МГц, в 2021 году разработался Аэрологический радиолокационный вычислительный комплекс (АРВК) «Вихрь».

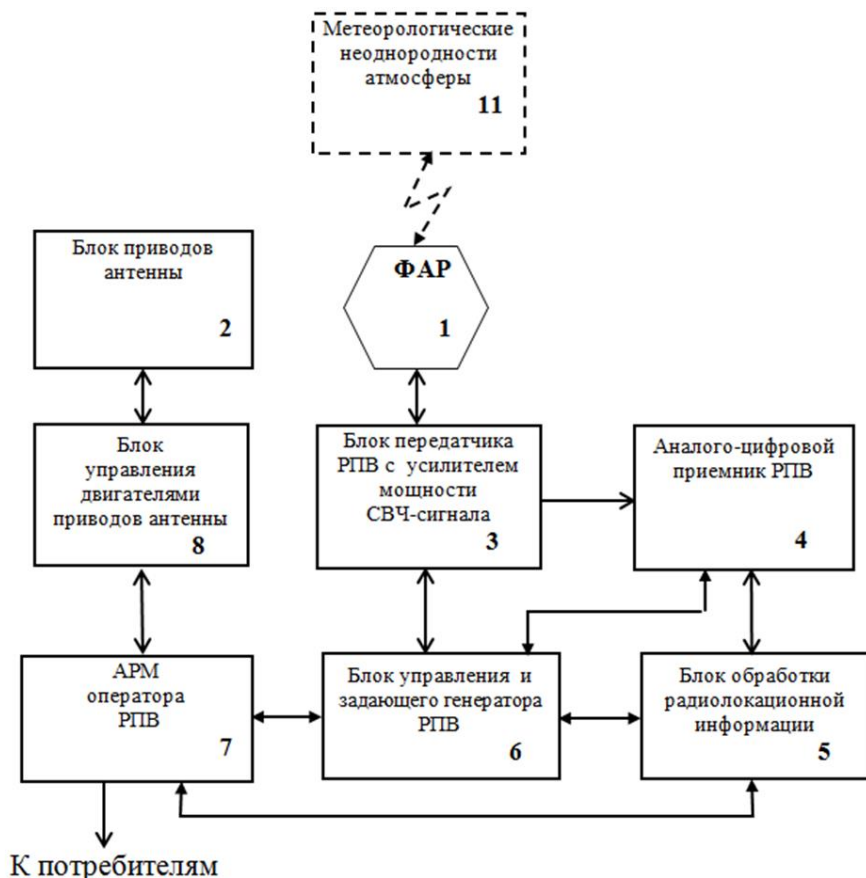


Рис. 2. Упрощенная структурная схема РПВ диапазона 1680 МГц.

Fig. 2. Simplified block diagram of the 1680 MHz wind radar

С учетом опыта разработки РПВ диапазона 500 МГц и АРВК «Вихрь» к 2023 году в инициативном порядке специалистами ИРИТ-РТФ был создан рабочий образец РПВ диапазона 1680 МГц.

Упрощенная структурная схема РПВ изображена на рисунке 2.

Блоки системы имеют следующие функции. Блок управления и задающего генератора передает СВЧ-сигнал на усилитель мощности блока передатчика, который усиливает его до необходимой мощности и передает его на ФАР, так же через ФАР принимается отраженный сигнал и через блок передатчика передается в аналого-цифровой приемник РПВ. Аналого-цифровой приемник РПВ получает принимаемый ответный сигнал от блока передатчика РПВ, усиливает, преобразует его и передает в блок обработки радиолокационной информации. Блок обработки радиолокационной информации принимает сигнал от аналого-цифрового приемника РПВ, производит необходимую обработку и результаты обработки передает в АРМ оператора РПВ. АРМ оператора РПВ через блок управления и задающего генератора управляет всей работой РПВ, положением антенны, а также получает обработанную информацию от блока обработки радиолокационной информации, преобразует ее в необходимый вид для дальнейшего использования, учета и хранения.

Технические характеристики приводятся в таблице 1. Внешний вид радиолокатора показан на рисунке 3.

Табл. 1. Технические параметры профайлера диапазона 1680 МГц.

Table 1. 1680 MHz Band Profiler Specifications

№ п/п	Технический параметр	Значение параметра	Примечание
1.	Несущая частота передатчика, МГц	1680 ±0,1 $\lambda = 17-18$ см	
2.	Импульсная мощность передающего модуля, не менее, кВт	0,4	
3.	Длительность когерентных радиоимпульсов, мкс (модуляция АИМ)	0,6	Скважность радиоимпульсов не менее 200
4.	Ширина полосы излучения главного лепестка спектра излучения, МГц	0,7-4,0	Определяется длительностью радиоимпульса
5.	Класс излучения по таблице № 4 (тип модуляции) Класс излучения по таблице № 1 Главы III (НШПИ)	4M30PON CASK M=16 NPN	Последовательность когерентных радиоимпульсов
6.	Период следования радиоимпульсов, мкс	120	
7.	Минимальная скважность излучаемых радиоимпульсов	200	Определяется средней мощностью передатчика
8.	Ширина диаграммы направленности ФАР, °	6	

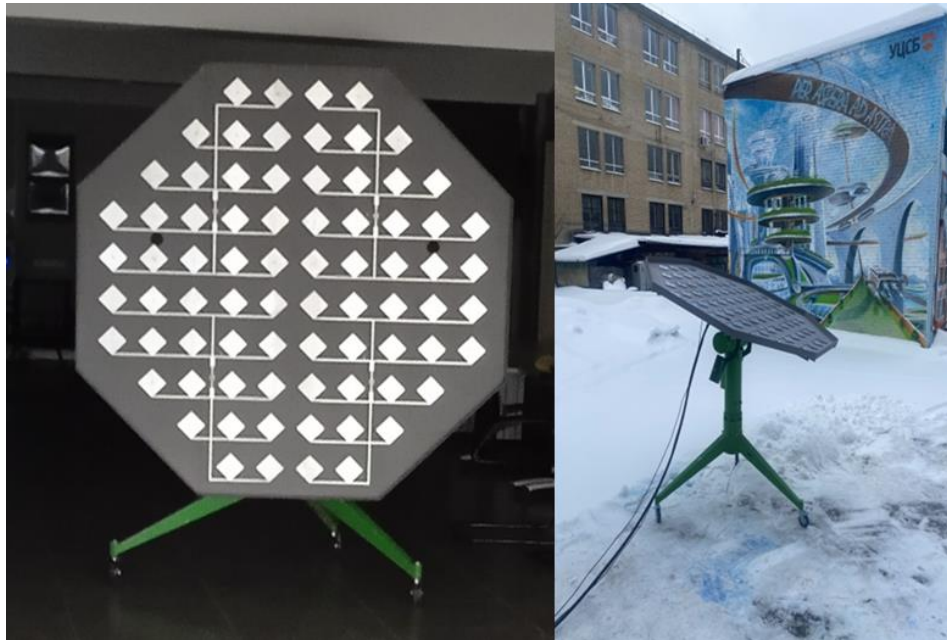


Рис. 3. Рабочий образец РПВ диапазона 1680 МГц.

Fig. 3. Working sample of the RPV of the 1680 MHz band

3. Некоторые результаты испытаний РПВ диапазона 1680 МГц

РПВ предназначены для получения сигнала от метеорологических неоднородностей в условиях отражения от абсолютно ясного неба. Интенсивность сигнала, особенно в таких условиях, как правило, очень мала. Она превышает предел чувствительности приемника РПВ и составляет приблизительно минус 180—190 дБ/Вт [8]. Поэтому в РПВ используется когерентное накопление ответного сигнала для получения доплеровского спектра, характеризующего параметры ветра.

Обработка и запись полученного сигнала осуществлялась средствами высокочастотного когерентного программно-аппаратного измерительного комплекса. Разрядность модуля оцифровки равна 16, частота дискретизации 20 МГц, период зондирующих импульсов 120 мкс, длительность зондирующих импульсов 0,6 мкс. Временная развертка (0—899 отсчетов) соответствует дальности зондирования от 0 до 6750.

На рисунке 4 представлены спектры ответного сигнала на высотах 394 и 1127 м по одному из направлений, из которых видно, что с увеличением высоты ветер меняет направление на противоположное.

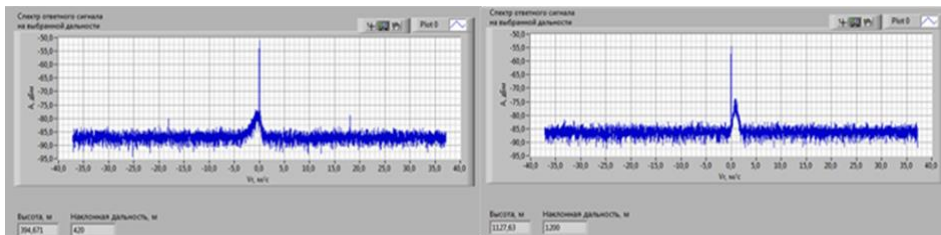


Рис. 4. Спектры ответного сигнала на высотах 394 и 1127 м.

Fig. 4. Spectra of the response signal at altitudes of 394 and 1127 m

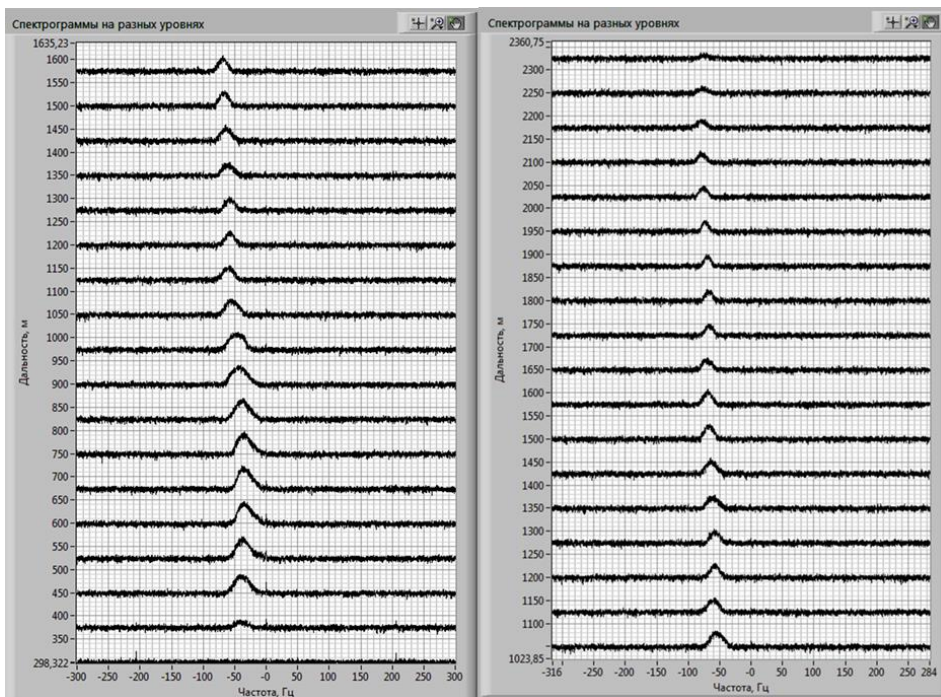


Рис. 5. Спектрограммы ответных сигналов на высотах от 300 до 1600 м и от 1050 до 2350 м.

Fig. 5. Spectrograms of response signals at altitudes from 300 to 1600 m and from 1050 to 2350 m

На рис. 5 изображены спектрограммы ответных сигналов, полученных и обработанных в ходе испытаний по одному из направлений. По результатам эксперимента можно утверждать следующее: ответный сигнал уверенно принимается на дальностях свыше 2 км, на рисунке 5 верхняя спектрограмма на наклонной дальности 2360 м соответствует высоте 2218 м, при этом полезный сигнал уверенно различим. По мере увеличения высоты частота доплеровского сигнала плавно увеличивается с 40 до

70 Гц, что соответствует горизонтальной составляющей скорости ветра в этом направлении от 10 до 19 м/с. Разрешение по высоте составляет 75 м. Нижняя граница полезного сигнала ограничена отражением от местных предметов. Искажение формы спектра ответного сигнала от гауссовского распределения говорит о том, что время накопления ответного сигнала превышает время стационарности атмосферы и несет дополнительную информацию об изменениях параметров ветра, которую при необходимости можно определять и использовать [9].

4. Заключение

Представлены результаты разработки, изготовления рабочего образца и испытаний радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц. Показаны результаты испытаний созданного рабочего образца радиолокатора параметров ветра диапазона 1680 МГц. В ходе эксперимента получены спектры ответных сигналов и построены спектрограммы ответного сигнала для высот от 300 м до 2218 м. Кроме того, представленный РПВ имеет достаточно большой задел для увеличения энергии зондирующего импульса, что позволит увеличить высоту измерения параметров ветра до 4—5 км. Полученные результаты показывают возможность применения частоты 1680 МГц для работы радиолокаторов параметров ветра пограничного слоя атмосферы (до высот 4—5 км).

Список литературы

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере земли / Под ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков : Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники ; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
2. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. 596 с.
3. White A. B., Ralph F. M., Jordan J. R., King C. W., Gottas D. J., Neiman P. J., Bianco L., White D. E. Expanding the NOAA Profiler Network: Technology evaluation and new applications for the coastal environment. In : Proc., 7th Conf. on Coastal Atmos. and Oceanic Prediction and Processes. Sep. 10–13, 2007. San Diego, California, AMS Boston, 26 pp.
4. Довиак. Р., Зрнич. Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер.с англ. А. А.Черникова. Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. 512 с.
5. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Щукин Г. Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 18. С. 70—89.
6. Стерлядкин В. В., Кононов М. А. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС миллиметрового диапазона длин волн // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 158. С. 52—59.
7. Букрин И. В., Гусев А. В., Кудинов С. И., Иванов В. Э., Плохих О. В., Шабунин С. Н. Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере // Ural Radio Engineering Journal. 2021. Т. 5, № 1. С. 32—48.

8. Радиолокационные отражения от ясного неба в диапазоне 35 ГГц / В. В. Стерлядкин, К. В. Куликовский, В. М. Калмыков, Д. В. Ермилов // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 9. С. 863—871.
9. Литвин-Попович А. И., Олейников В. Н.. Повышение эффективности цифровой обработки сигналов РЛС вертикального зондирования атмосферы // Прикладная радио-электроника. 2008. Том 7, № 4. С. 400—403.

Информация об авторах

Букрин Илья Владимирович, аспирант, инженер Института радиоэлектроники и телекоммуникаций — РТФ Уральского федерального университета, Екатеринбург, Российская Федерация

Плохих Олег Васильевич, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций — РТФ Уральского федерального университета, Екатеринбург, Российская Федерация.

Иванов Вячеслав Элизбарович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета, Екатеринбург, Российская Федерация.

Development and Test Results of the 1680 MHz Wind Parameters Radar

I. V. Bukrin, O. V. Plokhikh, and V. E. Ivanov

Ural Federal University n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin
Mira str., 32, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation
i.v.bukrin@urfu.ru

Received: May 19, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: The paper presents the results of the development and testing of a working sample of the 1680 MHz band wind parameters radar developed by the staff of IRIT-RTF UrFU for atmospheric research. Some characteristics of the radar, spectra of reflected signals from meteorological inhomogeneities are given.

Keywords: wind parameters radar, profiler, atmospheric turbulence, boundary layer.

For citation (IEEE): I. V. Bukrin, O. V. Plokhikh, and V. E. Ivanov, "Development and Test Results of the 1680 MHz Wind Parameters Radar," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 177–186, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.14. (In Russ.).

References

- [1] *Remote methods and means of studying processes in the earth's atmosphere* / Ed. by B. L. Kashcheeva, E. G. Proshkina, and M. F. Lagutina, Kharkov : Kharkov nat. university of radio electronics ; Business Inform, 2002. (In Russ.).
- [2] V. E. Ivanov, M. B. Fridzon, and S. P. Essyak, *Radio sounding of the atmosphere*, Ekaterinburg : UrFU-UPI, 2004. (In Russ.).
- [3] White, A. B., F. M. Ralph, J. R. Jordan, C. W. King, D. J. Gottas, P. J. Neiman, L. Bianco, and D. E. White, 2007: Expanding the NOAA Profiler Network: Technology evaluation and new applications for the coastal environment. *Proc., 7th Conf. on Coastal Atmos. and Oceanic Prediction and Processes*, 10-13 Sep., 2007, San Diego, California, AMS Boston, 26 pp.
- [4] R. J. Doviak and D. S. Zrnic, *Doppler Radar and Weather Observation*, Orlando et al. : Academic Press, 1984.
- [5] A. G. Gorelik, S. F. Kolomiets, and G. G. Shchukin, "Information capabilities of wind profilers in atmospheric sounding," *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, no. 18. pp. 70–89, 2011. (In Russ.).
- [6] V. V. Sterlyadkin and M. A. Kononov, "Calculation of the potential and assessment of the capabilities of a wind meteorological radar in the millimeter wave range," *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 158, pp. 52–59, 2010. (In Russ.).
- [7] I. V. Bukrin, A. V. Gusev, S. I. Kudinov, V. E. Ivanov, O. V. Plokhikh, and S. N. Shabunin, "Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere," *Ural Radio Engineering Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 32–48, 2021. (In Russ.). doi: 10.15826/urej.2021.5.1.003.

- [8] V. V. Sterlyadkin, K. V. Kulikovskii, V. M. Kalmykov, et al. “Radar Reflections from a Clear Sky in the 35 GHz Range,” *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 66, pp. 1020–1027, 2021. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090163>.
- [9] A. I. Litvin-Popovich and V. N. Oleinikov, “Improving the efficiency of digital signal processing for vertical atmospheric sounding radar,” *Applied Radio Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 400–403, 2008. (In Russ.).

Information about the authors

Ilya V. Bukrin, Post-graduate student, Engineer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications – RTF, Ural Federal University, Russian Federation.

Oleg V. Plokhikh, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications – RTF, Ural Federal University, Russian Federation.

Vyacheslav E. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Telecommunications – RTF, Ural Federal University, Russian Federation.

Diode Character of Local Conductivity of Human Buccal Epithelial Cell Membranes

N. A. Torkhov and A. A. Mosunov

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 99053, Russian Federation

trkf@mail.ru, aamosunov@sevsu.ru

Received: May 16, 2023

Peer-reviewed: May 25, 2023

Accepted: May 25, 2023

Abstract: *AFM methods revealed unilateral (diode) local electrical conductivity of the membrane of human buccal epithelium cells at the nanoscale and its correlation with the topology of micromechanical properties.*

Keywords: *human buccal epithelial cells, conductivity, AFM methods.*

For citation (IEEE): N. A. Torkhov and A. A. Mosunov, “Diode Character of Local Conductivity of Human Buccal Epithelial Cell Membranes,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 187–193, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.15.

1. Introduction

Intensive development of bioelectric integrated human systems based on the propagation of constant [1] and variable [2] electrical signals in his tissues requires study of the electrical properties of the body at the cellular level. Great information content regarding the influence of various physical and mechanical factors (signals), good accessibility and non-traumatic reproduction of sampling, simplicity and cheapness of sample preparation makes buccal epithelium cells of the human oral mucosa a convenient biological object for conducting such studies [3]. The research results can serve as a source of important diagnostic and prognostic information about socially significant human diseases, stress effects, the influence of environmental factors and xenogenic intoxication, pharmacology [1, 4].

Currently, one of the common probe methods for local measurement of currents of various channels of biological membranes in static mode is the so-

called “patch-clamp” (patch-clamp [5]) method, which is based on the fact that under certain conditions, the open end of a glass microelectrode pipette can form a sufficiently tight contact with the surface of the cell membranes with a resistance of $10^9 \Omega$. For the development of this method, E. Neer and B. Sakman were awarded the Nobel Prize in 1991.

One of the advantages of this method is that the size of the tip of the measuring probe (a metal microelectrode, or a glass micropipette filled with an electrolyte solution), in contrast to the “potential fixation” method previously used at the meso-level (the diameter of the pipette hole $\sim 60 \mu m$ [5]), had a significantly smaller size of the tip of the metal needle, or output the holes of the micropipette are of the order of one micrometer, and, consequently, a smaller S_c contact area. This made it possible more accurately investigate the electrophysical (for example, the electrostatic resting membrane potential) and conductive (electric currents at the level of $10^{-12} A$) properties of membranes, and the behavior of various transport processes in them at the micron ($3\text{--}10 \mu m$) level, determined in this case by the accuracy of the spatial positioning of mechanical micromanipulators. The positioning accuracy of modern mechanical micromanipulators usually varies from units to tens of micrometers, which in most cases is commensurate with the external dimensions of cells and for this reason allows us to obtain only some averaged values of the electrophysical characteristics of cell membranes at the micron level. In general, this method allows conducting research within the framework of classical electrophysiological concepts, as well as investigating the effect of drugs when they are directly brought to the membrane.

According to the laws of electrostatics, if the dimensions of the conducting probe and the studied object (cell) are commensurate, all areas of the cell will participate in the conductivity, which makes it difficult to interpret the results. In other words, the entire membrane will participate in conducting of electric current as a kind of structured conductor, in the conductivity of which all its organelles will be involved.

The high spatial and functional resolution of AFM methods allows, unlike the methods described above, obtain accurate values of geometric and functional parameters in 3D projection at the nano- and atomic level. In this case, when the sizes of electrical contacts vary from units to tens of nanometers, the electrical effect does not cover the entire object, but due to the effect of spreading currents only the local area around the contact, usually not exceeding the size of most cellular organelles.

In addition, AFM methods have a large set of functional characteristics measured in a wide range of temperatures (for example, from $-4^\circ C$ to $>100^\circ C$)

and pressures (up to $\sim 10^{-3}$ Top), as well as in various gaseous and liquid media: relief, phase contrast, tribological properties, spatial distribution of micromechanical and electrophysical characteristics on direct and alternating currents, galvanic and magnetic effects.

All these AFM capabilities make it possible to carry out local controlled effects on biological objects not only at the cellular, but also at the molecular level, which opens up wider opportunities and prospects at new qualitative and quantitative levels to investigate the conductive properties and mechanisms of functioning of various intercellular and membrane channels, changes in the membrane potential and maintenance of electrical stability of the cell, physico-chemical mechanisms of various receptors action, nature of the transformation of mechanical stimulation into electrical signals (for example, in cardiomyocytes and fibroblasts), nature of mechanoelectric feedback through highly permeable contact zones of membranes and much more.

Nevertheless, despite the obvious successes in this direction, the volume of experimental data on the electrophysical nature of cell membranes and their reactions to local external electrical stimuli is still extremely insufficient.

In this regard, the purpose of this work is to study by atomic force microscopy (AFM) the conducting ability of the membrane of living human buccal epithelium cells.

2. Materials and methods

The object of the study was human buccal epithelial living cells (hereinafter referred to as cells) obtained by liquid cytology. This method included mechanical sampling (scraping) from the inner surface of the cheek of the mucous membrane oral cavity, washing of the scraping in a phosphate buffer (3.03 mM phosphate buffer with the addition of 2.89 mM calcium chloride with a volume of 5 ml, pH 7.0), placing this mixture in a test tube and separating its contents in a centrifuge for 5 minutes with an acceleration of 1700 g (5000 min^{-1}), taking aliquots of a buffer solution containing suspension of living buccal epithelial cells. The epitaxial structure of silicon of p-type conductivity p– p+– Si{111} with the size of irregularities <20 pm was used as a substrate material.

After placing the aliquot on the epitaxial surface of silicon Si{111}, it was dried in air at normal atmospheric pressure and temperature $T = 40^\circ\text{C}$ for <10 minutes. The living cells in the aliquot were naturally deposited on the epitaxial silicon surface and preserved on it in this form for 3–4 hours after evaporation of the main amount of moisture. The presence of an adsorption layer of buffer solution on the cell surface maintained their viability during a relatively long stay in the air under normal conditions (NU).

Studies of the geometry of the relief (Fig. 1) of the surface of cell membranes and their electrical conductivity – the electron-hole spreading current I_{pr} (hereinafter referred to as the spreading current I_{pr}) (Fig. 2a and Fig. 3a) was carried out in the air at NU using the NTEGRA-AURA AFM with a scanning object table in contact scanning mode and a resolution of 300×300 points providing constant mechanical and electrical contact of the needle tip of the cantilever with a constant pressing force to the surface of the “Molecular Structure of matter” conducted on the basis of the Center for Collective Use Sevastopol State University. Conductive HA-FM/W2C cantilevers with a radius of rounding of the needle tip $r \sim 35$ nm were used as a measuring probe. The cantilever was grounded.

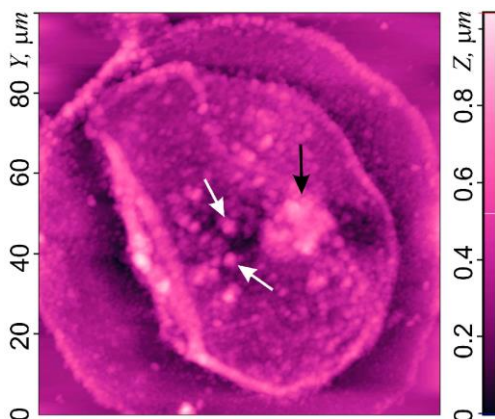


Fig. 1. Raster AFM image of the relief of a living human buccal epithelium cell

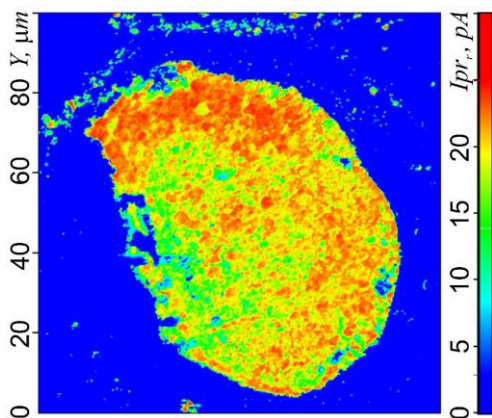


Fig. 2a. Raster AFM image of the distribution of spreading currents $I_{pr} = I_{pr}(x; y)$ on the surface of the membrane of a living human buccal epithelium cell with a reverse displacement $U_r = -3$ V

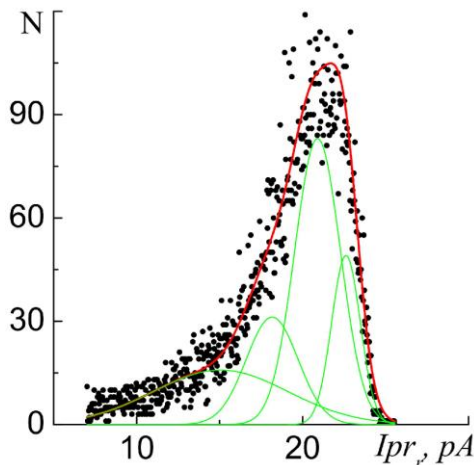


Fig. 2b. The histogram $N=N(Ipr)$ presented in Fig. 2a spreading currents

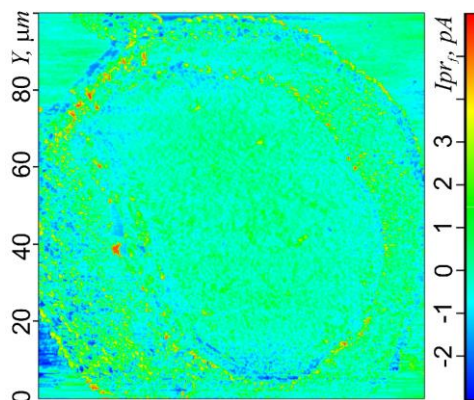


Fig. 3a. Raster AFM image of the distribution of spreading currents $Ipr=Ipr(x;y)$ on the surface of the membrane of a living human buccal epithelium cell with a forward displacement $Ur=+3$ V

3. Results

The location of the cell nucleus (Fig. 1, black arrow) and the surrounding organelles (Fig. 1, white arrows) are clearly visible on the surface of the membranes. At the same time, the shell surface itself is not smooth, but has a sufficiently developed relief with a well-defined morphological structure and mechanical organization [6, 7].

Studies have revealed unilateral heterogeneous conductivity of the membrane of human buccal epithelium cells. To determine the type of conductivity (ionic, electron or hole), further research is necessary.

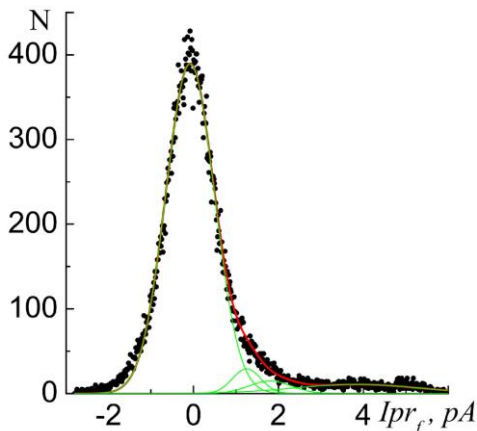


Fig. 3b. Histogram $N=N(Ipr)$ of the spreading currents shown in Fig. 3a

The histogram of the distribution $N = N(Ipr_i)$ shows that the membrane is formed by regions with different electrical conductivity (Fig. 2b), which are formed by a set of smaller areas with similar values of spreading currents $Ipr_i = Ipr_i(x, y)$. Studies have shown that the topology of these sites coincides quite well with the topology of local terrain irregularities (Fig. 1) and the distribution of adhesive forces over the membrane surface $F_{adh} = F_{adh}(x, y)$, as well as the work performed by them $A_{adh} = A_{adh}(x, y)$ [7]. A more detailed analysis showed that ion nanochannels penetrating the membrane have several times higher conductivity compared to their surrounding surface. At the same time, as follows from Fig. 1, the heterogeneity of membrane conductivity partially correlates with the nature of the location of some cell organoids. This may indicate the existence of an electrical connection of such organoids with the cell membrane.

Comparison of raster images of spreading currents revealed one-sided electrical conductivity of the membrane. So, for $U_r < 0$, the average values of currents $\langle Ipr_r \rangle = 20.8 \text{ pA}$ (Fig. 2a) significantly exceed the values of $\langle Ipr_l \rangle = 0.01 \text{ pA}$ for $U_r > 0$ (Fig. 3a).

Studies have shown that, depending on the state of the cell, the conductivity of different areas of the cell membrane can vary within a sufficiently wide range, which can be used to assess the state of the cell.

The research was conducted in accordance with the principles of the Helsinki Declaration. Permission to conduct studies with buccal epithelium sampling was obtained by the Ethics Committee of Sevastopol State University (Study No. 3, July 15, 2021).

Buccal epithelium was collected in accordance with the rules for conducting research on human material in the Russian Federation. All subjects have given written informed consent.

Thus, the method of AFM spreading current revealed unilateral (diode) local electrical conductivity of the membrane of human buccal epithelium cells at the nanoscale and its correlation with the topology of micromechanical properties.

Acknowledgement

The work was partially carried out at the expense of the state task “Photobiophysical monitoring of the environment based on the spectral-fluorescent properties of structurally organized molecular (including nanoparticles) and supramolecular biologically important systems (FEFM-2023-0005)”.

References

- [1] A. A. Rumyantseva, A. E. Kosorukov, G. Kolokolnikov, N. E. Norkin, and A. K. Volkov, “The study of electrokinetic properties of buccal epithelium,” *AIP Conference Proceedings*, 2140, 020059, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5121984>.
- [2] E. N. Aybeke et al., “Nanoscale Mapping of the Physical Surface Properties of Human Buccal Cells and Changes Induced by Saliva,” *Langmuir*, vol. 35, no. 39, pp. 12647–12655, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01979>.
- [3] V. A. Bunin, E. A. Karpasova, E. O. Kozhevnikova, N. Linkova, K. L. Kozlov, and E. M. Paltseva, “Prospects of the Application of Buccal Epithelium for Noninvasive Diagnosis of Coronary Heart Disease in People of Different Ages,” *Advances in Gerontology*, vol. 9, no. 2, pp. 261–265, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1134/s2079057019020061>.
- [4] M. A. Paltsev, I. M. Kvetnoy, V. O. Polyakova, K. A. Kozlov, and I. B. Oleksyuk, “The expression of signal molecules in buccal epithelium: new abilities of molecular personalized diagnosis of human diseases,” *EPMA Journal*, vol. 5, no. S1, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1186/1878-5085-5-s1-a55>.
- [5] E. Neher and B. Sakmann, “Single-channel currents recorded from membrane of denervated frog muscle fibres,” *Nature*, vol. 260, no. 5554, pp. 799–802, Apr. 1976, doi: <https://doi.org/10.1038/260799a0>.
- [6] E. Lesniewska, E. Bourillot, D. Carriou, J. Gushina, E. Pudovkina and S. N. Pleskova, “The study of living and fixing buccal epitheliocytes morphology by atomic force microscopy,” in *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, pp. 561–568, 2012. <https://www.researchgate.net/publication/277668472>.
- [7] N. A. Torhov, A. A. Mosunov, V. Novikov, and I. V. Ivonin, “Study of tribological properties of human buccal epithelium cell membranes using probe microscopy,” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14807-5>.

Information about the authors

Nikolay A. Torkhov, Leading Researcher at the Research Laboratory “Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Systems” of the Institute of the National Technology Initiative, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8902-6319.

Andrey A. Mosunov, Researcher at the research laboratory “Molecular and Cellular Biophysics”, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1390-5832.

Optimization of the Planar Schottky Diode Structure in THz Range

N. A. Torkhov^{1,2}, V. V. Vertegel¹, M. O. Tkachenko¹, and A. S. Manko¹

¹ *Sevastopol State University*

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 99053, Russian Federation

trkf@mail.ru

² *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

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

Received: May 19, 2023

Peer-reviewed: May 25, 2023

Accepted: May 25, 2023

Abstract: Optimization of the structure of a planar Schottky diode with a whisker and an air anode lead allowed to obtain 198 GHz bandwidth (fractional bandwidth of 16.5 %) at a central frequency of ~1200 GHz and reduce insertion losses of ≤ 3.4 dB at a noise temperature of ~3300 K.

Keywords: planar Schottky diode, compact model, THz-range, small-signal S-parameters.

For citation (IEEE): N. A. Torkhov, V. V. Vertegel, M. O. Tkachenko, and A. S. Manko, “Optimization of the Planar Schottky Diode Structure in THz Range,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 194–200, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.16.

1. Introduction

The terahertz frequency range is one of the broadband frequency ranges currently includes electromagnetic oscillations from hundreds of gigahertz (GHz) to hundreds of terahertz (THz) [1]. According to general electrophysical concepts and current position, there are no trivial structural and technological solutions for diode chips on the ECB market allow to overlap such chips performance in the entire terahertz frequency range.

Since that, one possibility to solve this problem is a set of design solutions of diode chips optimized for operating in narrower (e. g. 1103–1301 GHz) overlapping frequency ranges [2].

Despite the relatively large amount of literature data in public sources on terahertz frequency converters, information on transfer characteristics of te-

rahertz range diode chips is extremely limited. In this regard, the aim of work is optimization of structural and technological solutions for planar Me/n- n^+ -GaAs packageless Schottky diode with a whisker and an air anode lead performed by “Mesa-Mesa” method (hereinafter referred to as planar diodes) for operating in the frequency range $f_T=1103\text{--}1301$ GHz [3].

2. Design methodology

The small-signal characteristics of a planar Schottky diode in the THz range were obtained using previous designed and improved small-signal (linear) compact model (LCM) (Fig. 1) [1]. The designed LCM verification in the range 0.1–50 GHz showed a good agreement with experimentally obtained frequency dependences of small-signal scattering parameters (S-parameters) of a planar Schottky diode. The optimization procedure ensured the accuracy of restoring the values of parameters (nominal values) of improved LCM equivalent elements (hereinafter referred to as elements) by more than 95 %. The feature of this LCM is a larger number of elements (22 equivalent elements), which is sufficient for more accurate consideration of device constraints on the limit (physically possible f_L (L – limit)) operating frequencies of such diodes in the THz frequency range [1].

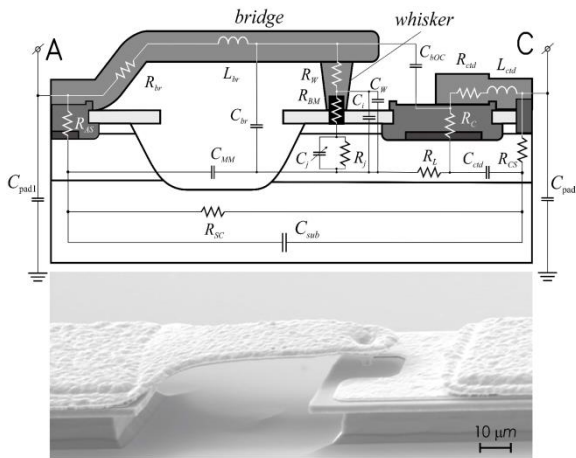


Fig. 1. The used LCM of a planar Schottky diode made using the “Mesa-Mesa” technology and its electron microscopic image [1]

The limit frequency estimation of the Schottky contact operation $f_L=1/\tau$, where $\tau=\tau(E)$ – time of ballistic transport of electron with energy E through the thin diode base, was carried out using the theory of ballistic transport of the charge carriers, which allows to take into account not only the amplitude characteristics of the electron scattering parameters at the potential Schottky barrier, but

also the phase ones, unlike diffusion and thermionic theories [1]. Doing so, not only the entire form of potential barrier, but also the scattering during the above-barrier transport was taken into consideration. The evaluation showed, that for base length $x_b \leq 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ $N_d^+ = 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ the average value $\tau \approx 2 \times 10^{-15} \text{ s}$, which corresponds to the frequencies $f_L \approx 5 \times 10^{14} \text{ Hz} = 500 \text{ THz}$.

The design and research of structural and technological solutions using the “Mesa-Mesa” technology in a three-dimensional (3D) projection was carried out using the computer-aided design (CAD) for devices technological design “TCAD SYNOPSIS”, which allows to obtain static and high-frequency characteristics of individual structural elements of a diode chip and compare them with the LCM model values.

The modeling and optimization of small-signal S-parameters frequency dependencies of an optimized equivalent circuit (EC) in the THz range with zero biased anode was carried out using CAD AWR Microwave Office. Input and output matching was implemented by adjusting the matching capacities C_{pad1} и C_{pad2} . When choosing the values of the parameters of equivalent LCM elements (hereinafter referred to as LCM parameters), the electromagnetic interaction influence on the inductance value L_{br} of air bridge and substrate bottom metallization system inductance was taken into consideration. The input reflection coefficient $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ ($\text{VSWR} \leq 1.95$) was taken as the criterion of bandwidth estimating.

After that, the diode chip structural elements were corrected in the CAD “TCAD SYNOPSIS”, the static and high-frequency characteristics of individual structural elements were obtained and verified with model values.

3. Results

The static current-voltage (IV) and capacity-voltage (CV) characteristics of the anode non-ohmic metal-semiconductor (M-S) contact with the Schottky barrier were calculated using the theory of ballistic transport with the influence of series resistance R_s consideration (Fig. 2). Despite that the calculation were performed using quantum-mechanical concepts of electrons transfer, the $C=C(V)$ and $I=I(V)$ curves have a typical form for Schottky diodes, which shows consistency of the ballistic theory.

Regardless of the fact than the skin depth at such frequencies is about $\sim 0.01 \text{ } \mu\text{m}$, the n+-GaAs contact layer thickness was set to be $7 \text{ } \mu\text{m}$ to ensure the necessary values of series resistances R_s . The fact is that the localization of alternating current in the skin layer is caused by superposition of the main current J and Foucault currents J_F throughout the semiconductor. Although the resulting alternating current in the internal volume of conductive material is zero, its equal in magnitude and opposite in direction components J and J_F are far from

zero values in the conductor. Therefore, even if the skin layer provides the main flow of resulting alternating current, the internal volume of semiconductor also takes a direct part in the series resistance R_s formation.

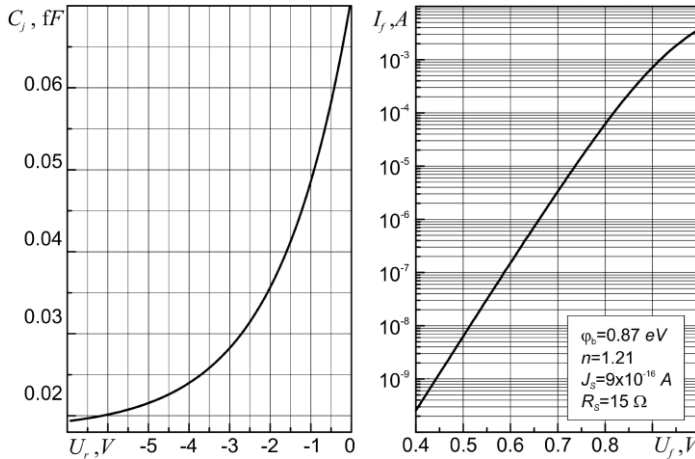


Fig. 2. Static CV and IV characteristics of the M-S anode contact with the Schottky barrier

According to analysis results, all elements of the LCM may be classified under two groups: 1 – elements which impact is significant on the device limitations of the operating frequency range, 2 – elements with insignificant impact. The S-parameters absolute values (magnitude) relative change was taken as the impact indicator when the LCM elements nominal values were changed by $\pm 10\%$ and $\pm 50\%$.

In either case (for $\pm 10\%$ and $\pm 50\%$), a decrement of majority of the 2nd group element values leads to a change in the S-parameters magnitude, f_T and the bandwidth Δf_T does not exceed 2–3%. The impact of half of the 2nd group elements is not greater than 1%.

The 1st group elements, whose impact exceeds tens of percent, merit special mention. Among these are an air bridge inductance L_{br} and whisker capacity C_w , which influence on f_T and Δf_T is obvious. The “Mesa-Mesa” technology make possible to change over a wide range an air bridge length, width, thickness and height in relation to chip bottom metallization. Taking into consideration the influence of the structural element’s electromagnetic interaction, one can vary the bridge inductance L_{br} in a fairly wide range from hundreds (e. g., 200 pH) to fractions (e.g., 0.02 pH) of picohenry. The whisker capacity C_w has the lowest possible values, since its cross section is almost equal to Schottky contact size, so the enlarged contact capacity impact, which is represented in many analogs [4], is completely eliminated.

The high impact of the anode pad resistance RAS on the frequency characteristics, which might be greater than 20% for this structure, is appeared to be nontrivial. Its exclusion from the structure leads to a significant transfer characteristics degradation.

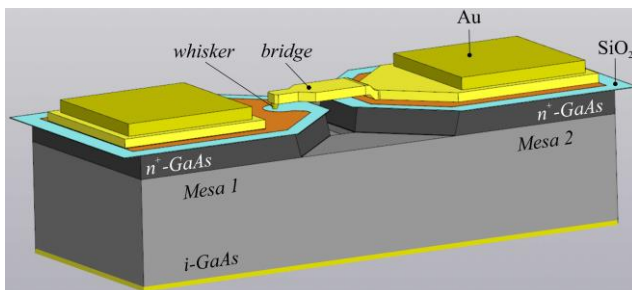


Fig. 3. The “Mesa-Mesa” structural solution of the planar Me/n- n^+ -GaAs Schottky diode with a whisker and an air lead (bridge) optimized for operation in the frequency range $f_T=1103\text{--}1301$ THz

Thus, the planar diode structure optimized in the frequency range 1103–1301 GHz has an anode terminal in the form of a shorter and wider air bridge, a higher whisker and a deeper mesa (Fig. 3). For the formation of mesa a special etcher was designed. This structural and technological solution provides for the possibility of forming a grounding metallized via to the anode pad.

According to the modeling results, the proposed planar diode structure has the bandwidth of 198 GHz at a central frequency of ~ 1200 GHz (fractional bandwidth of a 16.5%), insertion losses of ≤ 3.4 dB and noise temperature ~ 3300 K (Fig. 4).

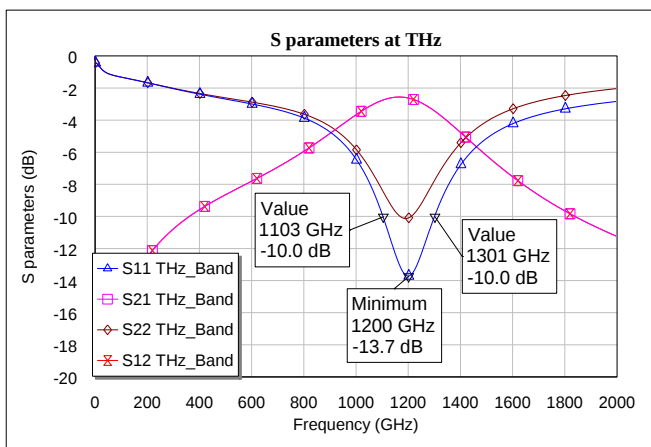


Fig. 4. Small-signal S-parameters of a planar diode (calculation)

A comparative analysis with existing technological and schematics solutions (e. g., [5]) suggests the feasibility of the structural and technological solutions of the wideband (up to 200 GHz) mixer at a frequency of ~ 1200 GHz with conversion losses (CL) of 9.5–10.0 dB and characteristics that meet global standards based on obtained design solutions.

Acknowledgement

The optimization of a planar Schottky diode structure with a whisker and an air anode lead allowed to expand the bandwidth to 198 GHz (16.5% fractional bandwidth) at a central frequency ~ 1200 GHz and reduce insertion losses of ≤ 3.4 dB at a noise temperature of ~ 3300 K.

The obtained structural solutions make it possible to significantly improve the planar diodes reliability by increasing its mechanical strength, power dissipation and electrostatic discharge tolerance, provide significantly expand applicability of these diodes in generating, converting and detecting of electromagnetic signals devices in different physical, chemical, biological sciences and technologies: genetic and molecular level interaction with living and nonliving objects of a nature, spectral analysis, monitoring and control of transition processes, detection of radiation quanta and elementary particles, ultrafast data transformation and transferring in high-frequency fiber- and quantum-communication lines, short-range and space location, radio imaging, energy-efficient devices for converting and transferring radiant energy, and also make a notable contribution to overcoming the significant lag of electronic component base behind optoelectronics in terahertz frequency range.

References

- [1] N. A. Torkhov, L. I. Babak, A. A. Kokolov, "On the Application of Schottky Contacts in the Microwave, Extremely High Frequency, and THz Ranges," *Semiconductors*, vol. 53, no. 12, pp. 1688–1698, 2019, doi: 10.1134/S1063782619160280.
- [2] N. A. Torkhov, "Method of manufacturing diode with terahertz range whisker," RF patent no. 2635853, Nov. 16, 2017.
- [3] N. A. Torkhov, "Compact terahertz whisker diode," RF patent no. 176768, Jan. 19, 2018.
- [4] I. Mehdi, J. V. Siles, C. Lee, and E. Schlecht, "THz Diode Technology: Status, Prospects, and Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 6, pp. 990–1007, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2017.2650235>.
- [5] P. R. Wilkinson, "Development of 664 GHz Sub-harmonic Mixers," Ph.D. dissertation, Institute of Microwaves and Photonics, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, 2014.

Information about the authors

Nikolay A. Torkhov, Leading Researcher at the Research Laboratory “Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Systems” of the Institute of the National Technology Initiative, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8902-6319.

Valeriy V. Vertegel, director of SevSU Engineering Center, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Aleksandr S. Manko, 1st year master degree student of Radio-Electronic Systems and Technologies Department, engineer of SevSU Engineering Center, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, ORCID 0009-0001-5972-0294.

Mikhail O. Tkachenko, 1st year postgraduate student of Radio-Electronic Systems and Technologies Department, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, ORCID 0009-0003-5799-9433.

Autonomous Broadband Current Meter on a High-Voltage Electrode

N. A. Bogatov

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
46, Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation
bogatov@appl.sci-nnov.ru

Received: May 16, 2023

Peer-reviewed: May 25, 2023

Accepted: May 25, 2023

Abstract: The design of an autonomous noise-proof current meter on a high-voltage electrode is proposed, based on the use of an annular non-inductive shunt with its axially symmetrical connection to the input of the data acquisition module. The parameters of two design options are calculated: high-frequency, with a frequency band of 0–10 GHz, but with a lower limit of the measured current, and relatively low-frequency, with a band of 0–100 MHz, and a high limit of the measured current.

Keywords: current meter, tubular shunt, cutoff frequency.

For citation (IEEE): N. A. Bogatov, “Autonomous Broadband Current Meter on a High-Voltage Electrode,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 201–210, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.17.

1. Introduction

In studies of long sparks, as a rule, there is a need to measure the current at a high-voltage electrode. For this purpose, autonomous current meters are used, which are installed on a high-voltage electrode, and the meter is connected to a computer via a fiber optic line [1–4] or via a Wi-Fi link [5–7]. A long spark discharge consists of a set of processes with very different characteristic times. The characteristic time of branching and interaction of streamers resides in the sub-nanosecond range, and the total time of the discharge process can reach tens of milliseconds. Therefore, shunts are used as a sensitive element in the spark discharge current meters which have 0 Hz as a lower limit of the frequency range. To measure currents up to 100 A, when the shunt resistance can be of the order of 1 Ω or more, low-inductance resistances [1–4] or a set of such resistances

connected in parallel in an axially symmetrical design [4] are used. The upper limit of the frequency range of the current meters in [1–4] was 20–70 MHz.

When measuring currents in the kiloampere range, non-inductive tubular shunts with a resistance of the order of units of $\text{m}\Omega$ are used [5–7]. The upper limit of the tubular shunt frequency range is limited by three factors: skin-effect in the shunt, shunt size, and the inductance of the wires connecting the shunt to the coax connected to input of the data acquisition module. In addition, with a low resistance of the shunt, the quality factor of the oscillatory circuit formed by the inductance of the shunt in the discharge current circuit (the shunt is non-inductive only for the measuring circuit) and the capacitance between the meter body and the electrode, which is parallel to the shunt, substantially increases which leads to parasitic current fluctuations in the shunt and distortion measurements. The upper frequency of the current meter in [5–7], limited by skin-effect, is 27 MHz.

In this paper, we propose a shunt design for a current meter on a high-voltage electrode, which makes it possible to largely overcome the above disadvantages of the shunt used in [5–7] and raise the upper limit of the shunt frequency range to 10 GHz.

2. Shunt design

The main idea of the proposed shunt design is to ensure complete axial symmetry of both the shunt itself and its connection to the input of data acquisition module. The ideal implementation of this idea is the construction shown schematically in Fig. 1a (hereinafter, we will call it ‘design **a**’). The shunt has the shape of a ring, the inner and outer diameters of which coincide with the diameters of the inner and outer conductors, respectively, of a coaxial 50-ohm line connecting the shunt to the 50-ohm input of the data acquisition module. The upper frequency band limit of the current meter of such a design can be made equal to the cutoff frequency of the coax (with the appropriate bandwidth of the data acquisition module). However, the small size of the shunt in the absence of a heat sink can severely limit the amplitude and duration of the measured current due to heating of the shunt and changes in its resistance. The greatest heating of the annular shunt occurs at its inner radius. In order to be able to use shunts with a large inner radius, the design shown in Fig. 1b (‘design **b**’) is proposed. An increase in the size of the shunt inevitably leads to a decrease in the upper frequency.

The following are estimates of the achievable current meter parameters for both of the above shunt designs.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{j^2}{\sigma C} \quad (5)$$

where C is the heat capacity per unit volume of shunt material. The local heating of the shunt in the absence of heat conduction is equal to:

$$T(r) = T_0 + \frac{1}{\sigma C} \int j(r)^2 dt \quad (6)$$

where T_0 is the shunt start temperature. Integration in (6) is carried out over the entire pulse duration of the measured current. The resistance of the ring dr after the heating is:

$$dR' = \left[1 + \frac{\alpha}{\sigma C (2\pi r h)^2} \int I^2 dt \right] \frac{dr}{2\pi r h \sigma} \quad (7)$$

where α is the temperature coefficient of resistance for the shunt material. The shunt resistance after the heating is:

$$R' = \frac{1}{2\pi h \sigma} \ln \frac{D}{d} + \frac{\alpha}{16\sigma^2 C (\pi h)^3} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) \quad (8)$$

The relative change in the shunt resistance due to heating is:

$$\frac{R' - R}{R} = \frac{\alpha}{8\pi^2 \sigma C h^2 \ln \frac{D}{d}} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) \int I^2 dt \quad (9)$$

In the presence of a heat sink in the form of a thick dielectric plate, to which an annular shunt is pressed, the temperature of the shunt will be determined by the balance between heat generation in the shunt and heat flow from the shunt. The characteristic time of temperature equalization in the shunt is $\tau_T = \frac{\Lambda^2}{\kappa_s}$, where κ_s is the thermal diffusivity of the shunt material, Λ is the characteristic size of the shunt which is $\Lambda = \frac{h}{\pi}$ for a flat layer of thickness h :

$$\tau_T = \frac{h^2}{\pi^2 \kappa_s} \quad (10)$$

If the characteristic time of the current impulse I is much greater than τ_T , then the temperature of the shunt will differ little from the temperature of the surface of the dielectric plate to which the shunt is pressed, and the heating of the shunt will occur together with the heating of the dielectric plate. In this case, the shunt temperature will be approximately equal to the temperature of the substrate surface, which can be found from the solution of the heat conduction equation [9]:

$$T_s(r, t) - T_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi \kappa_p}} \int_0^t \frac{w(r, \tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \quad (11)$$

where κ_p is the thermal diffusivity of the substrate material, $w(r, t) = \frac{j(r, t)^2 h}{\sigma C}$ is the heat flux to the substrate surface. Substituting the current density (3) into (11), one obtain:

$$T_s(r, t) - T_0 = \frac{1}{8\pi^2 \sqrt{\pi \kappa_p} \sigma C h r^2} \int_0^t \frac{I(\tau)^2}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (12)$$

Then the relative change in the resistance of the shunt will be equal to:

$$\frac{R' - R}{R} = \frac{\alpha}{16\pi^2 \sigma C h \ln\left(\frac{D}{d}\right) \sqrt{\pi \kappa_p}} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) \int_0^t \frac{I(\tau)^2}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (13)$$

The integral in (13) increases during the current flow and decreases after it ends. If the current pulse is rectangular with amplitude I_0 and duration τ_I , then formulas (9) and (13) take the form:

$$\frac{R' - R}{R} = \frac{\alpha}{8\pi^2 \sigma C h^2 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) I_0^2 \tau_I \quad (14)$$

$$\frac{R' - R}{R} = \frac{\alpha}{8\pi^2 \sigma C h^2 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) I_0^2 \tau_I \sqrt{\frac{h^2}{\pi \kappa_p \tau_I}} \quad (15)$$

As can be seen from formulas (14) and (15), the relative change in the resistance of a shunt with a heat sink will be less than without a heat sink if the current pulse duration τ_I is longer than the characteristic time $\frac{h^2}{\pi \kappa_p}$ of heating the substrate to a depth equal to the shunt thickness h .

The rise time τ_s and the bandwidth f_s , due to the skin effect in the shunt, are [8]:

$$\tau_s = 0.237 \mu \sigma h^2 \quad f_s = \frac{1.46}{\mu \sigma h^2} \quad (16)$$

where μ is the permeability of the shunt material. To increase the frequency f_s the permeability of the shunt material must be chosen to be minimal, namely equal to the vacuum permeability μ_0 , then:

$$f_s = \frac{1.46}{\mu_0 \sigma h^2} \quad (17)$$

The cutoff frequency f_c of a coaxial line with the diameters of the outer and inner conductors D and d , respectively, is equal to

$$f_c = \frac{2c}{\pi(D+d)\sqrt{\varepsilon}} \quad (18)$$

where c is the speed of light, ε is the relative permittivity of coax insulator. Formula (18) is directly applicable to the design **a** (Fig.1a), in which the dimensions

of the shunt are equal to the dimensions of the coax. In the design **b** (Fig. 1b), the coax is smaller than the shunt, so the cutoff frequency of the coaxial connection of the transmission line to the shunt will again be expressed by formula (18), in which D and d are the outer and inner diameters of the annular shunt. In the latter case, $\varepsilon = 1$. Let us further estimate the parameters of the shunts of both designs shown in Fig. 1.

3.1. Design a

Set the upper bound of the shunt frequency band $f_b = 10$ GHz. The frequencies f_c and f_s must be no less than f_b , let's make them equal to f_b :

$$\frac{2c}{\pi(D+d)\sqrt{\varepsilon}} = f_b \quad (19)$$

$$\frac{1.46}{\mu_0 \sigma h^2} = f_b \quad (20)$$

For a 50 Ω coax, the D/d ratio is given by:

$$\ln \frac{D}{d} = \frac{5}{6\sqrt{\varepsilon}} \quad (21)$$

With a typical value of $\varepsilon \approx 2.3$ for coaxial cables, the maximum shunt dimensions determined by equations (19) and (21) are $D = 8$ mm, $d = 4.6$ mm. We choose copper as the shunt material ($\sigma = 6 \cdot 10^7$ Ohm $^{-1}$ m $^{-1}$). The shunt thickness we find from equation (20): $h = 1.4$ μ m. The shunt resistance at this thickness will be equal to $R \approx 1$ m Ω (formula (2)). The temperature coefficient of resistance for copper is $\alpha \approx 4.3 \cdot 10^{-3}$, and the volumetric heat capacity is $C = 3.5 \cdot 10^6$ J/m 3 ·K, so formula (9) for the relative change in resistance due to heating of the shunt without a heat sink takes the form:

$$\frac{R'-R}{R} = 7.6 \cdot 10^{-3} \int I^2 dt \quad (22)$$

If we limit the permissible relative change in the resistance of the shunt by δ , then we obtain the following restriction on the integral of the square of the measured current:

$$\int I^2 dt \leq 130\delta \text{ A}^2 \cdot \text{s} \quad (23)$$

In order to ensure heat removal from the shunt, it must be placed on a dielectric plate with high thermal conductivity. An ideal material for this purpose is diamond with its record high thermal conductivity of 2300 W/m·K. Beryllium oxide ceramics has the highest thermal conductivity among industrially produced ceramics, its thermal conductivity is about 200 W/m·K (thermal diffusivity $\kappa_s \approx$

$5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). The thermal diffusivity of copper is $\kappa_s \approx 1.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Therefore, we use a plate made of this ceramic as a heat sink for our shunt. The characteristic time of a copper layer $1.4 \text{ } \mu\text{m}$ thick cooling to the substrate temperature is $\tau_T \approx 2 \text{ ns}$ (formula (10)). The duration of a current close to its maximum value must be much longer than τ_T in order for the heat released in the shunt to be transferred to the substrate. This condition is satisfied with a margin in laboratory long sparks, where the characteristic time of the main current pulse during the return-stroke phase is about $1 \text{ } \mu\text{s}$. In this case, the shunt temperature will be approximately equal to the temperature of the substrate surface, given by formula (12), and the relative increase in shunt resistance will be expressed by formula (13):

$$\frac{R' - R}{R} = 4.3 \cdot 10^{-7} \int_0^t \frac{I(\tau)^2}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \quad (24)$$

The condition $\frac{R' - R}{R} \leq \delta$ imposes a limitation on the amplitude and duration of the current:

$$\int_0^t \frac{I(\tau)^2}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \leq 2.3 \cdot 10^6 \delta \text{ A}^2 \text{ s}^{1/2} \quad (25)$$

For a rectangular current pulse with the amplitude I_0 and duration τ_I , condition (25) takes the form:

$$I_0^2 \sqrt{\tau_I} \leq 1.2 \cdot 10^6 \delta \text{ A}^2 \text{ s}^{1/2} \quad (26)$$

For example, with a current pulse duration of $1 \text{ } \mu\text{s}$ and measurement error $\delta \leq 0.1$, condition (26) implies a limitation on the measured current $I \leq 11 \text{ kA}$. The current of laboratory long sparks rarely exceeds this value. The high frequency components of the current have a much smaller amplitude than the main current pulse and do not make a significant contribution to the heating of the shunt.

3.2. Design b

The implementation of design **a** may be impossible due to the lack of a data acquisition module with a bandwidth of up to 10 GHz or the complexity of manufacturing a shunt on a plate of beryllium oxide ceramics. In this case, you can turn to design **b**, which is less high-frequency, but does not require a heat sink for the shunt and makes it possible to measure higher currents.

Let's calculate the parameters of the shunt in design **b**, setting the upper limiting frequency $f_b = 100 \text{ MHz}$. It is advisable to choose the shunt material from alloys with high resistivity and low temperature coefficient of resistance.

Constantan has the lowest temperature coefficient among them ($\sigma \approx 2 \cdot 10^6 \text{ Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$, $\alpha \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $C \approx 3.64 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), so we will choose it for the manufacture of an annular shunt. The maximum shunt thickness that satisfies condition (17) is equal to $h_{\max} = \sqrt{\frac{1.46}{\mu_0 \sigma f_b}} = 76 \text{ }\mu\text{m}$. We choose the thickness $h = 50 \text{ }\mu\text{m}$, for which $f_s = \frac{1.46}{\mu_0 \sigma h^2} \approx 230 \text{ MHz}$. Let's take the following dimensions of the shunt $D = 100 \text{ mm}$, $d = 50 \text{ mm}$. These dimensions satisfy with a margin the condition (18) $\frac{2c}{\pi(D+d)} > f_b$. The resistance of such a shunt will be equal to $R = 1.1 \text{ m}\Omega$ (formula (2)). If it is required that the relative increase in the resistance of the shunt due to heating does not exceed δ , then from formula (9) the following restriction on the integral of the square of the measured current follows:

$$\int I^2 dt \leq 5 \cdot 10^7 \delta \text{ A}^2 \cdot \text{s} \quad (27)$$

More stringent than (27) is the restriction on the maximum temperature of the shunt $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ near its inner diameter, where the current density is maximum:

$$T\left(\frac{d}{2}\right) - T_0 = \frac{1}{\sigma C (\pi d h)^2} \int I^2 dt \leq 800 \text{ K} \quad \int I^2 dt \leq 3.5 \cdot 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s} \quad (28)$$

With a current duration of $1 \text{ }\mu\text{s}$, the current amplitude measured by such a shunt with an error of less than 1% can reach 600 kA. The shunt voltage at this current will be about 700 V, so it must be fed to the data acquisition module input through a voltage divider. To expand the dynamic range of the meter, it is advisable to use two or more registration channels with different sensitivities connected in parallel to the shunt. Thus, it is possible to realize the range of measured currents of the meter from 1 A to 600 kA.

4. Discussion

Specific shunt designs, for which the calculation of parameters was performed in this article, are designed to measure current in laboratory long sparks, in which currents can reach tens of kiloamperes. However, the shunt of the design **a** can also be successfully used to study low-current discharges, if it is necessary to measure the current in a wide frequency range. To measure weak currents, the shunt resistance must be increased by reducing the thickness of the shunt h . The substrate of such a thin ring shunt in this case can be made of any high-frequency dielectric, not necessarily high thermal conductivity, since there is no need for a heat sink for the shunt.

The upper frequency of 10 GHz, which we chose to calculate the parameters of the design **a**, for a ring shunt is not the maximum possible. By reducing the size of the coaxial line and the corresponding ring shunt, it is possible to increase the cutoff frequency even further. In this case, the limitation on the amplitude and duration of the measured current (conditions (23) and (25)) will be tightened.

5. Conclusion

The proposed design **a** of a pulsed current meter based on a ring shunt on a high-voltage electrode makes it possible to measure the current in a very wide frequency range (0–10 GHz). The amplitude and duration of the measured current is limited by condition (25). For example, with a current pulse duration of 1 μ s, the current amplitude should not exceed 11 kA so that the measurement error does not exceed 10%.

The current meter of design **b** allows you to measure the pulsed current with the maximum value of the integral of the squared current over time $3.5 \cdot 10^5 \delta \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ in the frequency range (0–200 MHz). With an acceptable measurement error of 1% ($\delta \leq 0.01$) and a current pulse duration of 1 μ s, the amplitude of the measured current can reach 600 kA.

Acknowledgement

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-17-00264).

References

- [1] P. Wang and G. Zhang, "The Measurement Method for Corona Discharge Current Under High-Voltage Environment," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 8, pp. 1786–1790, Aug. 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2008.922069>.
- [2] X. Zhao et al., "On the Velocity-Current Relation of Positive Leader Discharges," *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 1, pp. 512–518, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1029/2018gl081022>.
- [3] X. Zhao, J. He, B. Luo, L. Jia, Y. Yang, and P. Xiao, "Relaxation process of the discharge channel near the anode in long air gaps under positive impulse voltages," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 50, no. 48, pp. 485206–485206, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa9266>.
- [4] Y. Yue and J. He, "Digital time-resolved optical measurement of discharge currents in long air gaps," *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 8, pp. 085107–085107, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4817208>.
- [5] Alexander Yu. Kostinskiy et al., "Abrupt Elongation (Stepping) of Negative and Positive Leaders Culminating in an Intense Corona Streamer Burst: Observations in Long Sparks and Implications for Lightning," *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 123, no. 10, pp. 5360–5375, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1029/2017jd027997>.

- [6] N. A. Bogatov et al., “Experimental Investigation of the Streamer Zone of Long-Spark Positive Leader Using High-Speed Photography and Microwave Probing,” *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 125, no. 11, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1029/2019jd031826>.
- [7] N. A. Bogatov, V. S. Syssoev, D. I. Sukharevsky, A. I. Orlov, V. A. Rakov, and E. A. Mareev, “An Experimental Study of the Breakthrough-Phase and Return-Stroke Processes in Long Sparks,” *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 127, no. 2, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1029/2021jd035870>.
- [8] A. J. Schwab, “Low-Resistance Shunts for Impulse Currents,” *IEEE Transactions*, vol. PAS-90, no. 5, pp. 2251–2257, Sep. 1971, doi: <https://doi.org/10.1109/tpas.1971.293072>.
- [9] V. I. Smirnov, *A course of higher mathematics*, vol. II, § 21, The equation of thermal conduction. Pergamon Press, 1964.

Information about the author

Nikolai A. Bogatov, scientific reseacher, A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation, ORCID 0000-0001-5034-888X.

УДК 621.37-621.39(091)

Продажа Ли де Форестом прав на аудион АТ&Т и ее значение для развития радиотехники

Пестриков В. М.

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

Получено: 11 марта 2023 г.

Отрецензировано: 30 марта 2023 г.

Принято к публикации: 20 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрена подготовка и проведение презентации аудиона Ли де Фореста, которая способствовала продаже его патентных прав компании АТ&Т. Отмечена роль в проведении презентации Дж. Карти и Джона С. Стоуна. Благодаря экспериментам с аудионом Гарольда Д. Арнольда и теории аудиона, разработанной Хендриком ван дер Бейлом, были созданы предпосылки к организации промышленного производства вакуумных триодов для телефонных ретрансляторов. Показано, что промышленное производство термоэмиссионной трехэлектродной вакуумной лампы позволило разработать инновационные коммерческие телефонные ретрансляторы и достигнуть прогресса в дальней телефонии.

Ключевые слова: Ли де Форест, трехэлектродный аудион, Дж. Карти, Джон С. Стоун, АТ&Т, ВЕС, Гарольд Д. Арнольд, Хендрик ван дер Бейл, теория аудиона.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Продажа Ли де Форестом прав на аудион АТ&Т и ее значение для развития радиотехники // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 211—249.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Продажа Ли де Форестом прав на аудион АТ&Т и ее значение для развития радиотехники / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 211—249.

1. Введение

В статье [1] описана организация в *Western Electric Company* исследовательской группы по разработке устройства телефонной трансляции на новых физических принципах. Прделанные исследования руководителем

этой группы Г. Арнольд, показали, что разработанные для этих целей ртутные газоразрядные лампы вызывают затруднения в работе и являются неперспективными. Компанию WEC в данной ситуации выручил Ли де Форест, искавший возможность продать авторские права на усилитель, собранный на усовершенствованных аудионах. В данной статье пойдет речь о продвижении де Форестом своего аудионного усилителя в условиях конкуренции на коммерческом рынке проводной телефонии.

В 1911 году на Ли де Фореста обрушились новые удары судьбы. Обстоятельства заставили де Фореста покинуть Нью-Йорк и поехать за тысячами километров на восток в Калифорнию. Ему предстояло прийти в себя и оценить свою жизнь после двух неудачных браков и банкротства собственной компании. Он с нетерпением ожидал еще одного шанса от жизни, а еще больше денег, которых у него не было. А еще больше, ему нужны были жизненные силы, чтобы не сломаться не только на виражах судьбы, но и в патентной борьбе. И, такой источник вскоре нашелся, который дал ему эти силы. В середине 1911 года Ли де Форест познакомился с оперной певицей Мэри Мэйо (*Miss Mary Mayo*, 14.08.1893—30.12.1957) и стал за ней ухаживать.

В третьем браке де Форест сделал значительно больше изобретений и открытий в области радиотехники, чем в двух предыдущих. Самым важным результатом его деятельности стал успех демонстрации аудиона перед сотрудниками *AT&T* и *Western Electric Company*, который позволил де Форесту выгодно продать патентные права на это изобретение. Благодаря этому *AT&T* усовершенствовала аудион и наладила промышленное производство вакуумных триодов.

Полученный *AT&T* результат связан в первую очередь с помощью, которую оказал Роберт Миллиken в привлечении в исследовательскую лабораторию компании талантливых и хорошо образованных молодых ученых, среди которых наиболее заметный след в разработках инновационных радиоламповых технологий оставили Гарольд Д. Арнольд и Хендрик ван дер Бейл.

2. Джон Стоун протезирует Ли де Фореста

В конце лета 1912 года Ли де Форест улучшил характеристики схем усилителей звуковой частоты на аудионах [2, 3]. Конструкции оказались надежными, что позволило провести некоторые исследования и снять их характеристики. Желание заинтересовать телефонные компании усилительными устройствами подтолкнуло Ван Эттена 2 августа 1912 года написать письмо Дж. Карти, главному инженеру *AT&T*, в котором он рас-

сказал о возможностях аудиона как телефонного ретранслятора и его способности усиливать звук тикающих часов в пять раз. Письмо¹ не было отправлено, так как де Форест избрал другой путь, более тонкий — выход на руководство AT&T.

Де Форест написал письмо своему хорошему другу в Нью-Йорке Джону С. Стоуну (рис. 1), в котором привел длинное подробное описание экспериментов с аудионом в качестве телефонного усилителя. Дело в том, что Стоун имел контакты с AT&T в том или ином качестве в течение многих лет, пользовался большим уважением и был вхож в верхние эшелоны руководства компании, в то время как де Форест не имел таких возможностей [4, р. 149—153]. Ко всему прочему *Radio Telephone Company* буквально недавно приобрела патенты Джона С. Стоуна по беспроводной телеграфии.

В ответном письме Стоун проявил большой интерес к информации, которую предоставил де Форест. Последовала дальнейшая переписка. Друзья обсудили, как лучше всего обратиться в AT&T. Стоун взял на себя ответственность за организацию контактов с компанией AT&T и пообещал связаться со своими знакомыми в ее руководстве, а также выразил свою готовность изложить вопрос об этом телефонном репитере или усилителе своему другу Дж. Карти.

Вскоре Стоун сообщил де Форесту, что он организовал для него демонстрацию усилителя *Audion* перед инженерами компании *Western Electric* в телефонной лаборатории *Bell* в Нью-Йорке.

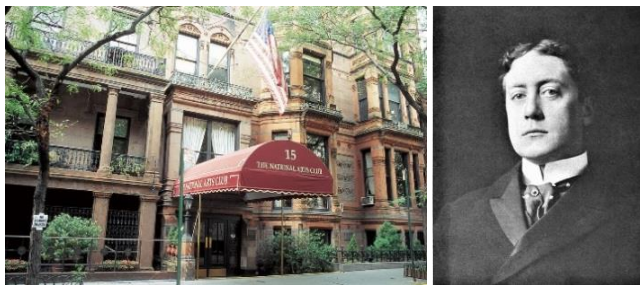


Рис. 1. Национальный художественный клуб (*National Arts Club*) на 15 Gramercy Park South (2021 г.). Джон С. Стоун (*John Stone*), 1912 г.

Fig. 1. National Arts Club at 15 Gramercy Park South (2021). John S. Stone (1912)

Во второй половине сентября 1912 года президент Федеральной телеграфной компании (*Federal Telegraph Company*) Бич Томпсон (*Beach Thompson*) решил предпринять деловую поездку в Нью-Йорк и очень любезно предложил де Форесту составить ему компанию, поскольку тот

¹ Espenschied Papers, Box LE-7, folder 1, H. van Etten to Espenschied, 7 August 1956.

откровенно объяснил ему всю ситуацию с договоренностью Джона С. Стоуна и AT&T о проведении демонстрации аудионных усилителей в Нью-Йорке [5, р. 295—296]. Форест показал Томпсону свои ранние патенты, выданные *Radio Telephone Company*, включающие аудион с сеткой и усилитель звуковых сигналов на аудионе. После этого де Форест сразу устроил свои дела в Федеральной телеграфной компании; с ее руководством было решено, что его зарплата должна находиться в разумных пределах, пока он будет проводить демонстрацию, и что он немедленно отправится в Нью-Йорк для представления аудионных усилителей. В случае успеха Ли де Форест надеялся продать компании права на свои патенты с аудионом, а полученные деньги потратить на восстановление своей собственной компании.

Бич Томпсон ясно осознал, что Федеральная телеграфная компания не может претендовать на право собственности изобретений Фореста. Тем не менее, он с пониманием воспринял ситуацию и пообещал по возможности помочь с тем, чтобы заинтересовать AT&T устройством, которое также может быть интересным и полезным для Федеральной телеграфной компании для усиления сигналов.

Ли де Форест приехал в Нью-Йорк и сразу же направился в Национальный художественный клуб (*National Arts Club*²) на площади Грамерси (*Gramercy Park Square*), где проживал Джон Стоун. Он встретился с мистером Стоуном, и в одной из комнат клуба показал и подробно рассказал о разработанных звуковых аудионных усилителях, а также проведенных с ними экспериментах, во время которых была зафиксирована генерация звука (эффект обратной связи). Аудионный усилитель де Фореста произвел сильное впечатление на Джона Стоуна. Он увидел в устройстве большой потенциал для телефонной связи, и подтвердил проведение демонстрации усилителя для инженеров и менеджеров AT&T. После этого Форест пошел на чердак клуба, где в двух больших коробках хранились два комплекта однокаскадных усилителей, и начал подготовку к предстоящей демонстрации, рис. 2.

21 октября 1912 г., Стоун выступил с докладом³ в Институте Франклина, в котором упомянул новый телефонный ретранслятор на аудионе де Фореста. Доклад Стоуна был опубликован в виде статьи «Практические

² Национальный клуб искусств (*National Arts Club*) является частным клубом в парке Gramercy, Манхэттен, Нью-Йорк. Он был основан в 1898 году Чарльзом Декаем (*Charles Augustus DeKay*, 25.07.1848—23.05.1935), искусствоведом и литературным критиком *New York Times*, чтобы «стимулировать, воспитывать и поощрять общественный интерес к искусству и просвещение американского народа в изобразительном искусстве».

³ Espenschied Papers, Box LE-8, folder 1, copy of J. J. Carty to C. E. Scribner, 30 October 1912.

аспекты распространения высокочастотных электрических волн по проводам» (англ. *The Practical Aspects of the Propagation of High-Frequency Electric Waves along Wires*) в *Journal of the Franklin Institute* за октябрь 1912 г. [6]. В статье автор дважды упоминает звуковой усилитель на аудионе, и на странице 355 делает ссылку на патент US879532 Фореста на аудион с сеткой, а также на свой патент US884110 с Кэботом на схему аудиона с батареей смещения: «В новой телеграфии и телефонии телеграфные сигналы и голос передаются по линейному проводу с помощью определенных изменений амплитуды или силы однородного высокочастотного тока. Сигналы и голос принимаются в магнитном телефонном приемнике, подключенном к локальной сети, которая включает устройство, способное выпрямлять используемые высокочастотные токи. В качестве выпрямителя предпочтительно использовать Audion, электрод Волластона, а также возможно применение других радиотелеграфных детекторов, в частности, могут оказаться пригодными так называемые кристаллические выпрямители».

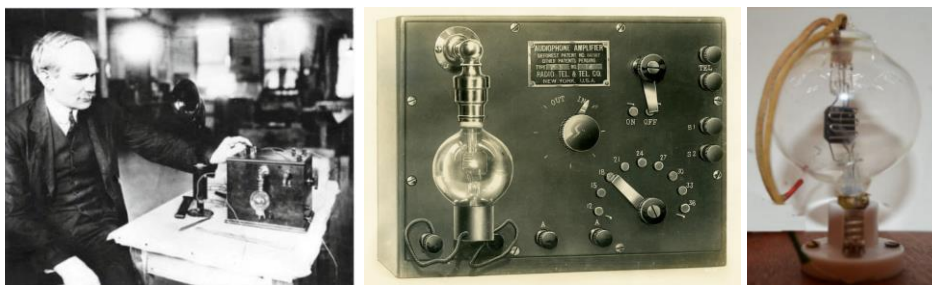


Рис. 2. Ли де Форест проверяет работу однокаскадного усилителя на аудионе (слева) в своей лаборатории перед демонстрацией его в *Western Electric Co.* 30 и 31 октября 1912 г. Общий вид однокаскадного усилителя на аудионе, который был представлен во время демонстрации.

Fig. 2. Lee de Forest testing a single-stage audion amplifier (left) in his lab before demonstrating it at *Western Electric Co.* October 30 and 31, 1912. General view of a single-stage audion amplifier, which was presented during the demonstration

В сноске на стр. 375 этой статьи Стоун отметил разработку де Фореста следующим образом [6, р. 375]: «Недавно был разработан новый телефонный релейный усилитель, который полностью электрический по своему действию и не имеет никаких движущихся частей. Он обеспечивает большое усиление и, по-видимому, делает это без заметного искажения телефонного тока».

Стоун послал копию своей статьи знакомому сотруднику *American Marconi Co.* Э. Фиске (*Fisk, Sir Ernest Thomas*, 1886—1965) в Бостон, а по-

сле этого связался со своими друзьями в руководстве AT&T и отослал еще одну копию⁴ Дж. Карти в Нью-Йорк. Эта статья была передана на отзыв молодому выпускнику Массачусетского технологического института, нанятому AT&T, Гарольду Осборну⁵. Отзыв Гарольда Осборна был безапелляционно отрицательным. Это было связано с тем, что инженеры компании не знали, как установить это высокочастотное устройство на телефонной линии с нагрузочными катушками. В компании был выбран тренд на использование нагрузочных катушек, и это продолжалось уже несколько лет. Индуктивная нагрузка была элементом дальней телефонной связи. Как сказал руководитель развития высокочастотной передачи *Bell Telephone Laboratories* Ллойд Эспеншид⁶: «Потребовалось несколько лет, чтобы выбросить это из головы».

Для Джона Карти мнение Стоуна было важнее, нежели отзыв Осборна, поэтому он немедленно отреагировал на статью Стоуна и назначил демонстрацию усилителя на аудионе на вторую половину октября. Джон Стоун оказался ключевым человеком в любой сделке⁷, которую де Форест мог заключить с AT&T.

3. Демонстрации аудионного усилителя

Дата демонстрации аудионного усилителя де Фореста постоянно откладывалась из-за того, что Дж. Карти был все время чем-то занят. Демонстрация состоялась только 30 октября 1912 года в инженерном отделе компании *Western Electric*, на 8 этаже в небольшой комнате Лабораторного корпуса компании на 463 West St. в Нью-Йорке перед представителями технического персонала AT&T и *Western Electric Company*. Среди пришедших на это мероприятие были директор исследовательской лаборатории доктор Колпиттс (*Edwin H. Colpitts*) и сотрудник этой лаборатории В. Ричардс (*Wilton L. Richards*). Колпиттс возглавлял лабораторию с 1911 года. Дж. Карти и Ф. Джеветт на презентации аудиона отсутствовали.

⁴ Oral-History : Lloyd Espenschied : An Interview Conducted by Julian Tebo and Frank Polkinghorn, IEEE History Center, June 2, 1973. URL: [https://ethw.org/Oral-History: Lloyd_Espenschied.\(01.01.2023\)](https://ethw.org/Oral-History: Lloyd_Espenschied.(01.01.2023)).

⁵ В тот период времени, в 1912 г., Гарольд Осборн (*Harold Smith Osborne*, 01.08.1887—29.12.1985) был помощником по передаче и инженером-проектировщиком в AT&T. В дальнейшем он оказал большое влияние на развитие новых форм телефонной связи. Вершиной его карьеры стала должность главного инженера AT&T в 1943 году. Был президентом *AIEE* 1942—1943 гг.

⁶ Ллойд Эспеншид (*Lloyd Espenschied*, 27.04.1889—21.06.1986) изобрел с Германом Эндрю Аффелем (*Herman Andrew Affel*, 04.08.1893—13.10.1972) в 1916 году современный коаксиальный кабель. Оба работали в *Bell Telephone Laboratories*.

⁷ Есть свидетельства того (письмо Дж.Карти), что Дж. Стоун, либо в это время, либо ранее, приобрел опцион на патент US841387 фундаментального усилителя де Фореста; некоторые указывают шестидесятидневный вариант опциона.

Впервые инженерной аудитории был представлен ламповый усилитель слабых электрических токов. Была продемонстрирована работа однокаскадного усилителя и показана возможность его использования в телефонных линиях. В этой демонстрации, а также 31 октября, Форест показал два типа усилителей. В одном был установлен аудион с одним анодом (рис. 3), в другом — аудион с сдвоенным анодом или (другое название) двойной аудион (рис. 3).



Рис. 3. Здание *Bell Laboratories* на Манхэттене, Нью-Йорк, 1936 год. Образцы аудионов, которые использовались в однокаскадном усилителе при демонстрации 30 и 31 октября 1912 года в Лабораторном корпусе *Western Electric Co.* Ли де Форест. Фото 1955 г.

Fig. 3. Bell Laboratories building in Manhattan, New York, 1936 Audion samples used in a single-stage amplifier during a demonstration on October 30 and 31, 1912 at the Western Electric Co. Laboratory Building. Lee de Forest. Photo 1955

Аудитория проявила небольшой интерес к демонстрации, было задано всего несколько вопросов. Присутствовавшие на демонстрации аудиона были казалось лишь слегка впечатлены. Колпиттс предложил Форесту оставить у них аппарат на ночь, чтобы инженеры могли ознакомиться с его устройством и возможно завтра задать возникшие вопросы.

Демонстрация аудионного усилителя была повторена еще раз 31 октября. К аудитории присоединился Ф. Джеветт, помощник главного инженера *Western Electric Company*. На этот раз отношение ранее безразличных и довольно отстраненных телефонных инженеров к усилителю де Фореста претерпело очень заметные и обнадеживающие изменения. В аудиторию проникла атмосфера большого интереса к устройству. Увиденное привело специалистов в восторг. По их мнению, предложенная схема усиления показала большие перспективы в революционизировании существующей практики в области междугородной телефонной связи. Эти замечания, конечно, исходили от рядовых инженеров, которые отвечают за дела и очень внимательно относятся к себе. Однако их действия зависят от свыше отданных приказов, прежде чем они смогут предпринять какие-либо окончательные действия при покупке патентов.

Характеристики аудиона оказались гораздо ниже тех, которые требовались для практической работы телефонных ретрансляторов. Любая попытка отрегулировать работу усилителя приводила к снижению усиления, голубому свечению в лампе и неразборчивости передачи. Голубая дымка в стеклянной колбе электронной лампы появлялась тогда, когда для усиления телефонного сигнала необходимо было повысить анодное напряжение.

Невзирая на это, специалисты компании были под сильным впечатлением от увиденного, особенно когда мощность усилителя была низкая, а громкость звука небольшая. Демонстрация показала, что в режимах детектирования сигнала, который выбрал Ли де Форест, аудион будет функционировать в качестве усилителя низкой частоты только при небольшой мощности и без увеличения запирающего напряжения на сетке. Как писал в своих воспоминаниях де Форест [5, р. 297]: «Там, где раньше царили безразличие и скука, теперь в комнате царила атмосфера живейшего интереса». Форест провел обычные демонстрации, ронял носовой платок и тихо заговорил в телефонную трубку. Его снова спросили, не оставит ли он усилитель у них на некоторое время, чтобы инженеры *Western Electric Co.* смогли провести дальнейшие испытания или эксперименты, которые они посчитали бы необходимыми. Форест со Стоуном согласился с этим, так как изобретение было должным образом защищено полученными патентами.

Ли де Форест находился в самом высоком расположении духа, когда покидал Лабораторный корпус компании. Он думал, что через восемь недель получит от телефонной компании предложение на 500 000 долларов за использование своего нового усилителя.

По настоянию своего знакомого О'Рейли (*O'Reilly*) из Сан-Франциско Форест отправился с демонстрацией второго экземпляра аудионного усилителя применительно к телеграфии в Спрингфилд, штат Массачусетс (*Springfield, Massachusetts*), в штаб-квартиру *Telegraphone Company*. Директор *Telegraphone Co.* и представитель в Нью-Йорке, а также адвокат «Честный Джон» (*Honest John*) Линдли (*Lindley*) проявили большой интерес к возможностям использования этого усилителя для работы с телеграфоном (*telegraphone*) конструкции Паульсена.

Ли де Форест в эти утомительные недели в Нью-Йорке, ожидая ответа от *AT&T*, отправился в Ориндж, Нью-Джерси (*Orange, New Jersey*), в лабораторию Эдисона. Эту встречу ему организовал личный представитель Эдисона Миллер Риз Хатчисон (*Miller Reese Hutchison*), который был знаком с Форестом еще со времени первых радиопередач в Нью-Йорке. Эдисон, увидев Фореста, сказал: «О, де Форест? Да, да. Ну, что нового в беспроводной телеграфии?». Беседа с великим изобретателем длилась 10 минут и выявила его большой интерес к разработкам Фореста.

После всех встреч и демонстраций, Форест решил заняться решением проблем Федеральной компании до того момента, пока не появится информация от AT&T. Прошло восемь недель, но ничего не произошло, он продолжал ждать. Когда прошло три месяца, и опять ничего не было сделано, он написал письмо Карти. В нем он просил какого-либо объяснения ситуации, заявив при этом, что любая необходимая информация будет с радостью передана, если инженеры не разберутся в возможностях нового устройства. Ответ состоял в том, что инженеры все еще продолжают исследовать устройство и пока не пришли к определенным выводам. Было добавлено, что де Форест получит ответ, как только будут приняты определенные решения по этому вопросу.

4. Не так все плохо! Третья любовь Ли де Фореста

Ли де Форест, как известно, был большим театралом. Он, невзирая, на большую занятость вопросами продвижения своего аудиона, нашел время в октябре 1912 года вместе со своим бывшим сотрудником Эмилем Си-моном (*Emil Jacob Simon*, 25.10.1888—1963) посетить *Grand Opera House* в Нью-Йорке. На его сцене в это время шла Эдуардская⁸ музыкальная комедия «*The Quaker*⁹ *Girl*» по произведению Джеймса Т. Таннера¹⁰, рис. 4.



Рис. 4. Главный вход в *Grand Opera House* в Нью-Йорке (2008 г.)
и сцена из мюзикла «*The Quaker Girl*» (1911 г.)

Fig. 4. The main entrance to the Grand Opera House in New York (2008)
and a scene from the musical “The Quaker Girl” (1911)

Де Форест был очарован хором и особенно одной из его участниц. После спектакля друзья из его компании познакомили Фореста с очарова-

⁸ Эдуардская музыкальная комедия была формой британского музыкального театра во время царствования короля Эдуарда VII (*Albert Edward*, 09.11.1841—06.05.1910).

⁹ Квакеры (или друзья) — члены христианской группы религиозного движения, официально известного как Религиозное общество друзей Церкви (*Religious Society of Friends or Friends Church*).

¹⁰ Джеймс Толман Таннер (*James Tolman Tanner*, 17.10.1858—18.06.1915) — английский режиссер и драматург. Написал много успешных мюзиклов, выпущенных Джорджем Эдвардом.

тельной хористкой мисс Мэри Мэйо (*Miss Mary Mayo*, 14.08.1893—30.12.1957), рис. 5. Мэри Мэйо была обладательницей яркого голоса сопрано очень необычного тембра, абсолютно верной высоты и естественно-го, подобного птичьему пению. Это случайное знакомство быстро переросло в искренний взаимный интерес, и к концу знаменательного 1912 года созрела глубокая любовь между красавицей Мэри Мэйо и Форестом.



Рис. 5. Вид части главной улицы Нью-Йорка Бродвей на Манхэттене. Фото Мэри Мэйо (*White*) де Форест, третьей жены Ли де Форест и матери Элеоноры и Мэрилин де Форест. Афиша мюзикла «Человек, которому принадлежит Бродвей», в котором блистала Мэри Мэйо (1909 г.).

Fig. 5. View of part of the main street of New York Broadway in Manhattan. Photo of Mary Mayo (*White*) de Forest, third wife of Lee de Forest and mother of Eleanor and Marilyn de Forest. Poster for the musical “The Man Who Owns Broadway”, starring Miss Marie Mayo (1909)

В этот период времени Форест получил письмо из офиса Федеральной телеграфной компании о том, что, если он хочет продолжить совместную работу, то должен срочно вернуться в Пало-Альто. Дальнейшее сотрудничество с Федеральной телеграфной компанией было для Фореста единственной альтернативой. Это подтверждалось тем, что к этому моменту Джон С. Стоун не получил никакой информации от телефонной компании относительно того, что они делали с аудионным усилителем, и к тому же результаты переговоров с «Честным Джоном» Линдли и директором компании «Телеграфон» были в равной степени неопределенными или склонными к неопределенной отсрочке.

В этой ситуации Форест быстро договорился с Мэри Мэйо о заключении брака и проведении медового месяца на западном побережье. Их свадьба состоялась 23 декабря 1912 года. В этот брак де Форест вступил в возрасте 39 лет, а его невеста — в 20 лет. С каждой новой женитьбой, разница в возрасте жениха (Ли де Фореста) и невесты возрастала. В третий раз она составила 19 лет.

Третий брак Ли де Фореста был далек от совершенства. Как потом оказалось, Мэри была законченной алкоголичкой. Насколько брак был

счастливым, трудно сказать. По сохранившимся письмам Ли де Фореста к Мэри видно, что он любил супругу, заботился о ней и даже посвящал ей свои стихи. Вероятно, та модель семьи, в которой Ли пребывал, устраивала его. Подтверждением является факт, что он прожил в этом браке 18 лет. От него родилось ¹¹ две дочери Элеонора (*Eleanor*) и Мерлин (*Marilyn*), а также сын (умерший в младенчестве). В 1930 году де Форест развелся с Мэри из-за ее пристрастия к алкоголю. Дальнейшая судьба Мэри Мэйо сложилась трагично. Будучи пьяной, она погибла в горящем доме в 1957 году.

5. Возвращение в Пало-Альто

Неопределенность в делах де Фореста продолжалась несколько месяцев, если более точно, то до конца января 1913 года. В один из дней Федеральная компания сообщила де Форесту, что ему прекращается выплата зарплаты. Де Форест, огорчившись, купил билет и уехал утренним поездом в Калифорнию, в его старую лабораторию.

30 января 1913 года, после четырех месяцев пребывания в Нью-Йорке, Форест снова вернулся в Пало-Альто (рис. 6). Де Форест, томимый ожиданием результатов исследований от AT&T, отмечает в своих воспоминаниях этот период жизни следующим образом [5, р. 301]: «Но я, хотя и был счастлив и полностью занят своими лабораторными задачами, жил в надежде, что семя аудиона, которое я посеял прошлой осенью в Нью-Йорке, скоро поднимется на новый урожай, призывая к моему возвращению, последняя награда, за которую я сражался с момента моего первого представления трехэлектродной лампы».



Рис. 6. «Тунервилльский троллейбус» на Университи-авеню и углу Хай-стрит, Пало-Альто, Калифорния, около 1913—1914 гг.

Fig. 6. “Toonerville Trolley” on University Avenue and the corner of High Street, Palo Alto, California, around 1913–1914

Ли де Форест снова погрузился в работу Федеральной компании на своем высокоскоростном передатчике и приемнике. Одним из первых шагов в этом направлении была адаптация нового усилителя к приему неза-

¹¹ Mary Mayo (White) de Forest (1891—1957). URL: <https://www.wikitree.com/wiki/White-52407>. (01.01.2023).

тухающих радиосигналов от дуговых радиостанций в Сан-Франциско и на Гавайях. Его второй эксперимент был связан с перфорированной лентой и автоматической системой манипуляции, которая снимала сигналы с ленты и передавала их в цепь антенны. Кстати, эта система долгое время работала и использовалась многими радиостанциями, в которых генерация длинных волн осуществлялась дуговыми или машинными генераторами.

В марте 1913 г. Джон С. Стоун приехал в Сан-Франциско чтобы встретиться де Форестом. У него была некоторая информация от его старого друга Дж. Карти о том, что телефонная компания определенно будет заинтересована в приобретении прав на патенты аудиона, если тесты, которые все еще проводятся в Нью-Йорке, дадут желаемый результат по коммерческой применимости к их линиям. В этом случае компания хотела бы иметь дело со Стоуном, который бы представлял интересы де Фореста. Де Форест согласился с предложением и подписал со Стоуном джентльменское соглашение, дающее последнему право вести переговоры с телефонной компанией о продаже соответствующих прав на аудион и получать комиссионные, если такая продажа будет произведена. Цена продажи прав на патенты не была тогда зафиксирована, но сумма в 500 000 долларов была названа справедливой.

6. Тестирование и направления совершенствования аудиона Г. Арнольдом

1 ноября 1912 года Эдвин Колпиттс вызвал в свой кабинет Гарольда Арнольда и показал ему аудионы, которые де Форест оставил у *Western Electric Company*. Колпиттс предложил ему более детально ознакомиться с усилителем на аудионе. Г. Арнольд впервые увидел конструкцию аудиона де Фореста. Он оказался еще под большим впечатлением от увиденного, чем его коллеги. Арнольд позже откровенно высказал свое мнение¹² от увиденного: «Когда я вошел в комнату, то увидел усилитель и его работу. Я был очень удивлен и несколько огорчен тому, что упустил замечательные возможности работы третьего электрода — работу сетки в аудионе. Я знал о публикациях де Фореста, но я ошибся в своем понимании того, что аудион де Фореста может все же работать. Все это было связано с тем, что я не понял роль сетки в этом устройстве». После небольшого обмена мнениями по аудиону Колпиттс позвонил мистеру Джеветту и пригласил того присоединиться к ним, чтобы обсудить вопросы тестирования электронного устройства.

¹² Records & Briefs. 15. Transcript of Record. Supreme Court of the United States. October Term, 1930. Vol. I. No. 630. De Forest Radio Company, Petitioner, General Electric Company. On Writ of Certiorari to the United States circuit court of appeals for the third circuit. P. 556.

Арнольд во время экспериментов с аудионом (рис. 8) заметил в его стеклянной колбе голубую дымку, которая появлялась, когда для усиления телефонного сигнала повышали анодное напряжение. Благодаря прекрасному образованию Г. Арнольд сразу разобрался в причинах, вызывающих нестабильную работу при испытании аудионного усилителя на больших уровнях усиления. Причину этого явления он связал с ионизацией газа, который имеется в колбе при низком вакууме. Он сделал вывод, что лампа будет работать стабильнее, если удалить молекулы оставшегося газа. Наличие молекул мешает движению электронов, которые летят от катода к аноду. Происходит рассеивание электронов, и как следствие уменьшение их энергии. Это ограничивало максимальное анодное напряжение и, следовательно, выходную мощность усилителя. Вывод Г. Арнольда противоречил взглядам Ли де Фореста, который считал, что наличие газа в стеклянном баллоне аудиона необходимо для его функционирования [7]. Дальнейшие исследования Г. Арнольда подтвердили его догадки о том, что в баллоне лампы должен быть высокий вакуум¹³, а газа не должно быть вообще. В этом случае работа лампы будет происходить с чисто электронными процессами.

Помимо этого Г. Арнольд не только увидел научно-технический потенциал продемонстрированного аудионного усилителя, но и понял то, что необходима большая и длительная по времени программа научных исследований, чтобы довести это устройство до практического использования в телефонии.



Рис. 7. Электронная лаборатория *Western Electric*, Нью-Йорк, 1915. Обратите внимание на тележки с 90-вольтовой батареей сухих элементов и механическим осциллографом. Фотография из Ваал Текнорама [8].

Fig. 7. Electronic laboratory at *Western Electric*, New York, 1915. Note trolleys containing a 90-V battery of dry cells and a mechanical oscillograph. Photograph from Vaal Teknorama [8]

Продemonстрированный де Форестом аудион представлял собой очень чувствительный, но слабый и ненадежный усилитель. Он давал усиление только при низких уровнях речи, около 30 дБ. Усилитель на аудионе содержал конденсатор в цепи сетки, оставшийся от режима детектирования, который при нормальных уровнях речи создавал шум и блокировал лампу. Арнольд на время оставил эксперименты с ртутными лампами и занялся изучением (рис. 7) и улучшением самого аудиона.

¹³ Под высоким вакуумом обычно понимают давление $p < 10^{-3}$ мм рт. ст.

Для исследований были взяты аудионы привезенные Форестом из Калифорнии и полученные от производителя McCandless. Арнольд с помощниками измерили электрические характеристики у всех образцов и к концу 1912 года уже имелось полное представление о работе аудиона.

Арнольда сделал несколько принципиальных важных усовершенствований аудиона, в частности:

1. С помощью молекулярного насоса Gaede¹⁴ (рис. 8), который в апреле 1913 года был закуплен в Германии и привезен в США, он обнаружил, что при удалении воздуха из трубки значительно возрастает поток электронов, идущих через сетку к аноду. Исходя из этого вакуум в стеклянной колбе лампы был повышен до максимально возможного уровня, обеспечиваемого техническими возможностями того периода времени.

2. Было установлено, что ограниченный срок службы аудиона до 35—100 часов связан с перекаливанием его нити накала. Для понижения температурного режима аудиона было предложено использовать нить накала из платины, покрытой оксидным веществом (нитратом бария), по методике, предложенной Венельтом (*Wehnelt*). В этом случае нить может производить адекватную эмиссию при гораздо более низких температурах с меньшей мощностью, что значительно увеличивает срок службы лампы.

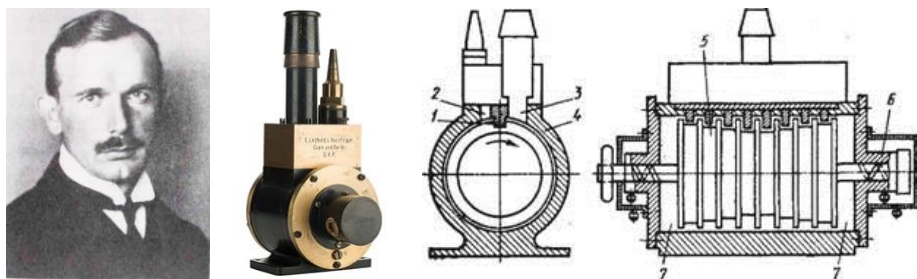


Рис. 8. Геде Вольфганг. Общий вид молекулярного насоса и его устройство. 1912 г.

Fig. 8. Gaede Wolfgang. General view of the molecular pump and its device. 1912

3. Для увеличения коэффициента усиления аудиона его дополнили еще одним анодом и одной сеткой. В результате с обеих сторон нити

¹⁴ В 1913 г. немецкий физик Геде Вольфганг (*Wolfgang Max Paul Gaede*, 25.05.1878—24.06.1945), будучи профессором Фрайбургского университета, изобрел молекулярный насос, который работал на принципиально ином способе перемещения газа, сформулированном на основе законов молекулярно-кинетической теории газов. Этот способ позволяет получать предельное разрежение до 10^{-7} Па (10^{-9} мм рт. ст.) при практически безмасляной остаточной атмосфере. Скорость откачки при этом составляет 1 л/с. Геде был владельцем почти 40 патентов в Германии, в дополнение к многочисленным патентам за границей.

накала были размещены большие по площади аноды и сетки, нежели в аудионе Фореста.

4. В стеклянном баллоне аудиона для надежной фиксации электродов были установлены стеклянные стойки.

Из проведенных исследований аудиона следовал главный вывод, который заключался в реальной возможности разработать на трехэлектродной вакуумной лампе коммерчески успешный телефонный ретранслятор.

Благодаря приобретенным знаниям об аудионе инженеры *Western Electric Company* в январе 1913 года открыли «черный ящик» Левештейна. Они ожидали найти в нем что-то новое, но были разочарованы — в ящике оказался обычный аудион без конденсатора блокировки сетки, но с гальванической батареей для создания отрицательного смещения на ней. Колпиттс в своем отчете отметил, что вопрос об отрицательном потенциале сетки аудиона должен быть изучен, и компания должна иметь возможность применять любую поляризацию.

7. AT&T приобретает права на патенты Ли де Фореста и Ф. Левенштейна

AT&T не спешила заключить сделку с де Форестом, и почти год он оставался в неопределенности относительно того, желает ли компания приобретать права на его патенты или нет. Отсрочка была отчасти понятна, так как требовалось провести большое количество испытаний. Но еще более важнее были патентные права на аудион и аудионный усилитель де Фореста, так как в начале они принадлежали *Radio Telephone Company*, а затем были переданы в *North American Wireless Corporation*, а де Форест оставался при этом всего лишь одним из нескольких претендентов на активы этих организаций. Права собственности на патенты должно было быть прояснены до момента их покупки AT&T, а на это требовалось время. AT&T передала эту работу стороннему адвокату, который не был идентифицирован как представитель телефонной компании, и он к 26 июля 1913 года сумел убедить все стороны подписать с ним исключительные права на использование аудиона во всех областях, за исключением беспроводной телеграфии и телефонии. Цена вопроса составила незначительные \$50000. Есть доказательства того, что Стоун и де Форест могли при желании попросить и \$100000, и AT&T при необходимости заплатила бы эту сумму [9]. Однако больше никто не торговался за патентные права отчасти из-за того, что компания де Фореста была в отчаянном финансовом состоянии, особенно, в ситуации с судебным процессом за мошенничество, нависшим над ним. Де Форесту нужны были деньги.

Благодаря этой покупке AT&T приобрела права, которые ей были нужны в краткосрочной перспективе, то есть права, которые необходимы для того, чтобы выполнить обязательства по представлению трансконтинентального телефонного обслуживания к концу 1914 года. Но как только Арнольд и его сотрудники получили возможность исследовать аудион, то универсальность триода де Фореста быстро стала очевидной, как и желательность получения более широких прав на него. 7 августа 1914 года компания приобрела за \$90000 неисключительную лицензию в области беспроводной телефонии [9, р. 246]. В марте 1917 года компания AT&T заплатила \$250000 за эксклюзивную лицензию на все остальные права, в частности, на продажу ламп. В итоге, AT&T купила права на патенты де Фореста на общую сумму \$390000; заметим, что это было сделано в виде трех отдельных платежей.

Компания AT&T, помимо прав на патенты Ли де Фореста, приобрела еще права на патент Фрица Левенштейна (*Fritz Lowenstein*). И это невзирая на то, что в свое время патентный поверенный компании Локвуд (*Lockwood*) сказал [10]: «Я не вижу, что у людей Левенштейна действительно есть что продать». С этим не согласился патентный поверенный Левенштейна М. Масси (*M. C. Massie*), который в делах был настойчивым и изобретательным. Спустя несколько лет ему удалось получить авторские права на отрицательное смещение на сетке триода. Представьте себе удивление специалистов патентного телефонного права, когда патент был выдан в 1917 году с текстом, в котором инженеры нашли необходимым написать о поляризации сетки!

Таким образом, патент Левенштейна был куплен тихо за очень значительную сумму в \$150000. Позже Масси рассказывал, что компания изначально могла купить патент за \$20000, но он повысил цену до \$200000, чтобы свести торг к согласованной сумме!

8. Первые конструкции триодов *Western Electric Co.*

Работа над вакуумным ламповым ретранслятором в течение 1912 и 1913 годов была кратко изложена в отчете WEC за 1913 год по рабочему заказу 7655 следующим образом [11]: «... Результатом стала возможность сконструировать усилитель *Audion*, обеспечивающий усиление без искажений в требуемых пределах входного тока и выдавать на выходе энергию, намного превышающую любое значение, которое обычно используется в телефонии; действовать как потенциальный трансформатор или трансформатор тока, способный при последовательном соединении двух или более давать усиление тока в 50 и более раз; предоставлять цепям,

между которыми он работает, практически постоянный импеданс. Существующая форма *Audion* обеспечивает практически идеальное повторение и усиление подаваемых на него токов.»

18 февраля 1913 года для президента Вейла и других руководителей была проведена лабораторная демонстрация многообещающих возможностей аудионного ретранслятора на 900-мильной ненагруженной искусственной линии с воздушным проводом длиной 104 мили. Это был односторонний тест с несколькими ламповыми ретрансляторами типа 21 (двухсторонняя схема с одним повторителем) в тандеме. В лампах не было высокого вакуума из-за ограничений имевшегося в то время в лаборатории оборудования (еще не был куплен насос *Gaede*).

К началу 1913 года, когда в Лабораторном корпусе компании *WEC* был установлен специальный немецкий насос, группа¹⁵ Арнольда начала изготавливать вручную первые лампы высокого вакуума (тип *A*) со значительно улучшенной конструкцией, чем аудион. К октябрю того же года современный триод производился в небольших количествах на Западном заводе (*Western plant*).

Через 10 месяцев после демонстрации аудиона Ли де Форестом, 18 октября 1913 года, *Western Electric Co.* изготовила с учетом усовершенствований Арнольда первый ретранслятор типа 22 (двухполосная схема с двумя повторителями) на лампах с высоким вакуумом (или жестких электронных лампах типа *A*) со сроком службы 4000 часов, рис. 9. Это позволило *Western Electric Company* в том же месяце установить этот ретранслятор в Филадельфии и ввести его в эксплуатацию с нагрузкой на коммерческой кабельной телефонной линии Нью-Йорк-Балтимор. Это был, вероятно, первый усилитель на лампе с высоким вакуумом, который был принят в эксплуатацию на линиях электросвязи. Лампа не имела цоколя и подключалась с помощью подводящих проводов.

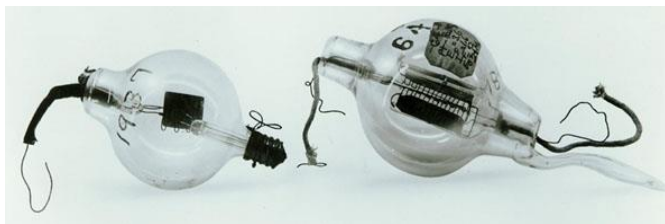


Рис. 9. Аудион Ли де Фореста представленный Джеветтом в 1912 г. (слева) и электронная радиолампа Арнольда с высоким вакуумом типа *A* (1913 г.).

Fig. 9. Lee de Forest audion presented by Jewett in 1912 (left) and Arnold's high vacuum type *A* electronic radio tube (1913)

¹⁵ Арнольд после успешных испытаний телефонного транслятора на газоразрядной лампе в конце 1912 г. получил свою собственную исследовательскую группу (отдел *A*).

После короткого периода времени лампы тип «А» заменили на лампы типа «В». Эта лампа явилась улучшенным вариантом по сравнению с типом «А» в нескольких направлениях (например, нить накала была несколько больше, и сделана из витой платиновой ленты). Но наиболее заметное различие было в структуре сетки. Каждая сетка была составлена из восьми горизонтальных проводов, равномерно расположенных в вертикальном направлении и приваренными к двум вертикальным опорам. Эта конструкция сетки получила название как «лестничный тип», которые широко использовался несколько лет в конструкциях ламп *Western Electric Company*. Нужно заметить, что «лестничный тип» более сложен при изготовлении в сравнении с зигзагообразной сеткой аудиона. В лампе типа «В» срок службы нити накала составлял 4500 часов.

К ноябрю 1913 года сотрудникам лаборатории Г. Арнольда удалось значительно улучшить вакуум аудиона и поднять анодное напряжение до 80 В, в то время как лампа Фореста была ограничена примерно 20 В. В дальнейшем улучшения вакуума позволили безопасно увеличить анодное напряжение до 200 В.

9. Измерение экстремального вакуума

Весной 1914 г. Ф. Джеветт посетил Корнельский университет в Итаке (штат Нью-Йорк), где познакомился с молодым преподавателем физики Оливером Бакли (*Oliver Ellsworth Buckley*, 08.08.1887—14.12.1959) и пригласил его стать членом исследовательской группы под руководством Джеветта в лаборатории *Western Electric Company* в Нью-Йорке. Бакли принял приглашение после защиты докторской диссертации и получения докторской степени (*PhD* по физике) в июне 1914 года.

14 июля 1914 года Бакли начал свою карьеру в инженерном отделе WEC, работая непосредственно с доктором Гарольдом Арнольдом. Поскольку Арнольд координировал проект и посвящал большую часть своих замыслов проектированию конструкции и геометрии электродов ламп, то он поручил Бакли разработку новых высоковакуумных термоэмиссионных устройств, пригодных для проводных и радиотелефонных систем. Бакли в начале исследований обнаружил, что универсально используемый роторный молекулярный насос *Gaede* не подходит по скорости, мощности и степени вакуума для сложной задачи «накачки» изготовленных новых термоэмиссионных ламп. Он изобрел и усовершенствовал диффузионный насос на парах ртути, отвечающий требованиям скорости, производительности и степени вакуума. Позже стало известно, что доктор Ирвинг Ленгмюр из исследовательской лаборатории

General Electric Company независимо сделал почти идентичное изобретение. Диффузионный насос Бакли и Ленгмюра был предшественником большого семейства ртутных, а затем и масляных диффузионных насосов, которые сегодня широко используются в лабораториях и на производственных предприятиях.

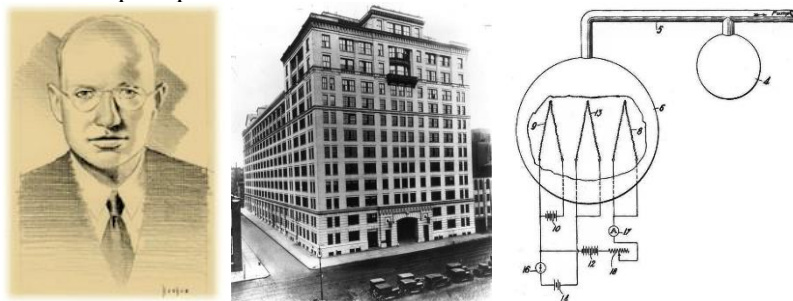


Рис. 10. Оливер Бакли. Здание штаб-квартиры *Bell Labs* на 463 West Street, Нью-Йорк, в котором располагалась *Bell Labs*, когда в ней работал Бакли. Аппаратура для измерения давления газа по Бакли: рисунок из его патента US1372798 с приоритетом от 27 ноября 1916 г.

Fig. 10. Oliver Buckley. The Bell Labs headquarters building at 463 West Street, New York, which housed Bell Labs when Buckley worked there. Equipment for measuring gas pressure according to Buckley: drawing from his patent US1372798 with priority dated November 27, 1916

Для будущей трансконтинентальной телефонной линии требовалось большое количество электронных ламп для установки в трансляторах, которые должны были быть одинакового качества и мощности, имели достаточно долгий срок службы и низкие эксплуатационные расходы, чтобы быть экономически целесообразными. Перечисленные требования к лампам в первую очередь зависели от уровня вакуума. До 1914 года единственными доступными манометрами для измерения экстремального вакуума были манометр Кнудсена (*Knudsen*) и молекулярный датчик Ленгмюра (*Langmuir*). Оба они имеют серьезные недостатки из-за их тонкой конструкции и невысокого быстродействия.

Необходимость непрерывного измерения степени вакуума в баллоне электронной лампы побудила Бакли в 1915—1916 гг. разработать метод и аппаратуру для измерения давления газа: заявка на получение патента US1372798 была подана 27 ноября 1916 г. [12]. В манометре Бакли использовалась ионизация газа электронным разрядом. Это устройство оказалось свободным от ограничений предыдущих манометров и функционировало в большом диапазоне давлений.

Манометр Бакли был по существу одним из триодов Арнольда, расположенных внутри изучаемого вакуумированного пространства, рис. 10.

Манометр состоит из трех электродов, запаянных в стеклянную колбу, которые служат катодом, анодом и коллектором положительных ионов. Катод может быть любым источником чисто электронного разряда, таким как катод Венельта или нагретая вольфрамовая или другая металлическая нить. Точные формы электродов не имеют большого значения. Коллектор расположен между двумя другими электродами и имеет такую форму, чтобы не блокировать полностью поток электронов к аноду.

Миллиамперметр используется для измерения тока на аноде, а чувствительный гальванометр — для измерения тока от коллектора, который поддерживается отрицательным по отношению к катоду, чтобы улавливать только положительные ионы. Сетка, будучи смещена отрицательно, действует как коллектор положительных ионов. В другом варианте роли сетки и анода поменялись местами. В любой форме отношение положительного «коллекторного» тока к анодному току, как показал Бакли, пропорционально давлению. Манометр можно использовать в диапазоне давлений от 10^{-3} до $4 \cdot 10^{-6}$ мм ртутного столба. Простой по конструкции и легко воспроизводимый манометр Бакли обладал также преимуществом быстроты и простоты измерения переменного давления, поскольку нужно было следить только за показаниями чувствительного гальванометра (в коллекторной цепи). Эти атрибуты, очевидно, имели большое значение в исследовательской программе, которая по необходимости включала измерения на тысячах нитей накала, чтобы найти лучшие материалы и процессы, и в то же время для раскрытия секретов оксидных катодов Венельта, чтобы отказаться от некоторого их эмпиризма при их анализе, от которого зависело его дальнейшее улучшение.

10. Разработка теории усиления аудиона

В сентябре 1913 г. к группе Арнольда присоединился Хендрик ван дер Бейл, рис. 11. Ему показали аудион и сказали, что он способен обнаруживать радиоволны и усиливать слабые телефонные токи, но что неизвестно, как и почему это происходит, и что его задачей будет разобраться в этом вопросе. Всю свою жизнь Хендрик подтверждал свою веру в то, что достижения можно добиться только упорным трудом и усилиями, и он был готов работать и упорно трудиться, чтобы выполнить поставленные задачи. И все же во всех его начинаниях всегда присутствовал элемент удачи, как будто благосклонное провидение наблюдало за ним, готовое время от времени подарить ему удачу.

Бейл понял, что для дальнейшего прогресса в развитии триода необходимо разработать научные подходы для определения его основных па-

раметров, не только электрических, но конструкционных, в частности, размеров электродов и расстояния между ними. Он определил, что термоэлектронный триод очень похож на фотоэлектрическую лампу, с которой проводил экспериментальные исследования в Дрездене. Хотя Ли де Форест и ван дер Бейл экспериментировали с почти идентичными устройствами, но цели они преследовали совершенно разные. Целью же американца де Фореста, с одной стороны, было сконструировать свое устройство для обнаружения электромагнитных волн. Основным же исследовательским интересом южноафриканца Бейла в то время было определение максимальных скоростей, с которыми электроны испускаются из металлов под воздействием ультрафиолетового света.



Рис. 11. Ван дер Бейл (стоит слева) сфотографирован предположительно с тремя своими коллегами из *Western Electric* в Нью-Йорке в декабре 1914 г. Мы полагаем, что Арнольд (сняв очки) может сидеть справа. Фотография Ваал Текнорама [13].

Fig. 11. Van der Bijl (standing on the left) photographed with, presumably, three of his colleagues from Western Electric in New York in December 1914. We think that Arnold (having removed his glasses) may be seated on the right. Photograph from Vaal Teknorama [13]

Для экспериментальных исследований Бейл использовал обычную трехэлектродную фотоэлектрическую лампу, представленную на рис. 12. Это исследование показало, что поле между электродами *A* и *N* не только проходило через сетку *N*, но и то, что при широком разнообразии условий поле рассеяния между электродами *P* и *N* можно было описать простой линейной функцией поля, приложенного между *A* и *N*.

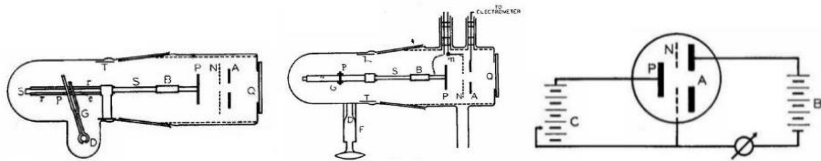


Рис. 12. Трехэлектродная фотоэлектрическая лампа и схема ее включения, которую использовал ван дер Бейл в экспериментах для определения максимальной скорости электронов, испускаемых цинком, облученным ультрафиолетовым светом [14], [15].

Fig. 12. Three-electrode photovoltaic tube and its switching circuit, which was used by van der Bijl in experiments to determine the maximum speed of electrons emitted by zinc irradiated with ultraviolet light [14], [15]

Бейл начал исследование аудиона, имея определенный объем знаний. Он обнаружил, что уравнения, которые вывел в Дрездене для описа-

ния действия электрических полей сетки и анода (пластины) на фотоэлектроны, можно адаптировать для описания поведения аудиона с помощью хорошо известного сейчас им полученного до этого фундаментального уравнения. Исходя из сделанных ранее расчетов, было сравнительно несложно вывести в рекордно короткие сроки основное уравнение, управляющее работой трехэлектродной лампы типа аудиона в режиме усиления.

Бейл предположил, что для нити накала аудиона, испускающей электроны в вакуумированном пространстве, результирующее поле E_s в этом пространстве состоит из приложенных разности потенциалов нить накала — сетка E_g , и разности потенциалов анод — нить накала E_p , что приводит к протеканию тока I к аноду и может быть записано в виде уравнения [16]:

$$E_s = \gamma E_p + E_g + \varepsilon, \quad (1)$$

где ε — небольшая величина, зависящая от ряда факторов, таких как разность потенциалов между нитью накала и сеткой, и мощности нити накала (обычно это порядка вольт и ею можно пренебречь, когда она мала по сравнению с γE_p), γ — коэффициент поля рассеяния, который зависит от конструкции сетки и ее положения. Если сетка очень мелкая, то $\gamma \approx 0$, а если убрать сетку, то есть, случай простой лампы (вакуумный диод), то $\gamma = 1$. В современном понимании γ — это проницаемость сетки лампы.

Чтобы получить представление о влиянии вспомогательного электрода, Бейл рассмотрел схему, показанную на рис. 13. Из уравнения поля рассеивания (1) следует:

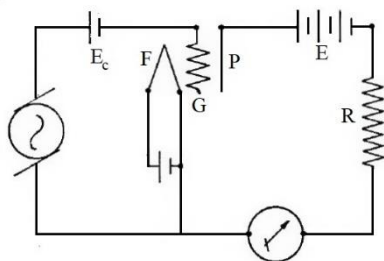


Рис. 13. Схема включения аудиона в эксперименте ван дер Бейла 1913 г.

На схеме обозначено: F — нить накала, P — анод, G — вспомогательный электрод в виде сетки между F и P . [16, p. 178].

Fig. 13. Scheme of turning on the audion in van der Bijl's experiment. 1913. The diagram shows: F is the filament, P is the anode, and G is the auxiliary electrode in the form of a grid between F and P [16, p. 178]

ной независимо от того, какое из наложенных электростатических полей

1. Путем добавления третьего электрода или сетки возможно наложение в пространстве между катодом и сеткой двух электростатических полей, каждое из которых способно независимо управлять протеканием тока через лампу, и соотношение между которыми может быть выражено простым числовым коэффициентом μ .

2. Какой бы ни была форма вольт-амперной характеристики трехэлектродной лампы, эта форма остается неизмен-

используется в качестве переменной при определении характеристики, при условии, что вспомогательный электрод или сетка поддерживаются достаточно отрицательными, чтобы отклонять от них электроны.

Добавление третьего электрода к лампе и установление его связи с полем рассеивания заложили основу радиотелефонии и сделали ее возможной.

В то время, в 1913 году, было известно, что аудион способен эффективно обнаруживать радиоволны и усиливать телефонные токи. Две другие важные функции аудиона, которые были необходимы для завершения этого великого достижения радиотелефонии, а именно: создание незатухающих непрерывных колебаний и модуляция их в соответствии с речевыми волнами, появились вскоре после этого.

Введение сетки между нитью накала и анодом настолько усложняет распределение электрического поля, что теоретический вывод связи между током на аноде и приложенными напряжениями между нитью накала и сеткой, и нитью накала и анодом затруднителен, и приводит к выражениям, которые слишком сложны для практического использования. Поэтому Бейл счел более практичным определять характеристику тока I лампы эмпирически. В результате большого количества проведенных экспериментов, он обнаружил, что характеристика тока I аудиона может быть представлена с достаточной точностью следующей квадратичной зависимостью [16, р. 180]:

$$I = \alpha(\gamma E_p + E_g + \varepsilon)^2, \quad (2)$$

где α — константа, зависящая от конструкции устройства.

Выражение (2) определяет ток анода в зависимости от потенциалов анода и сетки, при этом потенциал нити накала равен нулю. Если к сетке и аноду приложить несколько напряжений, то тогда (2) примет вид

$$I = \alpha(\gamma \sum E_p + \sum E_g + \varepsilon)^2. \quad (3)$$

Если, например, переменная ЭДС $E_{\text{эдс}} = e \sin pt$ накладывается на напряжение сетки E_g , то функциональная зависимость (2) запишется следующим образом

$$I = \alpha(\gamma E_p + E_g + e \sin pt + \varepsilon)^2. \quad (4)$$

Необходимо понимать, что функциональная зависимость (2) определяет прямую характеристику тока I самого устройства, то есть E_p в выражении (2) представляет собой напряжение непосредственно между нитью

накала и анодом P (рис. 13). Если сопротивление R равно нулю, то разность потенциалов равна E , то есть напряжение батареи в цепи $EPRE$, является постоянным. Если R не равно нулю, то тогда под действием протекающего тока через R между его концами устанавливается разность потенциалов и разность потенциалов E_p становится функционально зависимой от тока. Эту характеристику всегда можно получить экспериментально, сделав R равным нулю и включив в цепь $FPER$ (рис. 13) амперметр, сопротивление которого мало по сравнению с внутренним выходным сопротивлением самого усилителя.

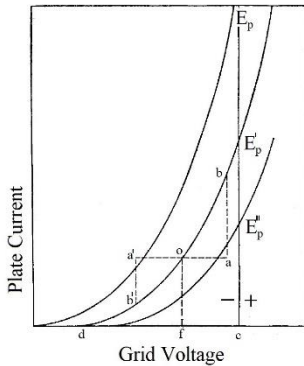


Рис. 14. Анодно-сеточные характеристики аудиона, полученные из уравнения (6). [16, p. 178].

Fig. 14. Anode-grid characteristics of an audion obtained from equation (6). [16, p. 178]

Обозначим правую часть производной (6) через Q , а правую часть производной (7) через S :

$$Q = 2\alpha\gamma(\gamma E_p + E_g + \varepsilon), \quad (8)$$

где Q — электрическая проводимость аудиона,

$$S = 2\alpha(\gamma E_p + E_g + \varepsilon), \quad (9)$$

где S — крутизна аудиона. Если разделить уравнение (8) на уравнение (9), то получим

$$\frac{Q}{S} = \gamma = const. \quad (10)$$

Графическое представление функции (2) дано на рис. 14. Кривые показывают ток анода как функцию напряжения сетки E_g для различных значений параметра E_p . Исходя из уравнения (2) и рис. 14 видно, что ток конечен для отрицательных значений напряжения сетки E_g и уменьшается до нуля только при

$$E_g = -(\gamma E_p + \varepsilon). \quad (5)$$

Взяв частные производные для I (2), сначала по E_p , сохраняя E_g постоянным, а затем по E_g , сохраняя постоянным E_p , получим

$$\frac{\partial I}{\partial E_p} = 2\alpha\gamma(\gamma E_p + E_g + \varepsilon). \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial E_g} = 2\alpha(\gamma E_p + E_g + \varepsilon). \quad (7)$$

Уравнение (10) называют именем ван дер Бейла (*equation van der Bijl*). Это уравнение описывает усиление аудиона через его конструктивные параметры и константы цепи. Основываясь на уравнении (10), можно сказать, при каких условиях аудион будет работать в качестве усилителя. Это будет в том случае, если изменения выходного тока I удовлетворительно отражают изменения входного напряжения E_g при определенных условиях и для определенных диапазонов значений E_g и E_p . Другими словами, небольшие изменения напряжения сетки на входе аудиона приводят к большим изменениям анодного тока на выходе. На этом основан усиливающий эффект аудиона, который дает основание для использования его в качестве усилителя. Уравнение (10) можно записать иначе, если коэффициент проницаемости сетки выразить через коэффициент усиления $-\gamma = \frac{1}{\mu}$, а проводимость лампы через ее внутреннее сопротивление $-Q = \frac{1}{R_i}$. Тогда получим

$$S = \frac{\mu}{R_i}. \quad (11)$$

Открытие в 1914 г. взаимосвязии внутренних трех «констант» вакуумной лампы: крутизны S , коэффициента усиления μ и внутреннего сопротивления R_i и запись их в виде формулы (11) принадлежит Хендрику ван дер Бейлу, сотруднику *Western Electric*. Полученный результат был опубликован в ряде статей 1918—1919 гг. [16,17]. Невзирая на это, формулу (11) ошибочно в технической литературе приписывают немецкому ученому радиотехнику Георгу Баркгаузену (*Georg Heinrich Barkhausen*, 02.12.1881—20.02.1956). Баркгаузен сделал эту формулу доступной для более широкой аудитории в рамках своих обширных исследований процессов в электронных лампах, начиная с 1918 года. В технической литературе формула Баркгаузена записывается, обычно, в виде:

$$S \cdot \gamma \cdot R_i = 1. \quad (12)$$

С помощью уравнения (10) были получены выражения для различных параметров, влияющих на работу аудиона, таких как импеданс, усиление напряжения, усиление тока и мощности, и т. д., а поскольку α и μ являются константами, зависящими от конструктивных размеров лампы, то это позволило конструировать лампы практически для любой желаемой цели. Выяснилось, что для одних целей желательно иметь высокое значение μ , а для других — низкое. Поскольку параметр μ зависел от конструктивных размеров лампы, таких как размер ячейки сетки и ее расстояние от нити накала и анода, было несложно спроектировать лампы с «высоким μ »

и «малым μ ». Бейлом были разработаны методы экспериментального определения двух наиболее важных констант лампы: усиления μ и внутреннего выходного сопротивления. В 1920 году Бейл написал и опубликовал свою единственную книгу по радиотехнике. В ней он собрал свои научные исследования по электронным лампам в виде монографии «Термионная вакуумная лампа» (англ. *The thermionic vacuum tube and its applications*), которая более двадцати лет была стандартным учебником по ламповым технологиям [18], рис. 15.

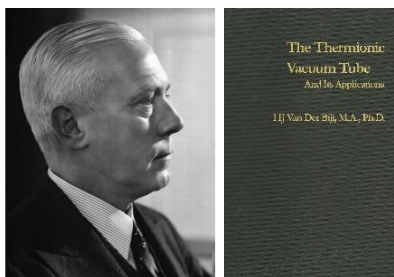


Рис. 15. Хендрик ван дер Бейл в последние годы жизни. Фотография Ваал Текнорама. Его монография «Термионная вакуумная лампа и ее применение» (1920 г.)

Fig. 15. Hendrik van der Bijl in later life. Photograph from Vaal Teknorama. His monograph "The thermionic vacuum tube and its applications" (1920)

На самом деле, что касается работы двух ламп Фореста и Бейла, то их работа идентична. Таким образом, зависимость поля рассеяния от параметров лампы, которую обнаружил Бейл с помощью фотоэлектрической лампы, была непосредственно применена к аудиону. Это позволило сделать возможным объяснение явлений, наблюдаемых в аудионе. Именно здесь сошлись две упомянутые выше отдельные линии развития трехэлектродных ламп.

Как только теория аудиона была разработана и стало понятно, что происходит в лампе, развитие ламповых технологий пошло быстрыми темпами. Первую лампу типа *М* Бейл сконструировал для определенной цели, а именно для телефонного ретранслятора (усилителя мощности). Над практической разработкой и количественным расчетом первых коммерческих триодов Бейл работал с Гарольдом Арнольдом.

11. Производство триодов *Western Electric Co.* для телефонных ретрансляторов

Ретрансляционная лампа типа *М* появилась как раз вовремя. Ее необходимость диктовалась приказом компании *Bell* о том, что к февралю 1915 года должна быть построена и успешно функционировать телефонная линия между Нью-Йорком и побережьем Тихого океана, открытие которой приурочивалось к открытию Панамо-тихоокеанской выставки. Разработка подходящей лампы-ретранслятора была лишь относительно небольшой частью работы, но от нее зависела конструкция цепей. При этом

необходимо было иметь уверенность в том, что можно произвести достаточное количество таких ламп с неизменными характеристиками, чтобы обеспечить необходимое усиление и мощность, сделать возможным полное согласование импедансов по всей длине телефонной линии, превышающей 3400 миль. Телефонная сеть была открыта для коммерческой связи почти за два месяца до открытия Панамо-Тихоокеанской международной выставки в Сан-Франциско, что стало свидетельством эффективности и усердия организации *Bell Telephone*.

В начале 1914 года стало очевидным, что использование ламп без цоколя приносит много неудобств при эксплуатации. В связи с этим были предприняты шаги по разработке подходящего цоколя и монтажных панелек для ламп, что должно было облегчить их замену. Первые лампы¹⁶ с цоколем были известны как лампы типа «М» (*M* — *mounted*, установка), или 101A и предназначались для использования в телефонных усилителях, рис. 16. Ламповые панельки для ламп были очень массивными. Они изготавливались методом литья из латуни, аналогично ранее использовавшимся для механических ретрансляторов.

Ретрансляторы на лампах тип «М» впервые были использованы для очень больших расстояний на трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско, которая была открыта 15 января 1915 года. Лампы тип «М» работали при токе накаливания 1,35—1,55 А и напряжении около 4 В. Нормальное напряжение анода составляло 100 В, анодный ток — 10—15 мА. Лампа имела коэффициент усиления 5, а ее внутреннее сопротивление было около 5000 Ом. Срок службы составлял около 400 часов, что значительно больше, чем у аудиона Фореста.



Рис. 16. Общий вид ламп типа: *M* — 101A (а), *L* — 101B (б)
и их устройство (в). 1915 г.

Fig. 16. General view of type tubes: *M* – 101A (а), *L* – 101B (б)
and their arrangement (в). 1915

¹⁶ Лампы производились по патенту US1130042A ван дер Бейла и А. Николсона с приоритетом от 6 июня. 1914 г.

Теоретические исследования работы первых ламп с высоким вакуумом показали, что их срок службы может быть значительно удлинён за счёт увеличения термоэлектронной эмиссии нити накала. Это позволяло при работе лампы получить требуемую термоэлектронную эмиссию при более низкой температуре нити. В результате была разработана и впервые выпущена в промышленных масштабах в 1915 году лампа типа «L», рис. 16. Лампы типа «M» ещё некоторое выпускались с целью их замены в устройствах, для которых они были разработаны. В лампе типа «L» нить накала имела длину в 2 раза больше, чем в типе «M», что привело к увеличению площади излучения тоже в 2 раза. Другие изменения касались конструкции лампы. Количество горизонтальных проводов в сетке было увеличено с 8 до 9, а также сделано другое крепление анода. Срок службы лампы оказался около 4500 часов, что примерно в 11 раз больше, чем у его предшественника типа «M», и в 50—100 раз больше аудиона, который первоначально был представлен де Форестом телефонной компании.

Первые образцы ламп типа «L» не содержали на цоколе маркировки с патентными правами компании. С конца 1915 года стальным штампом на цоколе начала ставиться маркировка патентных прав. На каждой лампе имелся серийный номер, отображенный «алмазными чернилами» (*diamond ink*) и проставленный резиновой печатью. Примерно с середины 1916 года WEC перестала ставить буквенные обозначения на лампах, а взамен появились кодовые номера, например, тип «M» стал «101A», а тип «L» — «101B».

Лампы типов «101A» и «101B», впервые стали известны как *Telephone Repeater Elements*, позже, в 1917 году, название было изменено на *Repeater Bulb* (ламповый ретранслятор или повторитель). Эти названия, а не вакуумная лампа (*Vacuum Tube*), в дальнейшем стали применяться, чтобы дифференцировать лампы, изготовленные для использования в телефонных ретрансляторах. До 1922 года использовалось словосочетание *Vacuum Tube* ко всем устройствам, в которых они использовались, независимо от их предназначения.

После того, как были сделаны улучшения первых ламп серии 101, им на смену пришли новые модели типа 101D, а позже — типа 101F, рис. 17. Лампа 101D предназначалась для использования в усилителях звуковой частоты. *Western Electric Co.* обладала эксклюзивными правами на эту лампу и не продавала ее другим компаниям. Продолжительность жизни лампы 101D составляла 40000 часов, что в 50 раз больше, чем у типа 101A. Эта лампа очень хорошо подходила для работы в непрерывном режиме, в котором требовалось длительное время бесперебойной работы устройства.

У лампы 101F нить накала работала при постоянном напряжении 4,1 В и токе 0,5 А. Лампа 101D имела большее напряжение для питания

нити накала — 4,5 В и ток накала 1 А. Лампы 101D и 101F отличались между собой величинами отрицательного смещения на сетке и емкостью между электродами: 101D имела коэффициент усиления $\mu = 6,5$, лампа 101F — $\mu = 7,5$.



Рис. 17. Радиолампы WEC под названием «теннисный мяч» типа: 101D (а) с ламповой панелькой 100-L, 101F (б) и цоколевка ламп 101D и 101F (в).

Fig. 17. WEC tubes called “tennis ball” types: 101D (a) with socket base model 100-L, 101F (б) and tube base 101D and 101F (в)

У лампы 101D анод состоял из двух пластин, а у 101F анод был сделан в виде тонкого параллелепипеда. Лампы 101D и 101F получили известность под названием «теннисный мяч» (*Tennis Ball Tube*). «Теннисный мяч» имел диаметр стеклянного баллона 60 мм ($2\frac{3}{8}$ дюйма). Высота лампы составляла 114 мм ($4\frac{1}{2}$ дюйма). Форма баллона ламп была изменена в конце 1930-х годов, а их производство продолжалось до 1984 года. В конце 1920-х годов в *Bell System* использовалось более 50000 ламп.

12. Производство триодов *Western Electric Co.* для военных целей

Радиолампы, которые производила *Western Electric Co.* использовались только для производственных и правительственных целей, и для продажи не предназначались. На случай возможного вступления США в Первую мировую войну, *Western Electric Co.* начала разработку конструкций ламп для использования в военных целях. Военным требовались стабильные, надежные и с разумным сроком службы электронные лампы.

Вскоре компания наладила массовое производство первого коммерческого триода тип VT1 (*VT* — *Vacuum Tube*, вакуумная лампа), который предназначался для общего использования, в частности, в радиоприемниках в качестве детектора, усилителях и маломощных генераторах, рис. 18. Для лампы VT1 впервые была выбрана «цилиндрическая форма», вместо ранее использовавшейся сферической конструкции. Сетки и нити накала вместе с двумя анодами крепились к керамической стойке. Анодные листы имели волнистый профиль, что обеспечивало им достаточную жесткость. В лампе электроды устанавливались вертикально, в то время как в Европе

все еще их располагали горизонтально. VT1 было обозначением Корпуса связи США для лампы, которая была известна как *Tyre-J*. Эта же лампа использовалась ВМС США под обозначением CW-933. Кодовые номера *Western Electric*, присвоенные этому типу, относятся к серии 203, первым из которых был «203A». С 1919 года вместо этой старой конструкции можно было использовать *VT-Class-I* или *B-Moorhead*.

В апреле 1917 года США вступила в Первую мировую войну, через 22 месяца после британцев и за 19 месяцев до перемирия, которое привело войну к внезапному завершению. В этот момент времени Корпус связи США (*United States Army Signal Corps*¹⁷) нуждался в небольших 5-ваттных ламповых передатчиках.

Лампа VT1 была признана слишком хрупкой для использования в экстремальных условиях, в частности, на поле боя. По прошествии нескольких месяцев в конструкцию лампы VT1 были внесены значительные изменения. Из-за большей мощности и, следовательно, большого нагрева лампы, восковая начинка была заменена термостабильной вставкой из фенольной смолы.

Последняя партия ламп VT1 была выпущена в 1916 году, так как в следующем 1917 году было освоено производство ламп типа VT-2 мощностью 5 Вт, рис. 18. Сферический стеклянный баллон лампы VT-2 содержал плоские электроды. Нить накала была сделана из платины с покрытием, которая при номинальном токе нагрева светилась ярко-красным цветом, а анод при этом имел едва заметный красный цвет. Интересно, отметить, что лампа содержала плавкий предохранитель в виде полоски из золота шириной 1/16 дюйма для защиты анода от выгорания при большом токе, который не должен был превышать 40 мА. Цоколь лампы — 4-контактный байонетный¹⁸. Это было первое семейство радиоламп, в котором использовался байонетный цоколь с боковым штифтом. Этот тип цоколя используется до настоящего времени.

Впоследствии лампа VT-2 продавалась под маркировкой 205-B. Лампы, подобные VT1 и VT2, были также изготовлены для военно-морского флота США, но под другими обозначениями: CW-933 (VT1) и CW-931 (VT2). В годы Первой мировой войны (1914—1918 гг.) *Western Electric* произвела около полумиллиона ламп типа VT-1 и VT-2.

¹⁷ Корпус связи армии США (USASC) разрабатывал, тестировал, обеспечивал и управлял поддержкой коммуникационных и информационных систем для командования и управления объединенными вооруженными силами. Он был основан в 1860 году.

¹⁸ Байонетное соединение (байонет, штыковое соединение) — быстро выполняемое соединение деталей посредством осевого перемещения и поворота (иногда бокового смещения) одной из них относительно другой.

Ближе к концу Первой мировой войны ван дер Бейлу было предложено разработать ламповый триод с минимально возможной мощностью нити накала для использования в траншейных установках с батарейным питанием. Нить накала получившейся лампы VT-3 (рис. 19) потребляла 0,2 А от элемента 2 В (0,4 Вт), что составляло примерно десятую часть мощности, необходимой для предыдущих ламп.

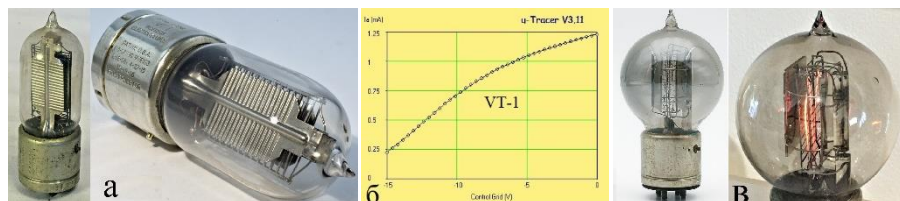


Рис. 18. Общий вид лампы: VT1 (а), анодно-сеточная характеристика¹⁹ VT1 (б), VT2 (в). 1918 г.
Fig. 18. General view of the tube: VT1 (a), anode-grid characteristic VT1 (б), VT2 (в) 1918

Война закончилась до того, как лампу VT-3 можно было использовать в военных целях, но ван дер Бейл продолжил разработку и изготовил лампу меньших размеров, диаметром 17 мм, а высотой всего 68 мм. Из-за своего размера она стала известна как «арахисовая лампа» (*peanut tube*). На эту лампу несложной конструкции Бейл получил патент US1566293 (рис. 19). В Корпусе связи «арахисовая лампа» получила обозначение WE VT-5 (тип 215) NE (*Northern Electric*), а в ВМФ (*Navy*) — CW-1344 (позже CW-38015). В компании WEC «арахисовая лампа» называлась тип «N». *Western Electric* произвела очень мало таких ламп, но лицензия на конструкцию была предоставлена нескольким другим производителям, включая *Westinghouse* (WD-11²⁰) и трем производителям в Соединенном Королевстве, где она была известна как *Wecovalve*.

Нить триода VT-5 (тип 215) была намотана одножильным проводом «Конель» (*Conel*), покрытого барием и стронцием, установлена вертикально. Сетка представляла собой спиральную никелевую проволоку, а анод — никелевый цилиндр. Эта конструкция была чувствительна к механическому удару и была улучшена за счет добавления армирующего стекла в верхней части трубчатой конструкции, сделанного из тростникового стекла²¹ толщиной 1/16 дюйма, и никелевой проволоки диаметром 0,010 дюйма, встроенной в стержневой зажим параллельно трубчатому аноду. В лампе был установлен геттер (газопоглотитель) магния.

¹⁹ VT-1 Sensibly equivalent to: WE-203A. The Valve Museum. URL: <http://www.r-type.org/exhib/acf0028.htm>. (09.02.2023).

²⁰ Westinghouse Tube Development Leading to the WD-11. URL: <http://www.bill01a.com/articles/west%20wd-11.htm>. (09.02.2023).

²¹ Тростниковое стекло — вид рельефного стекла.

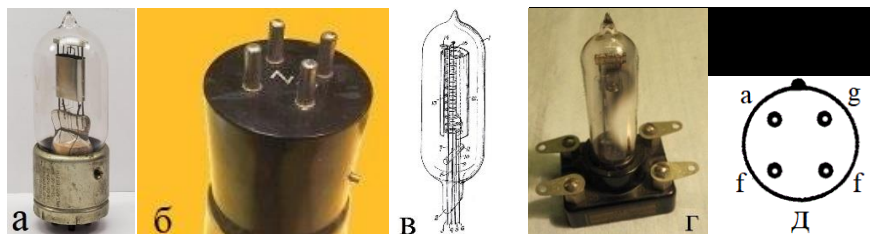


Рис. 19. Общий вид лампы VT-3 (а), расположение выводов VT-3 на цоколе (б). Устройство «арахисовой лампы» (в). Рисунок из патента US1566293 ван дер Бейла с приоритетом от 4 сентября 1919 г. «Арахисовая лампа» WEC VT-5 (тип 215) NE (Northern Electric) с ламповой панелькой (г). Цоколевка VT-5 (д).

Fig. 19. General view of the VT-3 tube (а), the location of the VT-3 terminals on the base (б). “Peanut tube” device. Drawing from van der Bijl’s patent US1566293 with priority September 4, 1919. “Peanut tube” WEC VT-5 (type 215) NE (Northern Electric) with a tube socket (г). Pinout VT-5 (д)

Хотя лампа VT-5 (тип 215) была разработана для портативных военных средств связи, но могла функционировать как усилитель звука и промежуточной частоты, детектор или генератор. Этот триод использовался в приемнике *Wireless Specialty Apparatus BC-144* (1928 г.) и усилителе *WE 23A*. Лампа 215A также использовалась в гражданских целях, например, устанавливалась в мониторах *WE 500* кГц для радиовещательных станций (модель *3A TRF* и в супергетеродинные приемники типа 4 и аудиометрах. Помимо этого лампа использовалась в вещательных приемниках *TRF*, специально созданных *WEC* для полиции Нью-Йорка (1925 г.). На каждом участке было радио, настроенное на городскую станцию *WNYC*. Используя поворотные селекторы рельсового типа, управляемые тоном 3000 Гц, диспетчер мог выборочно оповещать каждый объект отдельно. *Western Electric* окончательно отказалась от поставок ламп ВМФ США в 1983 году, после 64 лет производства.

13. Истоки французского триода ТМ

В сентябре 1914 года, сразу после начала Первой мировой войны, ван дер Бейл разработал лампу с горизонтально расположенными коаксиальными цилиндрическими электродами [18, pp. 243—244], рис. 20.

Лампа ван дер Бейла предназначалась для военных целей, в частности, радиосвязи. Предположительно *Western Electric* проигнорировала эту конструкцию, потому что она не соответствовала потребностям телефонной индустрии и не увидела потенциал зарождающегося военного рынка [13, p. 2450]. Это вероятно и явилось причиной того, что ван дер Бейл оформил заявку на получение патента «Электронно-разрядное устройство

и способ его изготовления» (англ. *Electron-discharge device and method the making the same*) только через 4 года после разработки лампового триода, 4 декабря 1918 г. В то время как французские инженеры подали заявку на изобретение под названием «Приспособление для крепления элементов электроламп типа «Аудион» (фр. *Dispositif de montage des éléments des tubes à vide «genre Audion»*) 25 октября 1915 г.

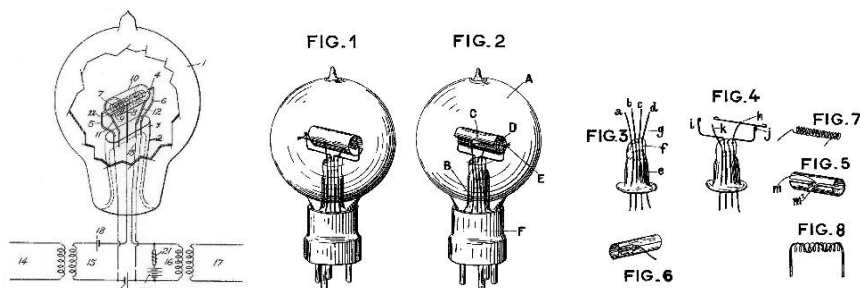


Рис. 20. Лампа ван дер Бейла (слева) по патенту US1738269 с приоритетом от 4 декабря 1918 г. [19]. Справа французская лампа М. Пери и Ж. Биге по патенту FR492657 с приоритетом от 25 октября 1915 г. [20].

Fig. 20. Van der Bijl tube (left) according to patent US1738269 with priority dated December 4, 1918 [19]. On the right French tube by M. Peri and J. Biguet to patent FR492657 with priority dated October 25, 1915. [20]

На протяжении 30 лет, в трех отдельных заявлениях, ван дер Бейл утверждал, что его конструкция трехэлектродной лампы по патенту US1738269 легла в основу известной французской лампы типа *ТМ*, рис. 20. Несколько миллионов ламп типа *ТМ* было произведено во Франции и Великобритании.

14. Дальнейшая деятельность Хендрика ван дер Бейла

В 1915 году *Western Electric*, успешно связав США от побережья к побережью по телефону, обратила свое внимание на трансокеанскую связь, экспериментируя с радиотелефонией. Речь уже передавалась по радиоволнам, но до того времени не появилось никакого метода, пригодного для передач коммерческого использования. В *Western Electric* была собрана группа инженеров, чтобы изучить возможность использования вакуумной лампы для этой цели.

Дальнейшее исследование беспроводных свойств вакуумного триода открыло возможность его использования в качестве модулятора беспроводных волн и его применения в беспроводной телефонии. В мае 1914 года Бейл, работая над своей теорией усиления аудиона, обнаружил, что не-

линейная вольт-амперная характеристика аудиона может быть применена в новой области радиосвязи. Она может быть использована для модуляции речью высокочастотных непрерывных электромагнитных волн. В своих исследовательских заметках того периода времени Бейл привел несколько схем, с помощью которых это можно осуществить.

После подготовки к экспериментам по беспроводной телефонии необходимое оборудование было установлено на станции связи ВМС в Арлингтоне, штат Вирджиния. Выбор этой станции был связан с тем, что имелась возможность воспользоваться имеющимися там большими и эффективными длинноволновыми антеннами. Всего через год после успешного применения термоэмиссионного триода в проводных телефонных цепях на большие расстояния стало возможным разговаривать по беспроводной связи из Нью-Йорка в Гонолулу — на расстояние 5000 миль (7800 км). Вскоре после этого человеческий разговор был передан из Нью-Йорка в Париж (6000 км).

Первая передача речи без помощи проводов произошла при драматических обстоятельствах. Это было 21 октября 1915 года, Первая мировая война все еще бушевала, поэтому эксперименты проводились тайно. Американские ученые в Париже со своей приемной аппаратурой на Эйфелевой башне впервые в мировой истории услышали голоса своих коллег-ученых в Америке, говорящие с ними через эфир.

В телефонной компании Белла Хендрик ван дер Бейл проработал 7 лет, с 1913 по 1920 год, и за это время сделал много интересных открытий и изобретений, которые оказали большое влияние на развитие беспроводной передачи и телевидения.

Хендрик ван дер Бейл утверждал, что одним из секретов почти невероятного успеха его предприятий является его способность выбирать нужных людей и его готовность позволить им испытать свои крылья, наделяя их властью, всегда соизмеримой с их ответственностью. Если совершаются ошибки, что естественно, то они тоже имеют свою причину и являются ценным опытом, но их нельзя повторять. По его собственному любимому выражению [10, р. 55]: «Только осел дважды ударяется головой об одну и ту же стену» (англ. *Only a donkey bumps its head against the same wall twice*). В 1920 году ван дер Бейл вернулся на родину в Южно-Африканский Союз²² и был назначен техническим и научным советником в министерстве шахт и промышленности. Его промышленная карьера включает в себя длинный список успешного руководства на постах пред-

²² В 1961 году Южно-Африканский Союз стал независимой Южно-Африканской Республикой, которая вышла из Содружества наций, возглавляемого Великобританией. Выход был обусловлен неприятием политики апартеида в ЮАР другими членами Содружества (членство ЮАР в Содружестве было восстановлено в июне 1994 года).

седателя и директора. Следует отметить, что британское правительство консультировалось с ним по предложенному законопроекту о национализации сталелитейной промышленности в Великобритании.



Рис. 21. Три ректора (слева направо): г-н Хофмейр (Университет Витватерсранда), генерал Смэтс (Кейптаунский университет), д-р ван дер Бийл (Университет Претории) [10, p. 117].

Fig. 21. Three chancellors (from left to right): Mr. Hofmeyr (Witwatersrand University), General Smuts (Cape Town University), Dr. van der Bijl (Pretoria University) [10, p. 117]

В 1927 году ван дер Бейл был назначен президентом Южноафриканского института инженеров-электриков (SAIEE), а с 1934 по 1948 год он был ректором Преторийского университета (англ. *University of Pretoria*), рис. 21. Нужно подчеркнуть, что ван дер Бейл очень много сделал для промышленности, науки и образования в Южно-Африканском Союзе. Он является знаковой личностью этой страны и почитается до сего дня.

15. Заключение

Улучшенный механический ретранслятор имел более низкие характеристики относительно ретранслятора вакуумной лампы, что ограничивало его практическое использование. Проблемы механического ретранслятора на линиях большой протяженности лежали в его диафрагме. Они становились все более серьезными с увеличением длины цепей, включая увеличение количества повторителей в тандеме. Более того, даже при самых благоприятных условиях эксплуатации максимальное усиление механического ретранслятора было значительно ниже, чем при использовании устройства на вакуумных лампах. Инерция движущихся частей механического ретранслятора ограничивала применение его частотного диапазона для голосовой телефонии.

Научно-исследовательская работа, проделанная инженерами AT&T и WEC, позволила в течение короткого периода времени превратить примитивный аудион де Фореста в надежный компонент телефонного релейного усилителя, предназначенного для телефонных линий большой дальности. Важнейшими требованиями к лампам ретранслятора были длительный срок службы и постоянство их характеристик. Затраты на производство

были второстепенными. Лампы использовались в мягкой среде телефонных аппаратов и не подвергались сильным ударам, вибрации или экстремальным температурам.

Гарольд Арнольд сделал несколько значительных усовершенствований аудиона, таких как повышение уровня вакуума в стеклянной колбе и разработка более эффективной нити накала. Все это позволило изготовить надежный ламповый ретранслятор для телефонных линий большой дальности. Он разработал конструкцию радиоламп и технологию их изготовления, а также организовал производство радиоламп, которые отвечали требованиям ретрансляторов телефонных линий: надежности, простоте их обслуживания и быстрой замене вышедших из строя ламп.

Через несколько лет после открытия трансконтинентальной линии механические ретрансляторы были вытеснены и заменены устройствами на вакуумных лампах. Это привело к тому, что скоростной ретранслятор на вакуумной лампе стал стандартом.

Благодаря Дж. Карти, который организовал презентацию аудиона, подсказке ученого с академическим образованием, Джона Стоуна, а также экспериментам Гарольда Д. Арнольда, удалось адаптировать изобретение Ли де Фореста и внедрить электронный усилитель в телефонию.

История термоэмиссионной вакуумной лампы, безусловно, является историей удачи, а также удивительным совпадением, поскольку случайная встреча Хендрика ван дер Бейла с профессором Милликеном в Дрездене привела к решению неисследованной научной проблемы и созданию теории электронной лампы.

Значение изобретения трехэлектродной электронной лампы Ли де Форестом, хотя и трудно переоценить, но факт остается фактом, что прогресс в системах беспроводной передачи информации наметился только тогда, когда его устройство попало к сотруднику WEC Гарольду Арнольду, который хорошо был знаком с физическими принципами работы подобного типа устройств. Благодаря этому, Гарольд Арнольд вместе с ван дер Бейлом, Оливером Бакли, Александром Николсоном (*Alexander McLean Nicolson*), Уильямом Уилсоном (*William Wilson*) и другими сотрудниками лаборатории WEC, сумели превратить аудион в коммерческий практический продукт, который стал основным компонентом при разработке безынерционных телефонных ретрансляторов для линий дальней связи.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Ртутные газоразрядные лампы Гарольда Арнольда и их применение // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 81—107.
2. Пестриков В. М. Изобретение электронного лампового усилителя звуковой частоты // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 433—455.

3. Pestrikov Victor M. The invention of a tube audio amplifier // ITM Web of Conferences. Vol 30. 16002 (2019). URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_16001.pdf (01.01.2023).
4. Clark G. H. The Life of John Stone Stone. Lithographed by Frye & Smith, Limited, 1946. 169 p.
5. Forest de Lee. Father of Radio. The Autobiography. 1st edition. Chicago : Wilcox & Follett Co., 1950. 502 p.
6. Stone J. S. The practical aspects of the propagation of high-frequency electric waves along wires // Journal of the Franklin Institute. October, 1912. Vol. 174. No. 4. P. 353—384.
7. Buchwald J. Z., Warwick A. Histories of the Electron : The Birth of Microphysics. Cambridge : MIT Press, 2004. 528 p.
8. Jacobs A. South African heritage. A biography of H. J. van der Bijl. Pietermaritzburg : Shuter & Shooter, 1948. [178] p.
9. Aitken H. G. J. The Continuous Wave : Technology and American Radio, 1900—1932. Princeton : Princeton University Press, 1985. 246 p.
10. Espenschied L. Discussion of “A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology” // Proceedings of the IRE. 1959. No. 7. P. 1253—1268.
11. Shaw T. The conquest of distance by wire telephony // The Bell System Technical Journal. October, 1944. Vol. XXIII, No. 4. P. 337—421.
12. Buckley O. E. An Ionization Manometer // Proceedings of the National Academy of Sciences. December 15, 1916. Vol. 2, no. 12. P. 683—685.
13. Vermeulen D. J. The Remarkable Dr. Hendrik van der Bijl // Proceedings of the IEEE. December 1998. Vol. 86, no. 12. P. 2445—2454.
14. Bijl H. J. van der. Zur bestimmung der erstenergien lichtelektrisch ausgelöster elektronen // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Apr. 1913. S. 330—347.
15. Bijl H. J. van der. A brief sketch of the development of radio telephony // The Transactions of the S. A. Institute of Electrical Engineers. Aug. 1938. Vol 24, no. 8. P. 194—220.
16. Bijl H. J. van der. The theory of the thermionic amplifier // The physical review. Second Series. September, 1918. Vol. 12, no. 3. P. 171—198.
17. Bijl H. J. van der. Theory and operating characteristics of the thermionic amplifier // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. April 1919. Vol. 7, no. 2. P. 97—128.
18. Bijl H. J. van der. The thermionic vacuum tube and its applications. New York and London : McGraw Hill Book Co. Inc., 1920. 391 p.
19. Bijl H. J. van der. Electron-discharge device and method the making the same. Patent US1738269. Patented Dec. 3, 1929. Application filed December 4, 1918.
20. Peri M., Biguet J. Brevet FR492657. Délivré le 29 mars 1919. – Publié le 16 juillet 1919. Demandé le 23 octobre 1915, à 16h 5m, à Lyon.

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.

Lee de Forest's sale of audion rights to AT&T and its importance for the development of radio technics

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: March 11, 2023

Peer-reviewed: March 30, 2023

Accepted: May 20, 2023

Abstract: The preparation and holding of the presentation of Lee de Forest's audion, which contributed to the sale of his patent rights to AT&T, is considered. The role of J. Carty and John S. Stone in the presentation was noted. Harold D. Arnold's experiments with the audion and Hendrik van der Bijl's audion theory set the stage for industrial production of vacuum triodes for telephone repeaters. It is shown that the industrial production of a thermionic three-electrode vacuum tube has made it possible to develop innovative commercial telephone repeaters and achieve progress in long-distance telephony.

Keywords: Lee de Forest, three-electrode audion, J. Carty, John S. Stone, AT&T, WEC, Harold D. Arnold, Hendrik van der Bijl, audion theory.

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Lee de Forest's sale of audion rights to AT&T and its importance for the development of radio technics," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 211–249, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.18. (In Russ.).

References

- [1] V. M. Pestrikov, "Mercury discharge lamps of Harold Arnold and their application," *Infocommunication and radio technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 81–107, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.08. (In Russ.).
- [2] V. M. Pestrikov, "Invention of an electronic tube audio frequency amplifier," *Infocommunication and radio technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 433–455, 2020. (In Russ.).
- [3] Victor M. Pestrikov, "The invention of a tube audio amplifier," *ITM Web of Conferences*, vol 30, 16001, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193016001> (01.01.2023).
- [4] G. H. Clark, *The Life of John Stone Stone*. Lithographed by Frye & Smith, Limited, 1946.
- [5] Forest de Lee, *Father of Radio. The Autobiography*. 1st edition. Chicago : Wilcox & Follett Co., 1950.
- [6] J. S. Stone, "The practical aspects of the propagation of high-frequency electric waves along wires," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 174, no. 4, pp. 353–384, Oct. 1912, doi: [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(12\)90871-6](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(12)90871-6).

- [7] J. Z. Buchwald and A. Warwick, *Histories of the Electron : The Birth of Microphysics*, Cambridge : MIT Press, 2004.
- [8] A. Jacobs, *South African heritage. A biography of H. J. van der Bijl*. Pietermaritzburg : Shuter & Shooter, 1948.
- [9] H. G. J. Aitken, *The Continuous Wave : Technology and American Radio, 1900—1932*. Princeton : Princeton University Press, 1985.
- [10] "Discussion of 'A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology,'" *Proceedings of the IRE*, vol. 47, no. 7, pp. 1253–1268, 1959, doi: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1959.287360>.
- [11] T. Shaw, "The conquest of distance by wire telephony," *The Bell System Technical Journal*, vol. XXIII, no. 4. pp. 337–421, October 1944.
- [12] O. E. Buckley, "An Ionization Manometer," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 2, no. 12, pp. 683–685, Dec. 1916, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2.12.683>.
- [13] D. J. Vermeulen, "The remarkable Dr. Hendrik van der Bijl," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 12, pp. 2445–2454, 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/5.735450>.
- [14] H. J. van der Bijl, "Zur bestimmung der erstenergien lichtelektrisch ausgelöster elektronen," *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, pp. 330–347, Apr. 1913.
- [15] H. J. van der Bijl, "A brief sketch of the development of radio telephony," *The Transactions of the S. A. Institute of Electrical Engineers*, vol 24, no. 8, pp. 194–220, Aug. 1938.
- [16] H. J. van der Bijl, "Theory of the Thermionic Amplifier," *Physical Review*, vol. 12, no. 3, pp. 171–198, Sep. 1918, doi: <https://doi.org/10.1103/physrev.12.171>.
- [17] H. J. van der Bijl, "Theory and Operating Characteristics of the Thermionic Amplifier," *Proceedings of the IRE*, vol. 7, no. 2, pp. 97–128, Apr. 1919, doi: <https://doi.org/10.1109/jrproc.1919.217425>.
- [18] H. J. van der Bijl, *The thermionic vacuum tube and its applications*. New York and London : McGraw Hill Book Co. Inc., 1920.
- [19] H. J. van der Bijl, Electron-discharge device and method the making the same. Patent US1738269. Patented Dec. 3, 1929. Application filed December 4, 1918.
- [20] M. Peri and J. Biguet, Brevet FR492657. Délivré le 29 mars 1919. – Publié le 16 juillet 1919. Demandé le 23 octobre 1915, à 16h 5m, à Lyon.

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.

УДК 621.396(091)

Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 4

Кондратова Е. В., Коломийченко В. П.

*Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова
ул. Дыбенко, д. 1а, Севастополь, Российская Федерация, 299028
elenakondratovaa@mail.ru, v.p.kolomiychenko@mail.ru*

Получено: 4 марта 2023 г.

Отрецензировано: 24 марта 2023 г.

Принято к публикации: 24 марта 2023 г.

Аннотация: *Статья представляет собой фрагменты интервью, взятого у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE в Горжье, Швейцария, 13 июля 2017 г. Из 14 разделов интервью в статье представлены следующие два: Будущие разработки в области акустических волновых технологий и Друзья и награды. В статье устранены библиографические несоответствия. Цель публикации — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.*

Ключевые слова: *Центр истории IEEE в Горжье, будущие разработки, акустические волновые технологии.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 4 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 2. С. 250—259.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Кондратова, Е. В. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 4 / Е. В. Кондратова, В. П. Коломийченко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 250—259.

1. Введение

Концепт устной истории был популяризирован в США в 1940-е годы в связи с деятельностью американского журналиста Джо Гулда (Joseph Ferdinand Gould; 1889—1957), заявлявшего о своей работе над огромной книгой «Устная история нашего времени», полностью составленной из записи рассказов разных людей. В 1948 году центр устной истории был открыт при Колумбийском университете. В 1967 году была создана Ассо-

цияция устной истории США, двумя годами позже аналогичная организация появилась в Великобритании.

Не остался в стороне от этого тренда и IEEE — к настоящему времени американским Институтом инженеров электротехники и электроники собрано более 804 персональных устных истории. Подавляющее большинство персоналий в этом собрании — известные американские и «западные» специалисты. И, тем не менее, весьма значимым является то, что в этом списке появился известный российский ученый, академик Ю. В. Гуляев.

Интервью у российского академика для Центра истории IEEE взяли Виктор Плесски (Victor Plessky) и Клеменс Руппель (Clemens Ruppel) в Горжье, Швейцария (Gorgier, Switzerland) 13 июля 2017 г. (интервью № 784).¹

Это событие нашло некоторое отражение только в небольшом интервью на портале «Правда.Ру».²

Интервью состоит из 14 разделов:

- [Детство, семья];
- Образование;
- Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича;
- Советский Союз после Сталина;
- Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.;
- Заведующий лабораторией во Фрязино;
- Волны Блюстейна — Гуляева;
- Другие типы акустических волн;
- Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе;
- Будущие разработки в области акустических волновых технологий;
- Друзья и награды;
- Саратовский институт;
- Углеродные нанотрубки;
- Исследования в области медицины.

Ранее [1], [2], [3] были опубликованы фрагменты интервью, в которых были отражены такие разделы, как «Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.» и «Волны Блюстейна — Гуляева», «Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича», «Советский Союз после Сталина», «Другие типы акустических волн» и «Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе». В настоящей статье представлены еще два раздела швейцарского интервью: «Будущие разработки в области акустических волновых технологий» и «Друзья и награды» Цель настоящей статьи — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

¹ http://ethw.org/Oral-History:Yury_Gulyaev (дата обращения 13.07.2018).

² <https://www.pravda.ru/science/02-08-2017/1343721-gulyaev-0/> (дата обращения 13.07.2018).

2. Будущие разработки в области акустических волновых технологий

Ruppel:

Чего вы ожидаете от будущего развития технологии ПАВ?

Гуляев:

Какое будущее я вижу для акустоэлектронных устройств (в частности для устройств SAW)? Я укажу на несколько направлений, которые уже видны:

1. В первую очередь — это будут SAW-RFID-метки; после доработок (повышение чувствительности приема, решения проблем «наезда» и т. д.) их можно будет широко использовать везде — от промышленных товаров до самолетов, ракет, оружия, поездов, автомобилей и т. п. — вплоть до идентификации личности.

2. Использование в акустоэлектронных устройствах объемных акустических волн очень высокой частоты (более 3 ГГц), где ПАВ Рэлея имеет большие потери в поверхностном слое из-за полирующей обработки. Эти фильтры будут использоваться в часах, телекоммуникациях, сотовых телефонах, системах навигации (типа GPS), технике измерений и управления, ракетно-космической технике и т. д. Альтернатива существующим подходам — использование волн Блюстейна — Гуляева или «квази-BGW», которые проникают в твердое тело гораздо глубже и поэтому обработка поверхности менее вредна.

3. Разработка датчиков на ПАВ. Сегодня они уже используются для идентификации газов, паров и жидкостей. Усовершенствования конструкций с использованием различных новых типов режимов ПАВ, ОАВ (BAW) и пластин (см. например [4]) позволят использовать эти датчики для обнаружения ядов и наркотиков.

4. Четвертое направление, на мой взгляд, может быть связано с взаимодействием SAW и BAW со свободными электронами в пьезоэлектрических полупроводниках и слоистых структурах пьезоэлектрик — полупроводник. Я мог бы упомянуть как минимум 5 таких устройств:

— Уже упоминавшееся усиление ПАВ при сверхзвуковом дрейфе электронов в слоистых структурах пьезоэлектрик — полупроводник типа TWT (ЛБВ) [5]. Этот усилитель имеет преимущество по сравнению с транзисторным усилителем — его вход и выход электрически полностью изолированы друг от друга.

— Так называемый «акусто-инжекционный транзистор» [6], в котором усиление сигнала связано с модуляцией проводимости между коллекторными электродами за счет группирования электронов акустической волной.

— Устройства зарядовой связи (ПЗС), связанные с переносом заряда акустической волной.

— Конвольверы (свертки) и корреляторы на основе поперечного акустоэлектрического эффекта ПАВ [7, 8]. Из-за их гораздо более высокой эффективности по сравнению с конвольверами (свертками) на пьезоэлектриках можно надеяться на их широкое применение для распознавания образов и другой обработки информации.

— Еще одним применением поперечного акустоэлектрического эффекта является устройство для считывания изображений с помощью короткого акустического импульса, распространяющегося в слоистой структуре пьезоэлектрофоточувствительного полупроводника. Этот импульс создает локальный поперечный акустоэлектрический эффект [7] в соответствии с локальной проводимостью. Это твердотельный аналог известного «видикона», где считывание токопроводящих профилей осуществляется электронным лучом в вакууме.

3. Друзья и награды

Ruppel:

А как насчет друзей и наград?

Гуляев:

Более подробную историю развития акустоэлектроники в мире в 60—70-е годы смотрите в нашей обзорной статье с моим другом и коллегой выдающимся ученым и инженером Фредом С. Хикернеллом, который, к сожалению, скончался несколько лет назад.

В целом я должен сказать, что по моему опыту научной работы все коллеги, с которыми я работал (включая, конечно моих учеников) обычно становятся моими довольно близкими друзьями, отчасти потому, что я никогда не завидовал успехам своих коллег и всегда радовался, когда у моих учеников и друзей были какие-то хорошие достижения. Может быть это связано с главным жизненным принципом моего отца — «Не будь подлецом и работай усердно» — который он перенял от крестьян родного села Гуляево и привил мне в детстве. Мне повезло: в каждой области науки, где я работал, у меня всегда были хорошие друзья-коллеги. Их так много, что я не могу назвать здесь все имена. Могу только назвать (в произвольном порядке) нескольких ученых старого поколения, которые были основоположниками акустоэлектроники, таких как Владислав Пустовойт, Вадим Гуревич, Игорь Яковкин, Игорь Викторов, Сергей Богданов, Виталий Лямов, Сергей Каринский, Владимир Шевчик, Николай Синицын, Юрий Зюрюкин, Эдгар Семенов, Питер Зильберман, Эрик Эпштейн, Анатолий Морозов, Валерий

Проклов, Георгий Мансфельд, Сергей Иванов, Владимир Анисимкин, Анатолий Кмита, Александр Медведь, Александр Багдасарян (СССР), Dick White, Cal Quate, John Shaw, Gerry Farnell, Bert Auld, Gordon Kino, Ken Lakin, Don White, Henry Spector, Art Oliner, Pankaj Das, Wen Wang, Clinton Hartmann (USA), Eric Ash, Ted Paige, Jeff Collins, Richard De La Rue (Great Britain), Pierre Tournois, Charles Maerfeld, Eugene Dieulesaint, Philippe Nosier, Gerard Quentin (France), Nobuo Mikoshiba, Kasuo Ioshida, Jun-Ichi Nishizawa, Tetsuo Sasaki, Kimio Shiosaki, Sumio Hamakawa (Japan), Kjell Ingbritsen, Helge Engan (Norway), Clemens Ruppel (Germany), etc. Многие из них, к сожалению, уже ушли из жизни... Я также могу назвать своих непосредственных учеников, которые внесли большой вклад в разработку акустоэлектроники, таких как (в произвольном порядке) Александр Бугаев, Геннадий Шкердин, Виктор Плесский, Сергей Никитов, Иосиф Котелянский, Александр Козорезов, Наталья Ползикова и более молодые коллеги, такие как Виктор Орлов, Сергей Алексеев, Наталья Науменко, Ирен Кузнецова и др.

В других областях науки, в которых я работал, у меня также есть много друзей-коллег, таких как Николай Сеницын, мой соавтор в открытии сильной электронной эмиссии из углеродных нанотрубок, или Петр Зильберман, мой соавтор в области магнитоэлектроники и спинтроники, или Владимир Черепенин, с которым я сейчас работаю, исследуя влияние сильных импульсных электрических полей на различные среды. Владимир Черепенин и Юрий Масленников также являются моими близкими коллегами по исследованиям в области биомедицинской радиоэлектроники.

За мою долгую жизнь в науке (около 60 лет!) У меня было более 80 аспирантов, большинство из которых получили докторскую степень и около 25 из них стали докторами наук и профессорами физики. Я считаю это одним из своих главных достижений в науке.

В 1979 году пять европейских ученых Э. Эш, Дж. Коллинз, Ю. Гуляев, К. Ингебригтсен и Э. Пейдж были награждены престижной премией Европейского физического общества за разработку физических основ устройств на поверхностных акустических волнах.

В 2006 году я получил премию IEEE Рэлея за свои работы по физике и технологии устройств на ПАВ для обработки информации. За свои работы в области акустоэлектроники я был удостоен Государственной премии СССР (дважды в 1974 и 1984 гг.) и России (также дважды в 1993 и 2006 гг.).

Plessky:

Каким еще направлениям исследований вы следовали?

Гуляев:

Еще одним интересом в то время была так называемая спин-волновая электроника. Дело в том, что система атомных спинов в магне-

тиках в каком-то смысле «легче», чем система самих атомов, поэтому спин-волновые устройства должны работать на более высоких частотах, чем их акусто-волновые аналоги, основанные на движении тяжелых атомов. В 1965 г. я предсказал существование так называемых «вторых спиновых волн» в ферромагнетиках [9] (аналог «второго звука» в жидком гелии, предсказанный Л. Д. Ландау) — волн спин-волновой плотности. Мною была разработана гидродинамическая теория этих волн, которая впоследствии была подтверждена в работах физиков уральской школы.

В дальнейшем совместно с П. Е. Зильберманом, Э. М. Эпштейном, В. П. Плесским, С. А. Никитовым и нашими сотрудниками была разработана кинетическая теория спин-волнового взаимодействия со свободными электронами в ферритах, слоистых структурах феррит — полупроводник и в периодических структурах на поверхности ферромагнетиков. На этой основе могут быть разработаны высокочастотные (и с высокой добротностью) фильтры и линии задержки на СВЧ. Нами были проведены широкие исследования^{3,4,5} явлений, связанных со спин-ориентированными токами (это направление называется «спинтроника») и экспериментально наблюдалось терагерцовое электромагнитное излучение за счет спиновой инжекции в ферромагнетиках^{6,7}.

Совместно с В. П. Плесским и С. А. Никитовым мы ввели новый тип метаматериалов — «магнонные кристаллы» — периодическую среду с периодом, равным длине спиновой волны (аналог известных «фотонных» и «фононных» кристаллов). Сейчас эти магнитные метаматериалы широко исследуются как новые материалы для обработки информации.

Третьим направлением моей научной деятельности с 1980 года была вакуумная микроэлектроника, основанная на явлении эмиссии «холодных» электронов в вакуум из микроигл, изготовленных из молибдена и других материалов. Эти работы проводились в Саратовском отделении нашего института, которое я организовал в 1977—1979 гг. по предложению академика Н. Н. Гусева, химика по образованию. Для создания отделения ИРЭ в Саратове были объективные причины, так как здесь находил-

³ Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilbermann, R&E, 23, 898, 1978 (настоящая и последующие сноски представлены в соответствии с оригиналом http://ethw.org/Oral-History:Yury_Gulyaev).

⁴ R.J. Elliott, E.M. Epstein, Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilbermann, J. of Magnetism and Magnetization, 271, 83, 2004.

⁵ Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilbermann, A.I. Panas, E.M. Epstein, UFN (Soviet Physics - Uspekhi), 179, 359, 2009.

⁶ Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilbermann, I.V. Malikov, F.M. Mikhailov, A.I. Panas, S.G. Chigarev, E.M. Epstein, JETP Lett, 93, 289, 2011.

⁷ Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilbermann, I.V. Malikov, F.M. Mikhailov, S.G. Chigarev, E.M. Epstein, R&E, 57, 372, 2012.

ся исторически превосходный классический университет с сильным радиоэлектронным факультетом и многими крупными промышленными предприятиями в области СВЧ-электроники, некоторые из которых были перенесены из Москвы и Ленинграда во время Второй мировой войны. Война. Действительно, Саратов был интеллектуальным центром Нижнего Поволжья. В 1977 г. в Саратов приехала представительная делегация АН СССР во главе с вице-президентом Академии, директором нашего института академиком В. А. Котельниковым, в результате чего Президиум АН СССР принял решение о создании Саратовского научного центра АН СССР, состоящего из нескольких институтов различных научных направлений — точной механики, биологии, сельского хозяйства и радиоэлектроники. Организация Центра была поручена мне, так как я уже с начала 60-х тесно сотрудничал с учеными Саратовского университета в области акустоэлектроники и СВЧ-акустики.

4. Заключение

Интервью, взятое у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE — свидетельство мирового признания его научных достижений. Не рассмотренные в настоящем докладе фрагменты интервью представляют интерес для дальнейшего ознакомления профильного русскоязычного сообщества с основными его положениями.

Список литературы

1. Ермолов П. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 1. В кн.: 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 1827—1834.
2. Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Свиридова Е. И. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 257—263.
3. Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 257—263.
4. Multichannel acoustic tool for sensing in liquid microdroplets / I. Anisimkin, V. I. Anisimkin, Yu. Gulyaev, A. Cimmino, E. Verona. In : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. Vol. 1.
5. Гуляев Ю. В., Пустовойт В. И. Усиление поверхностных волн в полупроводниках // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1964. Т. 47, № 6. С. 2251—2253.
6. Gulyaev Yu. V., Mansfield G. D., Orlova G. A. Acoustoinjection transistor-a new type of electrically controlled transducer // Electronics Letters. 1981. Vol. 17, no. 12. P. 396.
7. К теории электронного поглощения и усиления поверхностных звуковых волн в пьезокристаллах / Ю. В. Гуляев и др. // Физика твердого тела. 1970. Т. 12, № 9. С. 2595—2601.

8. Кмита А. М., Медведь А. В. Поперечный акусто-электрический эффект в слоистой структуре LiNbO_3 — Si // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14, № 8. С. 455—458.
9. Гуляев Ю. В. О возможности «вторых» спиновых волн в ферромагнетиках // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2, № 1. С. 3—6.

Информация об авторах

Кондратова Елена Васильевна, доцент кафедры физики и общетехнических дисциплин Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

Коломийченко Виктория Павловна, старший преподаватель кафедры физики и общетехнических дисциплин Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 4

Ye. V. Kondratova¹ and V. P. Kolomiychenko

*Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov
1a, Dybenko Str., Sevastopol, Russian Federation, 299028
elenakondratovaa@mail.ru, v.p.kolomiychenko@mail.ru*

Received: March 4, 2023

Peer-reviewed: March 24, 2023

Accepted: March 24, 2023

Abstract: The article is a fragment of an interview taken by Academician Yu. V. Gulyaev by the IEEE History Center in Gorgier, Switzerland, July 13, 2017. Of the 14 interview sections, the article presents the following two: Future developments in the field of acoustic wave technology and Friends and awards. The article eliminated bibliographic inconsistencies. The purpose of the report is to familiarize in this part of the profile Russian-speaking community with the main provisions of the interview.

Keywords: Center for IEEE History in Gorgier, types of acoustic waves, SAW devices fabrication, Soviet Union.

For citation (IEEE): Ye. V. Kondratova¹ and V. P. Kolomiychenko, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 4,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 250–259, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.19. (In Russ.).

References

- [1] P. P. Yermolov, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 1,” in *28th International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, Sevastopol, 2018, pp. 1827–1834. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. I. Sviridova, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 257–263, 2019. (In Russ.).
- [3] Ye. V. Kondratova and V. P. Kolomiychenko, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 3,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 108–114, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.09. (In Russ.).
- [4] I. Anisimkin, V. I. Anisimkin, Yu. Gulyaev, A. Cimmino, and E. Verona, “Multichannel acoustic tool for sensing in liquid microdroplets,” in : *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 1, 2000, doi: 10.1109/ULTSYM.2000.922646.
- [5] Yu. V. Gulyaev and V. I. Pustovoi, “Amplification of surface waves in semiconductors,” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. vol. 47, no. 6. pp. 2251–2253, 1964. (In Russ.).
- [6] Yu. V. Gulyaev, G. D. Mansfeld, and G. A. Orlova, “Acoustoinjection transistor-a new type of electrically controlled transducer,” *Electronics Letters*, vol. 17, no. 12, p. 396, 1981, doi: <https://doi.org/10.1049/el:19810275>.

- [7] Yu. V. Gulyaev, A. Yu. Karabanov, A. M. Kmita, A. V. Medved, and Sh. S. Tursunov, "On the theory of electronic absorption and amplification of surface sound waves in piezo-crystals," *FTT*, 1970, vol. 12, no. 9, pp. 2595–2601.
- [8] A. M. Kmita and A. V. Medved', "Transverse Acoustoelectric Effect in a Layered LiNbO_3 -Si Structure," *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 14, pp. 310, 1971.
- [9] Yu. V. Gulyaev, "Possible Existence of 'Second' Spin Waves in Ferromagnets," *JETP Letters*, 1965, Vol 2, no. 1, pp. 1–2.

Information about the authors

Yelena V. Kondratova, Associate Professor at the Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

Viktoriya P. Kolomiychenko, Senior Lecturer, Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.396(091)

Роль радиолюбителей в исследованиях космоса и судьба крымских центров дальней космической связи

Пузанков Л. А.

*Российский телеграфный клуб
Симферополь, Крым, Российская Федерация
r7ka@mail.ru*

Получено: 25 марта 2023 г.

Отрецензировано: 31 марта 2023 г.

Принято к публикации: 31 марта 2023 г.

Аннотация: В статье отмечается уникальная идея отечественных ученых подключить к исследованию космоса после запуска в нашей стране первого искусственного спутника Земли большого отряда радиолюбителей. Радиолюбители Крыма с высокой ответственностью подошли к выполнению поставленных учебными задач. С началом эры освоения космоса в разных местах территории СССР были организованы наземные измерительные пункты (НИПы). В статье кратко излагаются история двух таких пунктов, размещенных в Крыму, а также планы по их модернизации.

Ключевые слова: исследование космоса, первый искусственный спутник Земли, наземные измерительные пункты.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пузанков Л. А. Роль радиолюбителей в исследованиях космоса и судьба крымских центров дальней космической связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 2. С. 260—273.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пузанков, Л. А. Роль радиолюбителей в исследованиях космоса и судьба крымских центров дальней космической связи / Л. А. Пузанков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 260—273.

1. Введение

В октябре 2022 года исполнилось 65 лет со дня запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ). В 1957 году еще никто не мог предполагать, что начало космической эры откроет новые просторы для радио-

любительского творчества. Буквально с первых минут запуска спутника радиолюбители оказались причастными к этому эпохальному событию и в дальнейшем освоили космические технологии [1]. 1957 год в мире был объявлен Международным геофизическим годом, в программу которого входили и запуски ИСЗ. Стало известно, что такие ИСЗ будут запущены в Советском Союзе и Соединенных Штатах Америки. Радионаблюдения за сигналами этих спутников позволили получить новые данные о строении ионосферы, уточнить размер, форму и положение орбиты спутника, а также получить сведения о процессах, происходящих на спутнике во время полета. Наряду с профессиональными радиослужбами в радионаблюдениях за спутником должны были участвовать и радиолюбители. Благодаря тому, что радиолюбительские наблюдения носили массовый характер, они обеспечили весьма важные данные о полете спутника и состоянии ионосферы. Дату запуска спутника держали в тайне, но рабочие частоты бортового передатчика советского ИСЗ (40,002 и 20,005 МГц) были объявлены заранее¹. Представлялось совершенно очевидным, что требовалось как можно больше пунктов наблюдения. И тогда решили привлечь к эксперименту по приему сигналов со спутника радиолюбителей. С июня 1957 года в журнале «Радио» началась публикация ряда статей по организации работы по радионаблюдениям за передатчиками ИСЗ [2, 3].

В статье также кратко рассмотрена история Центра дальней космической связи в Школьном и наземного измерительного пункта в Евпатории, а также планы по их модернизации.

2. Запуск первого ИСЗ

Первый в мире искусственный спутник Земли, советский космический аппарат «Спутник-1», был запущен на орбиту 4 октября 1957 года. Кодовое обозначение спутника — «ПС-1» («Простейший Спутник-1»). Запуск был осуществлён с 5-го научно-исследовательского полигона Министерства обороны СССР «Тюра-Там», получившего впоследствии открытое наименование космодром «Байконур», на ракете-носителе «Спутник», созданной на базе межконтинентальной баллистической ракеты «Р-7». В пятницу, 4 октября, в 22:28:34 по московскому времени (19:28:34 по Гринвичу) был совершён успешный запуск. Через 295 секунд после старта ПС-1 и центральный блок (II ступень) ракеты весом 7,5 тонны были выведены на эллиптическую орбиту высотой в апогее 947 км, в перигее 288 км. При этом апогей находился в южном, а перигей — в северном небесном полушарии.

¹ Передатчик на спутнике США, запуск которого состоялся 1 февраля 1958 года, будет работать на частоте 108 МГц.

Через 314,5 секунды после старта произошел сброс защитного конуса и отделение спутника от II ступени ракеты-носителя, и он подал свой сигнал. «Бип! Бип! Бип!» — так звучали его позывные. На полигоне их принимали 2 минуты, потом спутник ушёл за горизонт. Люди на космодроме выбежали на улицу, кричали «Ура!», качали конструкторов и военных. И ещё на первом витке прозвучало сообщение ТАСС: «В результате большой напряжённой работы научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро создан первый в мире искусственный спутник Земли». Над созданием искусственного спутника Земли во главе с основоположником практической космонавтики С. П. Королёвым работали М. В. Келдыш, М. К. Тихонравов, М. С. Рязанский, О. Г. Ивановский, Н. С. Лидоренко, Г. Ю. Максимов, В. И. Лаппо, К. И. Грингауз, Б. С. Чекунов, А. В. Бухтияров и многие другие.

Дата запуска «Спутника-1» является началом космической эры человечества и в России ежегодно отмечается как памятный день Космических войск. Эра Космических войск и летопись космонавтики начинается с создания Командно-измерительного комплекса управления космическими аппаратами (в настоящее время — Главный испытательный центр испытаний и управления космическими средствами — ГИЦИУ КС им. Г. С. Титова).

3. Центра дальней космической связи. Школьное

Важную роль в контроле за первым ИСЗ сыграл специальный объект в Крыму — Центр дальней космической связи в Школьном [4]. Среди крымских холмов, недалеко от балки Джабанак, находится бывший военный городок Школьный. П. г. т. Школьное расположился недалеко от столицы Крыма на трассе Симферополь — Евпатория. До 90-х годов прошлого столетия там жили и работали высококлассные специалисты дальней космической связи. Основан посёлок был в 1957 году. Вместе с возведением комплекса зданий и сооружений космической связи строились жилые дома, детский сад, магазин, школа, котельная. Гарнизон относился к военно-космическим силам СССР и на его территории размещалось несколько воинских частей. Посёлок считался элитным объектом и имел кодовое название «Симферополь-28». 4 октября 1957 года именно отсюда был произведен первый сеанс связи с первым искусственным спутником Земли. С тех пор 4 октября считается и днем посёлка Школьное.

Советский Союз имел полтора десятка подобных посёлков, которые являлись составными частями командно-измерительного комплекса дальней космической связи страны. Управляющий комплексом центр находился в подмосковном Голицыно. Основная функция измерительного ком-

плекса — с помощью приемо-передающих устройств принимать информацию и управлять работой космических аппаратов, выведенных на орбиту. Каждая из станций наземной космической связи имела свои цели и задачи, но главными из них было получение информации с космических объектов.

Наземный измерительный пункт в поселке Школьное был достаточно плотно загружен работой. Отсюда осуществлялось управление полетами всех советских космических аппаратов. Особо нужно отметить роль гарнизона поселка Школьное в реализации программы «Луна» и «Луноход». Специалистами научно-исследовательского пункта в Школьном (НИП-10) было принято первое изображение поверхности Луны, переданное космическим аппаратом «Луна-9». На территории поселка был оборудован лунодром, на котором испытывались шасси «Лунохода» и проходили обучение их экипажи.

Сложность обучения состояла в том, что на роль операторов луноходов требовались специалисты, которые не обладали никакими навыками управления транспортными средствами. Это требование было связано с тем, что случайная ошибка оператора, связанная с ранее приобретенным динамическим стереотипом управления, могла закончиться катастрофой для лунохода. На лунодром доставили макет лунохода. Операторы отрабатывали на нем навыки управления аппаратом при движении по пересеченной местности. Центр управления луноходами также располагался в Школьном.

Позднее специалисты объекта управляли полетами космических аппаратов серии «Марс» и «Венера». Операторы наземного пункта космической связи Школьного приняли первые изображения поверхности Венеры, направленные с космического аппарата «Венера-13».

Именно в этом поселке находился Центр управления полетами (ЦУП) пилотируемых станций и космических кораблей, включая «Союз — Аполлон».

Успешная и эффективная работа специалистов гарнизона Школьного была отмечена наградой — Красным Знаменем Ракетных войск СССР.

Наземный измерительный пункт посещали многие руководители Правительства Советского Союза, выдающиеся ученые, конструкторы и промышленники, а также летчики космонавты. Так, 11 августа 1962 года Центр управления полетами посетил председатель Совета Министров страны Н. С. Хрущев, где он провел сеанс радиотелефонной связи с космонавтами П. Поповичем и А. Николаевым, которые находились на борту космических кораблей «Восток-4» и «Восток-3».

Военнослужащие гарнизона также участвовали в реализации программы по космическому кораблю многоразового использования «Буран».

К сожалению после распада СССР никому не потребовался наземный измерительный пункт объекта. Большая часть военных уехала в Россию. В 1991 году сначала демонтировали часть аппаратуры. Потом под видом проведения консервации оставшееся оборудование уничтожалось или сдавалось в металлолом. После того как в поселке не стало ни газа, ни электричества, ни тепла, ни телефонной связи, начался массовый исход жителей из Школьного. Стоимость жилья резко снизилась. Те из отставников, кто не успел после ухода из армии получить квартиры в Симферополе, остались в поселке. В результате сегодня 70 % населения поселка являются людьми, не связанными со службой на объекте и купившие здесь жилье за небольшие деньги. Школьный стал не нужен никому — ни военным, ни правительству. Бывший процветающий городок впал в нищету. Теперь о славном прошлом напоминает только огромная тарелка приемо-передающей антенны радиотелескопа ТНА-400 (рис. 1). Судьба этого оставшегося имущества станции дальней космической связи была неизвестна. В 2014 году после возвращения Крыма в состав Российской Федерации в Таврическом национальном университете Крыма побывал глава Роскосмоса, который заявил, что антенна ТНА-400 будет восстановлена и приведена в рабочее состояние. Пока каких-то работ на антенне не замечено.

Сейчас жизнь в поселке постепенно восстанавливается. Жилой фонд и объекты инфраструктуры требуют капитального ремонта, но денег на это ни у граждан, ни у местной власти нет. Но люди надеются на лучшее будущее. После прихода «Крымской весны» надежды жителей п.г.т. Школьное стали постепенно реализовываться.

Гарнизон Школьного — это одна из страниц истории нашей великой страны и наша задача сохранить память о былых заслугах объекта.

4. Центр дальней космической связи. Евпатория

Кроме центра космической связи в Школьном в Крыму был построен еще один научно-исследовательский пункт (НИП-16) в Евпатории².

Это был национальный центр испытания космических средств, который осуществлял управление космическими аппаратами по национальным и международным космическим программам.

В декабре 1959 года по предложению академиков Сергея Павловича Королёва и Мстислава Всеволодовича Келдыша правительство страны приняло решение о создании в Евпатории Центра дальней космической

² 40-й отдельный командно-измерительный комплекс // Википедия. [2023].

Дата обновления: 25.02.2023. URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=1394600&oldid=128738704> (дата обращения: 20.03.2023).

связи. И в июне 1960 года в приморском равнинном районе Крыма неподалеку от Евпатории был построен и сформирован радиотехнический центр дальней связи с космическими объектами.

Техническую основу комплекса сооружений составлял космический радиотехнический комплекс «Плутон», оснащенный уникальными антеннами АДУ-1000, которые на тот момент не имели мировых аналогов. Антенна радиотелескопа АДУ-1000 представляет собой восемь 16-ти метровых (в диаметре) антенн вместо одной большого диаметра, что позволило упростить конструкцию привода. Для установки антенны от строителей требовалось с высочайшей точностью возвести фундамент и пилон, на который устанавливалась собственно антенна.

В состав объекта НИП-16 входили две площадки: первая — в районе села Витино (приемная), вторая (передающая) — в районе поселка Заозёрное. Расстояние между площадками составляло 10 км, чтобы не было помех от передатчика на приемные антенны.

27 сентября 1960 года ЦДКС госкомиссией был принят в эксплуатацию, а 2 февраля 1961 года приступил к управлению полетом первой в мире автоматической межпланетной станции «Венера-1».

Кроме антенн АДУ-1000 научно-измерительный пункт НИП-16 имел также:

- радиотелескоп КТНА-200,
- радиотелескоп ТНА-400,
- телескоп АЗТ-8,
- лазерный дальномер АЗТ-28,
- радиотелескоп П-400П (РТ-32).

После ввода в эксплуатацию НИП-16 был запущен целый ряд космических аппаратов серий «Венера», «Эхо», «Марс», с помощью которых отрабатывались важные вопросы динамики полетов и посадки на планеты Солнечной системы, изучения атмосферы планет, передачи информации.

В 1970-х годах на третьей площадке ЦДКС (с. Молочное) был построен уникальный радиотелескоп РТ-70, который до сегодняшнего дня является одним из лучших по техническим характеристикам (рис. 3). Радиотелескоп РТ-70 (П-2500) имеет диаметр зеркала 70 метров, другое название телескопа — П-2500 (площадь антенны составляет 2500 кв. метров) — один из самых больших полно-поворотных радиотелескопов в мире. Второй РТ-70 в Российской Федерации расположен в поселке Галёнки Приморского края. Из зарубежных аналогов отмечается подобный радиотелескоп в Соединенных Штатах Америки (Голдстоунский в Калифорнии).

Мощность передатчика для РТ-70 — 200 кВт в непрерывном режиме (выходной каскад на клистронах), частота излучения 5010 МГц. РТ-70

обеспечивает радиосвязь до 10 миллиардов километров. Максимальная высота антенны от земли около 87 метров.

В 70-е годы автор статьи побывал на объектах третьей площадки ЦДКС и даже выходил в чашу антенны телескопа и получил незабываемое впечатление.

До 1980 года в НИП-16 также функционировал центр управления космическими полетами (ЦУП) — пилотируемыми космическими кораблями «Союз» (41 корабль), орбитальными станциями «Салют» (6 станций), 14 грузовыми кораблями «Прогресс».

После распада СССР НИП-16, как и весь Крым, оказался в составе Украины. В 1996 году в Евпатории на базе ЦДКС был создан национальный центр управления и испытания космических средств. Фактически из военного объекта Центр превратился в гражданскую обсерваторию под эгидой Академии наук Украины.

В мае—июле 1999 года, августе—сентябре 2001 года, июле 2003 года и октябре 2008 года при помощи РТ-70 были отправлены послания внеземным цивилизациям. Радиопослания ушли в направлении созвездий «Девы», «Большой Медведицы», «Стрелы» и «Лебедя». До ближайшего созвездия сигнал будет идти 73 года!

В течение 10 лет (1998—2008) на объекте проводились эксперименты с РТ-70. В 2011 году планировалось осуществить управление космическим аппаратом «Фобос-грунт» («Фобос» — спутник Марса). Проект не был реализован.

В ноябре 2013 года для покрытия задолженности Центра была демонтирована и сдана в металлолом уникальная антенна дальней связи АДУ-1000 на площадке № 2 (п. Заозёрное).

После возвращения Крыма в «родную гавань» над Центром были подняты флаг России и флаг войск военно-космической обороны Российской Федерации. В штабе войск ВКО заявили, что практически сразу приступили к оснащению объекта новыми командно-измерительными системами управления космическими аппаратами и комплексами системы контроля космического пространства.

В настоящее время Центр проходит модернизацию, он стал частью российской системы «ГЛОНАСС». В перспективе ЦДКС (в том числе и радиотелескоп РТ-70) будут полностью реконструированы в целях управления пилотируемыми кораблями «Федерация» для полета на Луну.

5. Участие радиолюбителей в исследованиях космоса

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1957 году Институту радиотехники и электроники АН СССР поручили поддержи-

вать связь с радиоклубами ДОСААФ. Были выделены необходимые средства на оснащение аппаратурой 28 радиоклубов, расположенных в городах СССР примерно по одной параллели от Прибалтики до Чукотки, где были созданы приемные пункты.

В Симферополе приемный пункт был создан на базе коллективной радиостанции радиоклуба ДОСААФ *UB5KKA*. Для полноценной работы приемного пункта радиоклуб получил из Москвы новейший катушечный профессиональный магнитофон МАГ-8. Прием сигналов со спутника на частоте 20 МГц проводился на радиоприемнике КВМ. С запуском первого ИСЗ на приемном пункте клуба было сразу организовано круглосуточное дежурство опытных радиооператоров. Среди них были: Олег Дрига, *UB5TK*; Юрий Вахлин, *UB5-16751*; Анатолий Кириченко, *UB5SM*; Леонид Пузанков, *UB5-16756* (рис. 4); Александра Свиная и др.

Радионаблюдение на частоте 40 МГц на своей УКВ радиостанции *RB5AGO* стал осуществлять главный инженер Крымского радиоцентра Николай Александрович Мартынчук (рис. 5). К слову, Н. А. Мартынчук — ветеран Великой Отечественной войны, лейтенант, в годы войны был связистом, участвовал в освобождении Австрии.

Полный оборот вокруг Земли спутник совершал за 1 час 36 минут. Сигналы, излучаемые радиопередатчиками спутника на каждой из частот (20.005 и 40.002 МГц) имели вид телеграфных посылок. Посылка сигнала одной частоты производилась во время паузы сигнала другой частоты. В среднем длительность сигналов на каждой из частот составляла около 0,3 сек. Эти сигналы использовались для наблюдения за орбитой спутника, а также для решения ряда научных задач. Для регистрации процессов, происходящих на спутнике, были установлены чувствительные датчики, изменяющие частоту телеграфных посылок и соотношения между длительностью посылок и пауз при изменении некоторых параметров на спутнике (температура, состояние источников питания и др.). По изменению тональности принимаемых на Земле сигналов, так называемому эффекту Доплера (изменение частоты при взаимном сближении и удалении объектов радионаблюдения на Земле и ИСЗ), можно было судить о параметрах орбиты спутника. Результаты радионаблюдений и магнитные записи сигналов спутника срочно направлялись в Москву по адресу: «Москва — Спутник». В местной печати появились статьи об участии крымских радиолюбителей в важном научном государственном деле [5, 6]. Через двадцать дней после запуска сигналы первого ИСЗ прекратились из-за истощения батареи его передатчика.

В соответствии с программой Международного геофизического года по научным исследованиям верхних слоев атмосферы, а также изучению физических процессов и условий жизни в космическом пространстве 3

ноября 1957 года в Советском Союзе произведен запуск второго ИСЗ. Общий вес различной измерительной аппаратуры, контейнера с подопытным животным (собака лайка) и источниками электропитания составил 508,3 кг (вес первого ИСЗ составлял 83,6 кг). Максимальное удаление спутника от поверхности Земли превышало 1500 км (первый ИСЗ находился от Земли в 947 км), время одного полного оборота спутника составило около 1 часа 42 минут. Сигналы передатчика второго спутника на частоте 20.005 МГц имели вид телеграфных посылок длительностью около 0,3 секунды с паузой такой же длительности. Радиопередатчик на частоте 40.002 МГц работал в режиме непрерывного излучения.

Крымские радиолюбители продолжили работу по приему радиосигналов второго ИСЗ. По-прежнему было очень интересно выявлять начало появления радиосигналов со спутника и записывать их на магнитофон до полного отсутствия сигналов в эфире. Очень важно было зафиксировать точное время появления и исчезновения этих сигналов, что отмечалось в аппаратном журнале. К этому периоду в разных точках Советского Союза было задействовано несколько радиопередатчиков, которые передавали сигналы точного времени (СТВ) на эталонных частотах 5000, 10000, 15000 кГц. Это было большим подспорьем для радиолюбителей нашей страны, которые занимались радионаблюдением за спутниками, конструированием и настройкой приемной аппаратуры. Как и прежде, данные радионаблюдения крымских радиолюбителей (магнитные записи сигналов и выписки из аппаратных журналов) оперативно направлялись в Москву в центр обработки информации. По итогам проведенных мероприятий ряд крымских радиолюбителей были поощрены Центром.

Одним из ярких проявлений технического прогресса в использовании космоса является создание радиолюбительских спутников-ретрансляторов, которые стали применяться с 1961 года. Было создано радиолюбительское объединение по спутниковой радиосвязи *AMSAT* (*Amateur Radio Satellite Corporation*). С тех пор серия спутников *OSCAR* (*Orbiting Satellite Carrying Radio*) из США ежегодно пополняется новыми моделями. В нашей стране также была запущена серия радиолулюбительских спутников *RS* (*Radio Sport*). Автору этой статьи в свое время удалось проводить любительские радиосвязи через наши ретрансляторы.

Аппаратура на любительских спутниках питается от аккумуляторов, заряжающихся от солнечных батарей. На орбиту спутники доставляются как «попутный груз» при запуске коммерческих спутников. Масса любительских спутников обычно составляет от 10 до 60 кг. При этом большинство радиолулюбительских спутников оснащаются ретрансляторами примерно такого же типа, как УКВ-репитеры на земле.

6. Роль любительской радиостанции в жизни поселка Школьное

После закрытия Центра космической связи в Школьном, демонтажа всего оборудования и отъезда всех военнослужащих появилась возможность для жителей поселка заниматься радиолюбительством. 15 января 2003 года в поселке была открыта первая коллективная школьная радиостанция *UU4JZL*. После вхождения Крыма в состав Российской Федерации школьная радиостанция получила позывной *R7KBF*. Радиостанция зарегистрирована при Муниципальном бюджетном образовательном учреждении дополнительного образования (МБОУ ДО) — Центре детского и юношеского творчества (ЦДЮТ). Директор Центра — Татьяна Николаевна Кириак. Возглавляет коллективную радиостанцию опытный радиолюбитель, педагог дополнительного образования Игорь Дмитриевич Дядюшев (*R7KBA*) (рис. 6).

Коллективная радиостанция весьма активна в эфире. Большое количество школьников и молодежи поселка посещают радиостанцию. Учатся правилам радиообмена, практической работе в эфире, участвуют в различных соревнованиях и днях активности радиолюбителей нашей страны.

4 октября 2017 года Центру космической связи исполнилось 60 лет. Будучи неравнодушными к истории объекта в Школьном, радиолюбители поселка в лице, прежде всего, начальника коллективной школьной радиостанции *R7KBF* И. Д. Дядюшева вышли с инициативой отметить это событие.

Региональное отделение Союза радиолюбителей России по Республике Крым поддержало инициативу и провело дни активности радиолюбителей в период с 4 октября по 4 декабря 2017 года. К этой дате был разработан специальный радиолюбительский диплом. Многие Крымские радиостанции вышли в эфир. Крымчанами было проведено 49547 радиосвязей. Школьная радиостанция *R7KBF*, за связь с которой начислялось самое высокое количество очков, провела 2410 радиосвязей. Более 300 радиолюбителей России и других стран мира смогли выполнить условия уникального диплома «60 лет Центру космической связи п. г. т. Школьный» (фото 7).

7. Заключение

Изложенный в статье материал отображает одну из ярких страниц жизни нашей великой Родины. Речь идет, в первую очередь, о великом достижении нашей науки — запуске первого в мире искусственного спутника Земли (ИСЗ). И, как отмечено выше, участие в исследованиях космоса огромной армии радиолюбителей является очень мудрым решением наших ученых. Начало космической эры открыло в свою очередь и новые просторы для радиолюбительского творчества. Со временем радиолюби-

тели освоили в своей деятельности новые космические технологии. Это и радиосвязи через радиолюбительские спутники-ретрансляторы, и радиосвязи с отражением сигналов от нашего ближайшего спутника, Луны, и радиосвязи с использованием отражения радиосигналов от ионизированных следов влетающих в нашу атмосферу метеоров. Эти космические технологии способствовали созданию радиолюбителями соответствующей новейшей аппаратуры для радиосвязи.

Список литературы

1. Пузанков Л. А. История радиолюбительского движения и радиоспорта в Крыму. Симферополь : изд-во «Форма», 2010. 200 с.
2. Вахнин В. Искусственные спутники Земли (справка для радиолюбителей-наблюдателей) // Радио. 1957. № 6. С. 14—17.
3. Казанцев А. Наблюдения за радиосигналами с ИСЗ и их научное значение // Радио. 1957. № 6. С. 17—19.
4. Бовал В. Забытый Школьный. Военное обозрение. 15 октября 2013 года. Интернет-ресурс. Режим доступа: <https://topwar.ru/34552-zabytyy-shkolnyy.html> (дата обращения: 14.03.2023).
5. Подвиг советской науки — гордость всего человечества // Крымская правда № 202 (10378), 12 октября 1957 г.
6. Эфир прослушивают Крымские коротковолновики // Крымская Правда № 219 (10395), 5 ноября 1957 г.

Информация об авторе

Пузанков Леонид Александрович, член Российского телеграфного клуба, Симферополь, Крым, Российская Федерация.



Рис. 1. Приемо-передающая антенна ТНА-400.

Fig. 1. TNA-400 transceiver antenna



Рис. 2. Общий вид на Центр дальней космической связи со стороны села Витино.
Fig. 2. General view of the Center for Deep Space Communications from the Vitino village



Рис. 3. Радиотелескоп РТ-70.
Fig. 3. Radio telescope PT-70



Рис. 4. Л. А. Пузанков за приемом сигналов с ИСЗ. Стоит А. П. Кириченко. 1957 г.
Fig. 4. L. A. Puzankov for receiving signals from satellites. Worth A. P. Kirichenko. 1957



Рис. 5. Н. А. Мартычук. 1950-е гг.

Fig. 5. N. A. Martynchuk. 1950s



Рис. 6. И. Д. Дядюшев за радиостанцией. После 2014 г.

Fig. 6. I. D. Dyadyushev at the radio station. After 2014



Рис. 7. 60 лет Центру космической связи пгт Школьный (диплом). 2017 г.

Fig. 7. 60th Anniversary of the Center for Space Communications in Shkolny (diploma). 2017

The Role of Radio Amateurs in Space Exploration and the Destiny of the Crimean Centers of Deep Space Communication

L. A. Puzankov

Russian Telegraph Club
Simferopol, Crimea, Russian Federation
r7ka@mail.ru

Received: March 25, 2023

Peer-reviewed: March 31, 2023

Accepted: March 31, 2023

Abstract: The article notes the unique idea of domestic scientists to connect a large detachment of radio amateurs to space exploration after the launch of the first artificial Earth satellite in our country. Radio amateurs of the Crimea with high responsibility approached the fulfillment of the tasks set by scientists. With the beginning of the era of space exploration, ground-based measuring points were organized in different places on the territory of the USSR. The article briefly outlines the history of two such points located in the Crimea, as well as plans for their modernization.

Keywords: space exploration, the first artificial Earth satellite, ground-based measuring stations.

For citation (IEEE): L. A. Puzankov, "The Role of Radio Amateurs in Space Exploration and the Destiny of the Crimean Centers of Deep Space Communication," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 260–273, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.20. (In Russ.).

References

- [1] L. A. Puzankov, *The history of the amateur radio movement and radio sports in the Crimea*. Simferopol : Forma publ. house, 2010. (In Russ.).
- [2] V. Vakhnin, "Artificial satellites of the Earth (reference for amateur radio observers)," *Radio*, no. 6, pp. 14–17, 1957. (In Russ.).
- [3] A. Kazantsev, "Observations of radio signals from satellites and their scientific significance," *Radio*, no. 6, pp. 17–19, 1957. (In Russ.).
- [4] V. Boval, *Forgotten School. Military review*. October 15, 2013. Internet resource. (In Russ.). Access mode: <https://topwar.ru/34552-zabytyy-shkolnyy.html> (date of access: 14.03.2023).
- [5] "The feat of Soviet science is the pride of all mankind," *Krymskaya Pravda*, no. 202 (10378), October 12, 1957. (In Russ.).
- [6] "Crimean shortwaves listen to the air," *Krymskaya Pravda*, no. 219 (10395), November 5, 1957. (In Russ.).

Information about the author

Leonid A. Puzankov, member of the Russian Telegraph Club, Simferopol, Crimea, Russian Federation.