

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2019
Том 2
№ 3

2019
Vol. 2
No. 3

Sevastopol

Почетный главный редактор

Президент РНТОРЭС им. А. С. Попова, академик РАН ГУЛЯЕВ Ю. В.

Главный редактор

д. т. н., проф. ГИМПЛЕВИЧ Ю. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

д. ф.-м. н., проф. АБРАМОВ И. И. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. ф.-м. н. ВОЛЬВАЧ А. Е. (КрАО, Крым, Россия)

д. т. н., проф. ГРОМОВ Д. В. (МИФИ, Москва, Россия)

к. т. н. ЕРМОЛОВ П. П. (СевГУ, Севастополь, Россия — зам. главного редактора)

д. т. н., проф. ИВАНОВ В. Э. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КАЛОШИН В. А. (ИРЭ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. ЛЕРЕР А. М. (ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия)

д. ф.-м. н., проф. МАГДА И. И. (ННЦ «ХФТИ», Харьков, Украина)

д. т. н., проф. НОСКОВ В. Я. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н. ОБУХОВ И. А. (НПП «Синергетика», Москва, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРИКОВ В. М. (СПбГИКиТ, Санкт-Петербург, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРЯКОВ А. В. (МТУСИ, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КУРАЕВ А. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. т. н., проф. СМОЛЬСКИЙ С. М. (МЭИ, Москва, Россия)

д. т. н., проф. СОВЛУКОВ А. С. (ИПУ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. СТАРОСТЕНКО В. В. (КФУ, Симферополь, Россия)

д. т. н., проф. ШИРОКОВ И. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

д. т. н., проф. АФОНИН И. Л. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. ф.-м. н., проф. БОГУШ В. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

проф. ИЛЬЧЕВ С. Д. (Durban University of Technology, South Africa)

проф. KARMAKAR Н. Ч. (Monash University, Australia)

д. т. н., проф. КНЯЗЕВ С. Т. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. п. н. НЕЧАЕВ В. Д. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. т. н., проф. НОВИКОВ В. В. (ЧВВМУ им. П. С. Нахимова, Севастополь, Россия)

Заведующая редакцией: *В. П. Коломийченко*

Сайт журнала: icrtjournal.com

Подписано к печати 16.09.2019

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 9,34. Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 300 экз.

Адрес редакции: ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Адрес для переписки: а/я 63, Севастополь, 299053

Тел. +7 (978) 745-27-51, e-mail: icrt.mail@gmail.com

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Отпечатано в типогр. Printex

ул. Кулакова, 59а, Севастополь, 299011. Тел.: +7 8692 464 744, +7 8692 455 678

Honorary Chief Editor

President of RNTORES n. a. A. S. Popov, Academician of RAS GULYAEV Yu. V.

Editor in Chief

D.Sc., Prof. GIMPILEVICH Yu. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

Editorial Board

- D.Sc., Prof. ABRAMOV I. I. (BSUIR, Minsk, Belarus)
D.Sc. VOLVACH A. Ye. (CrAO, Crimea, Russia)
D.Sc., Prof. GROMOV D. V. (MEPhI, Moscow, Russia)
C.Sc. YERMOLOV P. P. (SevSU, Sevastopol, Russia – Deputy Editor in Chief)
D.Sc., Prof. IVANOV V. E. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)
D.Sc., Prof. KALOSHIN V. A. (IRE of RAS, Moscow, Russia)
D.Sc., Prof. LERER A. M. (SFU, Rostov-on-Don, Russia)
D.Sc., Prof. MAGDA I. I. (KhIPT, Kharkov, Ukraine)
D.Sc., Prof. NOSKOV V. Ya. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)
D.Sc. OBUKHOV I. A. (Sinergetika Ltd., Moscow, Russia)
D.Sc., Prof. PESTRIKOV V. M. (SPbSUFT, Saint-Petersburg, Russia)
D.Sc., Prof. PESTRYAKOV A. V. (MTUSI, Moscow, Russia)
D.Sc., Prof. KURAYEV A. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)
D.Sc., Prof. SMOLSKIY S. M. (MEI, Moscow, Russia)
D.Sc., Prof. SOVLUKOV A. S. (ICS of RAS, Moscow, Russia)
D.Sc., Prof. STAROSTENKO V. V. (CrFU, Simferopol, Russia)
D.Sc., Prof. SHIROKOV I. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

- D.Sc., Prof. AFONIN I. L. (SevSU, Sevastopol, Russia)
D.Sc., Prof. BOGUSH V. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)
Prof. ILCEV D. S. (Durban University of Technology, South Africa)
Prof. KARMAKAR N. Ch. (Monash University, Victoria, Australia)
D.Sc., Prof. KNYAZEV S. T. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)
D.Sc. NECHAYEV V. D. (SevSU, Sevastopol, Russia)
D.Sc., Prof. NOVIKOV V. V. (P. S. Nakhimov ChHNS, Sevastopol, Russia)

Head of Editorial Board: *V. P. Kolomiychenko*

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@gmail.com
Website: icrtjournal.com

Содержание — Contents

Предисловие	316
-------------------	-----

Астрономия (01.03.00) — Astronomy

Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Сверхмощная вспышка мазера водяного пара в источнике W49N A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, Super water maser flare at W49N source	317
--	-----

Физика (01.04.00) — Physics

Морозова М. А., Матвеев О. В., Романенко Д. В. Дисперсионные характеристики гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре магнанный кристалл — сегнетоэлектрик с учетом магнитной и электрической нелинейности M. A. Morozova, O. V. Matveev, and D. V. Romanenko, Dispersion characteristics of hybrid electromagnetic spin waves in a magnonic crystal – ferroelectric structure with magnetic and electrical nonlinearity	324
---	-----

Радиотехника и связь (05.12.00) — Radio engineering and communication

Пономарев О. П., Мойсейченков А. Н., Бахтин А. А., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю., Михайлов В. Ю. Базовые станции 5G: возможности реализации в России O. P. Ponomarev, A. N. Moiseichenkov, A. A. Bakhtin, E. V. Omelyanchuk, A. Y. Semenova, and V. Y. Mikhailov, 5G base station prototyping: implementation possibilities in Russia	334
Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Модель эффективного кодирования цветного изображения с учетом особенностей систем колориметрии A. S. Adzhemov and A. Y. Kudryashova, Effective coding model of color image based on features colorimetric systems	349
Санников В. Г., Волчков В. П. Метод оптимальной передачи двоичных сообщений без межсимвольной интерференции с учетом пространственно- временного кодирования по Аламоути V. G. Sannikov and V. P. Volchkov, The method of optimal transmission of binary communication without intersymbolic interference, taking into account space-time coding by Alamouty	361
И. И. Savashinskiy, Design of the hidden device resonant multi-slit antenna used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression Савашинский И. И. Проектирование резонансной многощелевой антенны скрытного устройства радиоэлектронного подавления доплеровских измерителей скорости транспортных средств	372
Широков И. Б., Широкова Е. И., Азаров А. А. Система беспроводной передачи энергии I. B. Shirokov, E. I. Shirokova, and A. A. Azarov, System of wireless energy transfer	380
Кудрявченко И. В. Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств I. V. Kudryavchenko, Features of infocommunication networks formation based on self-organizing mobile smart devices	390

Карпенко Е. А., Мухтаров А. А., Шегал А. А. Анализ надежности аппаратуры локальной вычислительной сети	
Evgenij A. Karpenko, Andrey A. Mukhtarov, and Anna A. Shegal, Reliability analysis of local area network equipment	401

Электроника (05.27.00) — Electronics

Малаховский О. Ю., Фотина Л. В. Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды	
O. Yu. Malakhovskiy and L.V. Fotina, High-speed switching diodes	411
Торхов Н. А., Кривчук А. С. Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои <i>n-GaAs</i>	
N. A. Torkhov and A. S. Krivchuk, Size effects in the processes of large ion implantation into <i>n-GaAs</i> (100) epitaxial layers	416
Жуков В. В., Куканов А. М., Поздеев К. А., Собченко М. И., Искандеров Ф. Г., Мединков А. Н., Ухандеев В. И. Твердотельный СВЧ-генератор ISM-диапазона с выходной мощностью до 5 кВт на основе LDMOS транзисторов	
V. V. Zhukov, A. M. Kukanov, K. A. Pozdeev, M. I. Sobchenko, F. G. Iskanderov, A. N. Medenkov, and V. I. Ukhandeev, Solid-state ISM UHF generator with output power up to 5 kW based on LDMOS-transistors	427

История науки и техники (07.00.10) — History of science and technology

Пестриков В. М. Организация научно-исследовательских работ в компании General Electric в начале XX века	
V. M. Pestrikov, Organization of research work at General Electric in the early twentieth century	434

Предисловие

Редакция журнала вынуждена объявить о том, что в связи с изменениями требований Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Российской Федерации к научным журналам (приказ Министерства образования и науки РФ от 12 декабря 2016 г. № 1586 с изменениями, содержащемся в приказе от 12 февраля 2018 г. № 99) число групп научных специальностей журнала с 2020 г. сокращается с пяти до трех, а именно:

01.03.00 — Астрономия (специальности 01.03.01 — Астрометрия и небесная механика, 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия, 01.03.03 — Физика Солнца);

05.12.00 — Радиотехника и связь (специальности 05.12.04 — Радиотехника, системы и устройства телевидения, 05.12.07 — Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций, 05.12.14 — Радиолокация и радионавигация);

05.27.00 — Электроника (специальности 05.27.01 — Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, 05.27.02 — Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.06 — Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники).

Кроме этого, большая сложность и зарегулированность процедуры изменения состава учредителей журнала вынуждает нас отказаться от этой идеи — единственным учредителем журнала остается Севастопольский государственный университет.

Согласно названным выше приказам соответствующие изменения будут внесены и в состав редакционной коллегии и редакционного совета журнала.

Ю. Б. Гимпиевич, главный редактор

*П. П. Ермолов, заместитель главного редактора,
член Ассоциации научных редакторов и издателей*

Севастополь, сентябрь 2019 г.

УДК 523.9

Сверхмощная вспышка мазера водяного пара в источнике W49N¹

¹ Вольвач А. Е., ¹ Вольвач Л. Н., ² Ларионов М. Г.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Москва, 117810, Российская Федерация

volvach@bk.ru

Получено: 9 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: С помощью РТ-22 зарегистрирована самая мощная за всю историю наблюдения вспышка в линии +5.5 км/сек, начавшаяся в сентябре 2017 г. и продолжавшаяся в 2018 г. Получена детальная форма изменения спектральной плотности потока излучения источника в зависимости от времени. В максимуме поток превысил уровень $P \approx 8 \cdot 10^4$ Ян. Такое значение потока впервые было зафиксировано за все время наблюдений за объектом.

Ключевые слова радиотелескоп, радиоизлучение, вспышка, мазер.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Сверхмощная вспышка мазера водяного пара в источнике W49N // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 317—323.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Сверхмощная вспышка мазера водяного пара в источнике W49N / А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 317—323.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Super water maser flare at W49N source

A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹, and M. G. Larionov²

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
Yalta, 298688, Russian Federation

² Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS
Moscow, 117810, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: July 9, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: Using the RT-22, the most powerful flare in the line of +5.5 km/s in W49N source was detected. A detailed form of the change in the spectral density of the radiation flux of the source as a function of time was obtained. Detailed analysis of the variations of the flux density, which reached a maximum value $P \approx 8 \times 10^4$ Jy, have led to important scientific conclusions about possible mechanisms for the emission in this water line.

Keywords: radio telescope, radio emission, flare, maser.

For citation (IEEE): A. E. Volvach et al. “Super water maser flare at W49N source,” *Informatics and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 317–323, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Изучение природы областей звездообразования и их эволюции — от стадии молекулярных облаков до звезд — одно из наиболее актуальных и бурно развивающихся направлений современной астрофизики.

Существование мазерного излучения в межзвездной среде рассматривается в современной астрофизике как один из важнейших признаков процессов звездообразования. Первые космические мазеры были обнаружены в 1965 г. на молекулах OH. После открытия мазерного перехода $6_{16}—5_{23}$ в молекуле водяного пара в 1969 г. наблюдениями космических источников было установлено, что мазерное излучение связано с HII областями или с холодными звездами поздних спектральных классов.

Особенно ценную информацию также приносит мазерное излучение космических радиоисточников, излучающих в радиолиниях OH, H₂O, SiO и других молекул, что дает нам важные сведения о тех астрофизических объектах, с которыми они связаны. В 1971 году с участием РТ-22 КРАО проведены первые в мире межконтинентальные РСДБ наблюдения источников в линиях водяного пара на частоте мазерного перехода $6_{16}—5_{23}$. До-

стигнуто угловое разрешение радиоинтерферометра РТ-22 (Симеиз) — РТ-37 (Хайстек) 0.1 мсек. дуги.

Мазерное излучение возникает в результате естественных процессов «накачки», которые действуют в атмосферах и оболочках некоторых звезд, в межзвездных газовых облаках, в атмосферах комет. В плотных оболочках вокруг протозвезд, где имеется нагрев среды, в том числе ударными волнами, протозвездными выбросами, или аккрецией, содержание H_2O может составлять 10^{-4} по отношению к плотности газовой составляющей.

В широком диапазоне скоростей (± 300 км/сек), в объекте W49N зарегистрировано множество линий мазера водяного пара. Большая часть из них сосредоточена в компактной области размером 0.1 пк. Было замечено, что источники, расположенные в таком небольшом объеме пространства и обладающие такой большой дисперсией скоростей, не могут представлять собой динамически стабильную систему [2].

Низкоскоростные детали мазерной линии водяного пара обнаруживают значительную переменность плотности потока в диапазоне от часов до многих лет. Детальный мониторинг плотности потока обнаружил его возрастание до 80 кЯн [3]. Задержка по времени между излучением компонент в источнике W49N в мазерной области размерами $\sim 2 \cdot 10^{17}$ см соответствует распространению возмущения со скоростью света, что может указывать на радиационный механизм накачки мазера [4].

2. Оборудование и наблюдения

Наблюдения проводились с помощью 22-м радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе. Высокочувствительная приемная система на длину волны 1.35 см была установлена во вторичном фокусе РТ-22. Для приема и регистрации сигналов от источников в линии водяного пара на РТ-22 КрАО использовался модернизированный спектрально-поляриметрический радиометр с фурье-спектральным анализатором параллельного типа, который имел 512 и/или 2048 каналов и разрешение 8 и 2 кГц (105 и 26 м/с по лучевой скорости в линии H_2O) соответственно [1, 6]. Полученные при наблюдениях спектральные данные корректировались с учетом поглощения в атмосфере и изменения эффективной площади радиотелескопа от угла места.

Перестраиваемые гетеродины синхронизировались высокостабильной частотой 5 МГц от водородного стандарта частоты VCH-1005 и обеспечивали преобразование входных частот приема в промежуточную частоту с указанной выше полосой [5]. Весь цикл наблюдений линий мазера

водяного пара состоял в накоплении сигнала в течение 5—10 минут при наведении на источник (*on*) и при отведении с источника на градус в сторону от источника (*off*). Циклы могли повторяться для достижения необходимого отношения сигнал/шум.

3. Результаты

Регулярный длительный мониторинг W49N был начат с сентября 2017 г. и проводился параллельно с наблюдениями мазера IRAS 18316-0602, в котором в это время была зафиксирована развивающаяся мощная вспышка. Данные спектральных измерений снимались с интервалами времени (1-2) дня. На рис. 1 показана зависимость спектральной плотности потока излучения в линии водяного пара на скорости около 6 км/сек, полученной по максимумам спектральной линии [8].

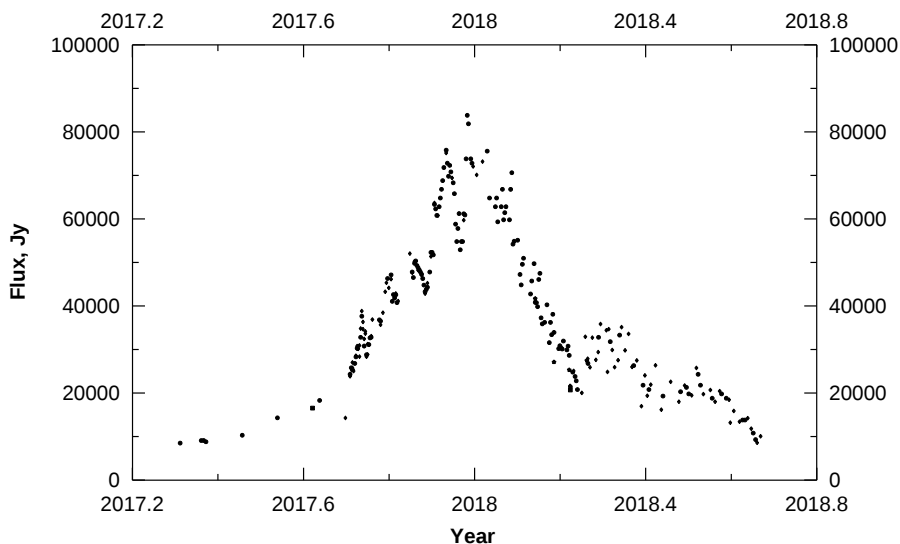


Рис. 1. Долговременный мониторинг W49N в линии водяного пара.

Fig. 1. Long-term monitoring of W49N in the water vapor line

По данным [7] W49N находится на расстоянии 11 кпк от Солнца и является одним из самых далеких мазеров внутри нашей Галактики. Можно использовать полученное расстояние до мазера для оценки болометрической светимости ассоциированного с ним ИК источника и класса возбуждающей звезды. Принимая во внимание необходимый параметр возбуждения, требуемый для компактной H_{II} области ($u=110 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-2}$), интегральную инфракрасную светимость мы приходим к необходимости иметь

в качестве центрального источника массивную звезду раннего спектрального класса *O5* со светимостью $L \sim 4 \cdot 10^5 L_{\odot}$, как источник первичного энерговыделения. То есть мы можем иметь дело с массивным горячим гигантом в десятки солнечных масс, способным ионизовать плотную среду вокруг себя на расстоянии (10^{17} — 10^{18}) см.

Образец записи линии водяного пара вблизи максимума вспышки 2017—2018 гг. показаны на рис. 2 [8].

Таким образом, источник *W49N* вместе с *IRAS 18316-0602* являются самыми мощными галактическими киломазерами. Если расположить *W49N* на расстоянии *Orion KL*, то поток был бы 50000 кЯн, что почти в 10 раз превышает максимальное значение самой мощной вспышки в Орионе за всю историю его наблюдения (≈ 6000 кЯн).

Гигантская вспышка мазера водяного пара в *W49N* началась с апреля 2017 г. и продолжалась в 2018 г. Анализ кривой мониторинга плотности потока во время вспышки позволяет сделать важные выводы.

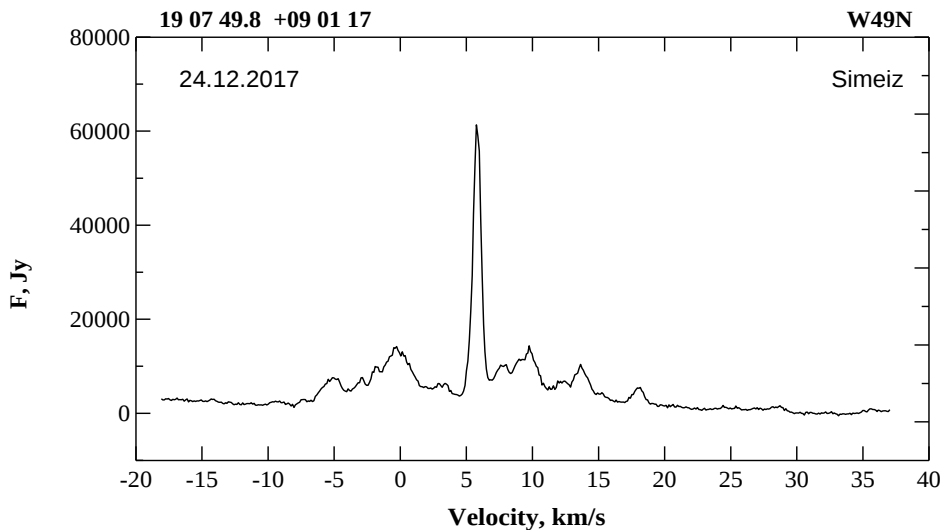


Рис. 2. Линия водяного пара в *W49N* в максимуме вспышки.

Fig. 2. The line of water vapor in *W49N* at maximum flash

Наблюдается картина быстрых изменений спектральных плотностей потоков линий, которые связываются, так или иначе, с изменениями активности центральной массивной звезды. Но остается главный вопрос: что является инициатором таких изменений в поведении центрального тела, обеспечивающего такие мощные вспышки мазеров водяного пара?

Всякая предлагаемая модель первичного энерговыделения в системе мазерных источников должна объяснять комплекс наблюдаемых проявлений, в которые входят как низкоскоростные мощные вспышки мазерного излучения, так и высокоскоростные детали излучения космических мазеров. Длительность процесса вспышки (рис. 1) составляет величину более года. Процесс активации мазера продолжался в течение 6 месяцев, после чего происходил спад плотности потока излучения. На то, что мазерная конденсация была, возможно, единственной, указывает факт наличия узкой линии излучения на фиксированной частоте и ее гауссообразная форма. Наблюдаемые параметры излучения в линии должны обеспечиваться высокой плотностью мазерного образования, его значительной массой и большим перепадом температуры, сохраняющимся в течение заметного промежутка времени (порядка нескольких месяцев). Необходимо указать на физический процесс, инициирующий поведение центрального тела и приводящий к изменению названных характеристик мазера в течение обозначенного времени со стремительным подъемом излучения и его спадом.

Естественно предположить, что заметная доля массивных звезд на ранней стадии эволюции являются двойными и кратными системами, образовавшимися в процессе эволюции газово-пылевого облака. В случае образования тесных массивных систем возникает мощное гравитационное взаимодействие и появляется возможность инициации источников первичного энерговыделения в газово-пылевых облаках посредством частичного сброса оболочки центральной массивной звезды из-за гравитационного воздействия со стороны компаньона в периастре системы. Частичные квазипериодические сбросы оболочек звезды в принципе могут обеспечить энергетику процесса и объяснить гигантские вспышки мазерного излучения, происходящие эпизодически раз в 10—20 лет.

4. Заключение

1. Зафиксирована детальная форма кривой плотности потока излучения во время уникальной гигантской вспышки, продолжавшейся с сентября 2017 г. в течение практически всего 2018 г.

2. Получены свидетельства того, что во время вспышки киломазер «работал» в ненасыщенном режиме: наблюдалась специфическая зависимость ширины линии от потока.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность персоналу РТ-22 КрАО РАН за помощь в проведении наблюдений. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-29-11005.

Список литературы

1. Wynn-Williams C. G. Radio Maps of Condensations in H II Regions // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1971. Vol. 151. Pp. 397—420.
2. Стрельницкий В. С., Сюняев Р. А. О природе высоких скоростей источников H_2O в W49 // *Астроном. Ж.* 1972. Т. 49, вып. 4. С. 704—...
3. Sullivan W. T. Microwave Water Vapor Emission from Galactic Sources // *Astrophys. J. Suppl.* 1973. Vol. 25, ser. 222. Pp. 393—432.
4. Morgan J. M. et al. Very long baseline interferometric observations of the H_2O sources in W49N, W3(OH), Orion A, and VY Canis Majoris // *Astrophys. J.* 1973. Vol. 185. Pp. 535—567.
5. Gammon R. H. Correlated variability in W 49 (H_2O) // *Astron. and Astrophys.* 1976. Vol. 50, no. 1. Pp. 71—77.
6. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Стrepка И. Д., Antюфеев А. В., Мышенко В. В., Зубрин С. Ю., Шульга В. М. Некоторые результаты совместных исследований НИИ «КрАО» и РИ НАНУ областей звездообразования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн // *Изв. Крымской Астрофиз. obs.* 2009. Том 104, № 6. С. 72—79.
7. Zhang B., Reid M. J., Menten K. M. et al. Parallaxes for W49N and G048.60+0.02 : Distant Star Forming Regions in the Perseus Spiral Arm // *ApJ.* 2013. Vol. 775:79, no 1.
8. Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., МакЛеод Г. К., ван ден Хеевер С. П., Волак П., Олеч М., Ипатов А. В., Иванов Д. В., Михайлов А. Г., Мельников А., Ментен К., Беллоче А., Вейс А., Мазумдар П., Шуллер Ф. Гигантская вспышка мазера водяного пара в галактическом источнике IRAS 18316-0602 // *Астрономический журнал.* 2019. Т. 96, № 1. С. 51—69.

Информация об авторах

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

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

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН г. Москва, 117810, Российская Федерация.

Information about the authors

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

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

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.

УДК 537.87, 537.622.4, 537.226.4

Дисперсионные характеристики гибридных электромагнитно-спиновых волн в структуре магнанный кристалл — сегнетоэлектрик с учетом магнитной и электрической нелинейности¹

^{1,2} Морозова М. А., ² Матвеев О. В., ² Романенко Д. В.

¹ Московский физико-технический институт
Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, 141701, Россия
matmorozevama@yandex.ru

² Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Россия
olvmatveev@gmail.com

Получено: 11 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Представлены результаты теоретического исследования дисперсионных характеристик гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в структуре магнанный кристалл — сегнетоэлектрик. Показано, что в результате фазового синхронизма волн в полосе первого брэгговского резонанса в спектре формируются две запрещенные зоны: основная — брэгговская и дополнительная — гибридная. Исследовано влияние магнитной и электрической нелинейности сред на положение запрещенных зон в спектре распространяющихся волн. Выявлено, что учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте, учет электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте.

Ключевые слова: магнанный кристалл, сегнетоэлектрик, мультиферроик, электромагнитно-спиновые волны, брэгговский резонанс, керровская нелинейность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Морозова М. А., Матвеев О. В., Романенко Д. В. Сверхмощная вспышка лазера водяного пара в источнике W49N // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 324—333.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Морозова, М. А. Сверхмощная вспышка лазера водяного пара в источнике W49N / М. А. Морозова, О. В. Матвеев, Д. В. Романенко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 324—333.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Dispersion characteristics of hybrid electromagnetic spin waves in a magnonic crystal – ferroelectric structure with magnetic and electrical nonlinearity

M. A. Morozova^{1,2}, O. V. Matveev², and D. V. Romanenko²

¹ Moscow Institute of Physics and Technology

9, Institutskiy per., Dolgoprudny, 141701, Russian Federation
mamorozovama@yandex.ru

² Saratov State University

83, Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation
olvmatveev@gmail.com

Received: July 11, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The results of a theoretical study of the dispersion characteristics of hybrid electromagnetic-spin waves propagating in the structure of a magnonic crystal - ferroelectric are presented. It is shown that as a result of phase synchronism of waves in the band of the first Bragg resonance, two bandgaps are formed in the spectrum: the main one is the Bragg one and the additional one is hybrid. The influence of the magnetic and electrical nonlinearity of the media on the position of the bandgaps in the spectrum of propagating waves is investigated. It was revealed that taking into account magnetic nonlinearity leads to a shift of both bandgaps down in frequency, taking into account electric nonlinearity leads to a shift of only the hybrid bandgap up in frequency.

Keywords: magnonic crystal, ferroelectric, multiferroic, hybrid electromagnetic-spin waves, Bragg resonance, Kerr effect.

For citation (IEEE): M. A. Morozova et al. "Dispersion characteristics of hybrid electromagnetic spin waves in a magnonic crystal – ferroelectric structure with magnetic and electrical nonlinearity," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 324–333, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Ферромагнитные материалы широко используются для создания компонентов СВЧ устройств, управление характеристиками которых выполняется посредством изменения внешнего магнитного поля. «Магнитный» способ управления может быть реализован в сравнительно широком

диапазоне частот, но при этом управление осуществляется сравнительно медленно и требует значительного энергопотребления. Другим семейством материалов, применяемых для создания СВЧ управляемых приборов, являются сегнетоэлектрики (СЭ). Для управления характеристиками сегнетоэлектрических компонентов применяется электрическое поле. Изменение диэлектрической проницаемости при приложении электрического поля при «электрическом» способе управления происходит гораздо быстрее по сравнению с «магнитным» управлением. Кроме того, «электрическое» воздействие отличается малым энергопотреблением [1].

Использование композитных мультиферроидных структур на базе ферромагнитных пленок открывает дополнительные возможности по управлению характеристиками волн в таких структурах [2]. Связь между электрической и магнитной подсистемами дает возможность управлять их магнитными свойствами электрическим полем и, наоборот, изменять их электрические свойства в магнитном поле. Первые работы по исследованию композитных мультиферроидных структур, в частности структуры ферромагнитная пленка — сегнетоэлектрик (ФП/СЭ) относятся к 80-м годам прошлого века [3, 4]. При больших значениях диэлектрической проницаемости СЭ, которая зависит от приложенного постоянного электрического поля, электромагнитные волны (ЭМВ) в СЭ оказываются сильно замедленными. В этом случае в структуре ФП/СЭ на частотах, близких к частоте фазового синхронизма, между ЭМВ и спиновыми волнами (СВ) возникают гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭМСВ). Интерес к таким структурам был возобновлен в связи с развитием технологий производства керамических сегнетоэлектриков (титанат бария (BaTiO_3), титанат стронция (SrTiO_3)) с широким диапазоном перестраиваемой диэлектрической проницаемости [5—7].

Использование периодических мультиферроидных структур типа магнетонный кристалл — сегнетоэлектрик (МК/СЭ) расширяет возможности по управлению характеристиками волн в таких структурах. При этом за счет создания периодического изменения характеристик как сегнетоэлектрической нагрузки, так и ферромагнитной пленки в таких структурах формируются запрещенные зоны. Проводились теоретические и экспериментальные исследования характеристик запрещенной зоны в зависимости от диэлектрической проницаемости СЭ, напряженности электрического и магнитного поля [8—10].

Интенсивная волна, распространяясь в нелинейной среде, может изменять свойства среды. Как было показано ранее [11], мультиферроидные среды, включающие ферромагнитную и сегнетоэлектрическую подсисте-

мы, демонстрируют двойную волновую нелинейность, обусловленную совместным действием нелинейностей каждой из подсистем. До настоящего времени проводились только исследования, направленные на изучение влияния нелинейности на распространение волн в структурах типа ФП/СЭ.

Однако интерес представляет исследование распространения нелинейных сигналов в периодических мультиферроидных структурах. Следует ожидать, что учет нелинейности в этом случае приведет к изменению характеристик запрещенных зон в спектре ГЭМСВ.

2. Модель и численные результаты

В структуре ФП/СЭ в результате фазового синхронизма СВ, распространяющихся в ферромагнетике, и ЭМВ в сегнетоэлектрике происходит расталкивание дисперсионных характеристик данных типов волн: они гибридизируются и формируется ГЭМСВ. Рассмотрим структуру магنونный кристалл — сегнетоэлектрик (МК/СЭ) (см. рис. 1). Магنونный кристалл представляет ферромагнитную пленку с намагниченностью насыщения M_0 , толщиной a . На поверхности пленки нанесена периодическая структура с периодом L в виде канавок глубиной $\Delta=a-b$, шириной $c_2=L-c_1$, c_1 — ширина столбика. Предполагается, что в направлении осей x и y структура бесконечна. Система помещена во внешнее магнитное поле $\vec{H}_0$, которое направлено вдоль оси x , таким образом в МК вдоль оси y распространяются поверхностные магнитостатические волны (ПМСВ). Слой сегнетоэлектрика толщиной S и диэлектрической проницаемостью ϵ помещен поверх МК. К слою СЭ приложено внешнее электрическое поле напряженности $\vec{E}_0$ вдоль оси z . Периодичность приводит к формированию отраженных от неоднородностей волн, в результате взаимодействия прямых и отраженных волн в такой структуре формируются запрещенные зоны: области, в которых распространяющиеся волны затухают.

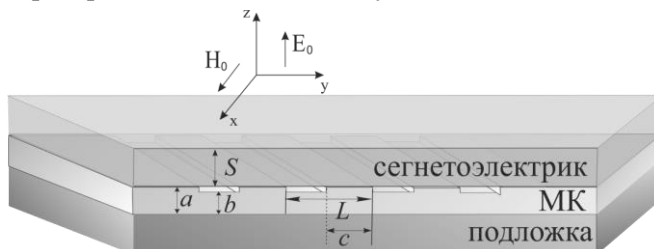


Рис. 1. Схема исследуемой структуры МК/СЭ

Fig. 1. Scheme of studied structure magnonic crystal – ferroelectric

Дисперсионное уравнение для ГЭМСВ в структуре МК/СЭ может быть получено из уравнения для волн в структуре ФП/СЭ [3] с учетом периодической толщины пленки, а также с использованием метода связанных волн [12], и будет иметь вид:

$$\begin{vmatrix} \Omega_0^H & \beta_0^H \\ \beta_{-1}^H & \Omega_{-1}^H \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где компоненты $\Omega_{0,-1}^H$, приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные соотношения для прямой и отраженной ГЭМСВ в структуре ФП/СЭ:

$$\begin{aligned} \Omega_{0,-1}^H = & \left(-\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2 k_{0,-1} d_0}{2} \right) \left(-\omega^2 + c^2 \frac{2k_{0,-1}}{\varepsilon S} \right) - \\ & - \frac{\varepsilon d_0 \omega_M \omega^2}{c^2 k_{0,-1}} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $d_0 = a + \Delta c_1 / L$ — эффективная толщина МК, $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $\omega_{\perp} = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$, γ — гиромагнитное отношение, $k_{0,-1}$ — волновые числа прямых и отраженных волн, c — скорость света. Коэффициенты $\beta_{0,-1}^H$ определяют связь между прямыми и отраженными волнами и зависят от геометрии периодической ячейки МК [13]:

$$\beta_{0,-1}^H = \frac{d_0 \delta d \omega_M}{2} \left(\frac{\omega_M k_{-1,0}}{2} \left(\frac{c^2}{\varepsilon S} k_{-1,0} - \omega^2 \right) - \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2 k_{-1,0}} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) \right) \quad (3)$$

где $\delta d = 2\Delta \sin(\pi c_1 / L) / \pi d_0$.

Увеличение амплитуды волны в ферромагнетике приводит к уменьшению постоянной составляющей намагниченности, что влечет за собой изменение частоты прецессии, которое и приводит к изменению частоты спиновой волны. Будем учитывать магнитную нелинейность среды следующим образом:

$$M = M_0(1 - q|m|^2) = M_0(1 - |u|^2), \quad (4)$$

где M — продольная компонента магнитного момента, $|u|^2 = q|m|^2$ — нормированная амплитуда прецессии намагниченности, пропорциональная мощности входного сигнала, $q = 0.5(1 + \omega_H^2 / \omega_{\perp}^2)$ — коэффициент нелинейности ферромагнитной среды.

В случае электромагнитных волн в диэлектрических волноводах при увеличении напряженности электрического поля волны изменяется диэлектрическая проницаемость:

$$\bar{\varepsilon}_N = \bar{\varepsilon} + N_\varepsilon \left| \bar{E} \right|^2, \quad (5)$$

где $\bar{\varepsilon}_N$ — относительная диэлектрическая проницаемость СЭ, $\bar{\varepsilon}$ — линейная часть диэлектрической проницаемости, N_ε — коэффициент нелинейности сегнетоэлектрика, $\bar{E}$ — напряженность электрического поля.

Уменьшение диэлектрической проницаемости при увеличении напряженности электрического поля волны приводит к изменению частоты электромагнитной волны в СЭ.

Связь между безразмерной амплитудой входного сигнала и напряженностью электрического поля в мультиферроидной структуре ФП/СЭ была получена в работе [11] в следующем виде:

$$\left| E \right|^2 = C(\omega, k) |u|^2. \quad (6)$$

Для вывода нелинейного закона дисперсии воспользуемся линейным законом дисперсии (1) и подставим в него выражения (4), (5), (6) которые описывают нелинейные свойства среды. На рис. 2а показаны дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ, рассчитанные по полученному дисперсионному соотношению, в линейном случае при $|u|^2 = 0.001$ (штриховые кривые) и с учетом магнитной и электрической нелинейностей (сплошные кривые). В линейном случае видно формирование двух запрещенных зон — основной (показана светлой заливкой *b*) и гибридной (показана темной заливкой *c*). При увеличении амплитуды сигнала *u* основная и гибридная запрещенные зоны сдвигаются вниз по частоте.

Рассмотрим влияние амплитуды сигнала на формирование запрещенных зон более детально. На рис. 2б показан фрагмент дисперсионной характеристики ГЭМСВ в области гибридной запрещенной зоны (отмеченный овалом на рис. 1а). Штриховыми кривыми показаны дисперсионные в линейном случае $|u|^2 = 0.001$, сплошными кривыми показаны дисперсионные характеристики с учетом только магнитной нелинейности (сплошные кривые) при $|u|^2 = 0.01$. Из графика видно, что в нелинейном случае дисперсионные характеристики, а также центр запрещенной зоны сдвигаются вниз как по частоте (на 20 МГц), так и в сторону больших волновых чисел (на 1 см^{-1}).

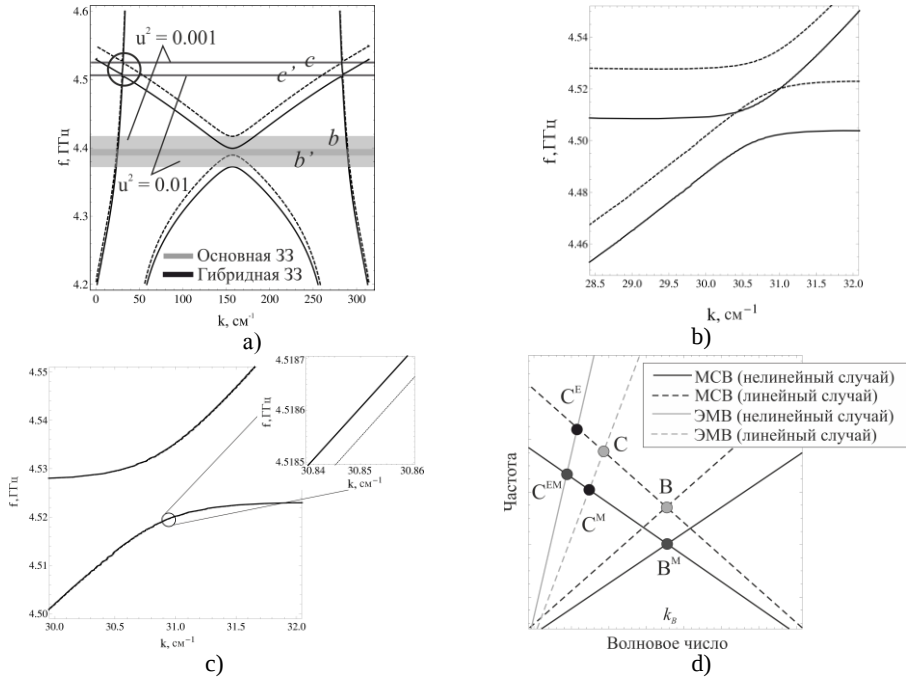


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ при $|u|^2 = 0.01$ (а) с учетом магнитной и электрической нелинейности, (б) с учетом только магнитной нелинейности, (с) с учетом только электрической нелинейности. На всех графиках дополнительно нанесены дисперсионные характеристики в линейном случае при $|u|^2 = 0.001$ (штриховые кривые), $\epsilon = 4000$, $a = 12$ мкм, $b = 11$ мкм, $L = 200$ мкм, $c = 100$ мкм, $S = 500$ мкм, $H_0 = 860$ Э, $4\pi\gamma M_0 = 1750$ Гс. (d) Схематическое изображение дисперсионных характеристик МСВ в изолированной ФП (темные линии) и ЭМВ в изолированном СЭ (светлые линии). Штриховыми линиями показаны линейные режимы, сплошными — нелинейные.

Fig. 2. HESW dispersion characteristics in MC/FE structure at $|u|^2 = 0.01$ (a) — with magnetic and electrical nonlinearity, (b) — only magnetic nonlinearity (c) — only electrical nonlinearity. Additional linear dispersion characteristics are shown at $|u|^2 = 0.001$ (dashed curves), $\epsilon = 4000$, $a = 12$ μm , $b = 11$ μm , $L = 200$ μm , $c = 100$ μm , $S = 500$ μm , $H_0 = 860$ Oe, $4\pi\gamma M_0 = 1750$ Gs (d) Schematic dispersion characteristics of spin waves in isolated ferromagnetic film (dark lines) and electromagnetic waves in isolated ferroelectric (light lines). Dashed lines show linear modes, solid — nonlinear modes

На рис. 2с показан тот же фрагмент дисперсионной характеристики с учетом только электрической нелинейности при $|u|^2 = 0.01$. Видно, что дисперсионные характеристики, а соответственно, и центр гибридной запрещенной зоны, сдвигаются вверх по частоте примерно на 0.05 МГц и в

сторону малых волновых чисел на 0.005 см^{-1} , т. е. влияние электрической нелинейности противоположно влиянию магнитной. Кроме того видно, что влияние магнитной нелинейности значительно превышает влияние магнитной на положение гибридной запрещенной зоны.

Влияние электрической и магнитной нелинейности может быть объяснено с помощью простых геометрических соображений. На рис. 2d показаны прямые и отраженные ПМСВ в изолированной ФП (темные линии), ЭМВ в изолированном СЭ (светлые линии). Штриховыми линиями показаны линейные режимы, сплошными — нелинейные. В линейном случае точке В будет соответствовать центр основной ЗЗ, а точке С — центр гибридной ЗЗ. При учете только магнитной нелинейности увеличение амплитуды приводит к уменьшению намагниченности МК в соответствии с (2). В результате происходит сдвиг дисперсионных характеристик вниз по частоте, и центр основной запрещенной зоны оказывается ниже по частоте (точка B^M), чем в линейном случае, показанном точкой В. Центр гибридной запрещенной зоны (точка С) сдвигается вниз по частоте и по волновому числу относительно линейного случая и попадает в точку C^M .

При учете только электрической нелинейности при увеличении амплитуды происходит уменьшение значения диэлектрической проницаемости СЭ, в соответствии с соотношением (3) (значение $N_\varepsilon < 0$ характерно для непрозрачных диэлектриков). В результате угол наклона ветви ЭМВ к оси волновых чисел увеличивается. В этом случае положение центра гибридной зоны сдвигается вверх по частоте (точка C^E) и вниз по волновому числу относительно линейного случая, показанного точкой С. На положение центра основной зоны электрическая нелинейность не влияет.

При учете обоих типов нелинейности центр гибридной запрещенной зоны будет расположен, соответственно, в точке C^{EM} , а центр основной зоны — в точке B^M . Видно, что действие электрической нелинейности на положение гибридной запрещенной зоны противоположно действию магнитной нелинейности. Теоретически, действия электрической и магнитной нелинейности могут быть скомпенсированы и сдвига гибридной запрещенной зоны при увеличении амплитуды не произойдет. Величина сдвига запрещенных зон определяется значениями коэффициентов нелинейности q , N_ε и $C(\omega, k)$.

В частности, для структуры на основе пленки ЖИГ (коэффициент нелинейности $q = 0.7$ в магнитном поле $H_0 = 860 \text{ Ое}$) и пластины титаната бария-стронция (БСТ) (характерное значение $N_\varepsilon = -7.696 \cdot 10^{-8}$) коэффициент связи $C(\omega, k) < 10$ во всем диапазоне частот ПМСВ. В связи с чем влияние электрической нелинейности незначительно, как видно из рис. 1а.

4. Заключение

Построена модель, описывающая дисперсионные характеристики ГЭМСВ в структуре МК/СЭ. Запрещенные зоны в такой структуре формируются за счет взаимодействия на частотах фазового синхронизма прямых и отраженных быстрых и медленных ГЭМСВ. Проведен учет двух типов нелинейности в системе — магнитной и электрической. Получено дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в структуре МК/СЭ с учетом обоих типов нелинейности и исследовано их влияние на характеристики запрещенных зон. Показано, что учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу основной и гибридной запрещенных зон вниз по частоте. Учет электрической нелинейности приводит к сдвигу только гибридной запрещенной зоны вверх по частоте, характеристики основной запрещенной зоны при этом не меняются. Для структуры на основе пленки ЖИГ и пластины БСТ влияние электрической нелинейности незначительно, влияние магнитной нелинейности более существенно и приводит к сдвигу запрещенных зон вниз по частоте на величину порядка 20 МГц.

Таким образом, мультиферроидные структуры на базе магнетонных кристаллов могут быть полезны при разработке систем частотной обработки СВЧ-сигналов в качестве узкополосных фильтров с возможностью электрического управления. Учет нелинейных эффектов позволит уточнить характеристики таких систем в случае распространения сигналов большой мощности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03049-мк).

Список литературы

- 1 Srinivasan G., Dong S., Viehland D., Bichurin M., Nan C. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. P. 31101.
- 2 Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182. С. 593—620.
- 3 Анфиногенов В. Б., Вербицкая Т. Н., Зильберман П. Е., Мериакри С. В., Огрин Ю. Ф., Тихонов В. В. Гибридные электромагнитно-спиновые волны в контактирующих слоях феррита и сегнетоэлектрика // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. С. 494—...
- 4 Анфиногенов В. Б., Вербицкая Т. Н., Зильберман П. Е., Мериакри С. В., Огрин Ю. Ф., Тихонов В. В. Резонансное взаимодействие магнитостатических и медленных электромагнитных волн в композитной среде пленка ЖИГ-сегнетоэлектрическая пластина // ПЖТФ. 1986. Т. 12. С. 938—943.
- 5 Demidov V. E., Kalinikos B. A., Edenhofer P. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structure // J. Appl. Phys. 2002. Т. 91. С. 10007.

- 6 Fetisov Y. K., Srinivasan G. Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 91. P. 10007.
- 7 Устинов А. Б., Калиникос Б. А., Сринивасан Г. Нелинейный сверхвысокочастотный фазовращатель на электромагнитно-спиновых волнах // ЖТФ. 2014. Т. 84, вып. 9. С. 146—148.
- 8 Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Никитов С. А. Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнанный кристалл — сегнетоэлектрик // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 5. С. 510—516.
- 9 Устинова И. А., Никитин А. А., Устинов А. Б. Динамический магнанный кристалл на основе феррит-сегнетоэлектрической слоистой структуры // ЖТФ, 2016. Т. 86, № 5. С. 155—158.
- 10 Устинов А. Б., Калиникос Б. А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнитных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств // ПЖТФ, 2014. Т. 40, № 13. С. 58—65.
- 11 Черкасский М. А., Никитин А. А., Калиникос Б. А. Теория мультинелинейных сред и ее приложение к солитонным процессам в феррит-сегнетоэлектрических структурах // ЖЭТФ, 2016. Т. 149, вып. 4. С. 839—847.
- 12 Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. San Diego : Academic press, 1999. 458 pp.
- 13 Морозова М. А., Матвеев О. В., Шараевский Ю. П., Никитов С. А. Управление запрещенными зонами в слоистой структуре магнанный кристалл — сегнетоэлектрик — магнанный кристалл // ФТТ. 2016. Т. 58, № 2. С. 266—272.

Информация об авторах

Морозова Мария Александровна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация; доцент кафедры нелинейной физики, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Матвеев Олег Валерьевич, младший научный сотрудник, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация.

Романенко Дмитрий Владимирович, ассистент кафедры нелинейной физики, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация.

Information about the authors

Maria A. Morozova, PhD in physics and mathematics, senior scientific researcher, Dolgoprudny, Russian Federation, associate professor of department of nonlinear physics, Saratov State University, Saratov, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Oleg V. Matveev, junior scientific researcher, Saratov State University, Saratov, Russian Federation.

Dmitrii V. Romanenko, assistant of department of nonlinear physics, Saratov State University, Saratov, Russian Federation.

Базовые станции 5G: возможности реализации в России¹

¹ Пономарев О. П., ¹ Мойсейченков А. Н., ² Бахтин А. А.,

² Омельянчук Е. В., ² Семенова А. Ю., ² Михайлов В. Ю.

¹ Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

ponomarev7713@mail.ru, a.n.moiseichenkov@urfu.ru

² Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники» (МИЭТ)

г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, г. Москва, 124498, Российская Федерация

bah@miee.ru, omelia4231@gmail.com, semenova.anastasia.y@gmail.com,

mikhvikt@gmail.com

Получено: 14 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Представлен краткий обзор состояния развития мобильной связи 5G в мире и в России на 2019 год. Рассмотрены пилотные проекты 5G в России и их особенности. Приведены основные требования к сетям пятого поколения мобильной связи, задачи, стоящие перед разработчиками, примеры аппаратных средств и краткие технические характеристики аппаратных средств российского производства, которые могут быть применены при создании оборудования базовых станций для сетей 5G. Описаны работы НИУ МИЭТ по разработке программно-алгоритмического обеспечения приемопередающей аппаратуры по требованиям пятого поколения мобильной связи. Дана оценка возможностей реализации в России базовых станций мобильной связи стандарта 5G, в том числе на базе аппаратных средств российских производителей. Сделаны выводы о перспективах внедрения сетей пятого поколения с использованием отечественной элементной базы и даны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: 5G, базовые станции, приемопередающая аппаратура, элементная база, импортозамещение.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пономарев О. П., Мойсейченков А. Н., Бахтин А. А., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю., Михайлов В. Ю. Базовые станции 5G: возможности реализации в России // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 334—348.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пономарев, О. П. Базовые станции 5G: возможности реализации в России / О. П. Пономарев, А. Н. Мойсейченков., А. А. Бахтин, Е. В. Омелянчук, А. Ю. Семенова, В. Ю. Михайлов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 334—348.

5G base station prototyping: implementation possibilities in Russia

O. P. Ponomarev¹, A. N. Moiseichenkov², A. A. Bakhtin²,
E. V. Omelyanchuk², A. Y. Semenova², and V. Y. Mikhailov²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)
19 Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation
ponomarev7713@mail.ru, a.n.moiseichenkov@urfu.ru

² National Research University of Electronic Technology (MIET)
Zelenograd, Shokin Square, bld. 1, Moscow, 124498, Russian Federation
bah@miee.ru, omelia4231@gmail.com, semenova.anastasia.y@gmail.com,
mikhvikt@gmail.com

Received: July 14, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: A brief overview of the development of UMT-2020 (5G) mobile communications in the world and in Russia is presented for 2019. 5G pilot projects in Russia are considered as well as their features. The basic requirements for 5G networks, the tasks facing developers, examples of hardware and brief technical specifications of hardware produced in Russia that can be used to create base station equipment for 5G networks are given. The work of MIET on the development of software and algorithmic support for 5G transceiver equipment is described. An estimation is given concerning the feasibility of implementing 5G generation mobile communication base stations in Russia, including on the basis of hardware from Russian manufacturers. Conclusions are drawn on the prospects for the implementation of fifth-generation networks using Russian hardware and some recommendations are offered.

Keywords: 5G, base stations, transceiver equipment, element base, import substitution.

For citation (IEEE): O. P. Ponomarev, A. N. Moiseichenkov, A. A. Bakhtin, E. V. Omelyanchuk, A. Y. Semenova, and V. Y. Mikhailov, “5G Base Station Prototyping: Implementation Possibilities in Russia,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 334–348. (In Russ.).

1. Введение

В настоящий момент операторами мобильной связи активно проводятся работы по тестированию и внедрению в эксплуатацию оборудования мобильной связи пятого поколения 5G (стандарт IMT-2020). Концепция создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации вошла в состав национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». В соответствии с паспортом программы [1] в России должны быть определены диапазоны радиочастот для создания сетей радиосвязи 5G и разработан проект дорожной карты высвобождения радиочастот в интересах внедрения технологии 5G/IMT-2020 до 30.09.2019 г. Концепция построения узкополосных беспроводных сетей связи «Интернета вещей» на территории Российской Федерации утверждена 29.03.2019 г. [2]. Реализация пилотных проектов в пяти отраслях экономики запланирована до 31.12.2020 г. Оператором дорожных карт по развитию технологий беспроводной связи 5G, промышленного интернета вещей IoT на период до 2024 г. определен Национальный центр информатизации Госкорпорации Ростех [3].

2. Краткий обзор состояния развития мобильной связи 5G

2.1. 5G в мире

Из открытых источников [4] известно о проектах зарубежных компаний, связанных с технологиями IMT-2020. Так, в 2019 г. компания T-Mobile Poland запустила сеть 5G в центре Варшавы. Компания Telia дополнила запуск фрагмента сети 5G в Швеции запуском фрагмента сети 5G в г. Таллинн. Компания Telenor Norway развернет новый пилотный проект на базе решения Ericsson, Huawei и Turkcell представили проект 5G-ориентированной базовой сети для облачных сред, Vodafone анонсирует запуск тестов 5G в Манчестере, Verizon запускает 5G в Чикаго и Миннеаполисе, ZTE Corporation и Qualcomm Technologies, Inc. совместно продемонстрировали сетевые сервисы 5G на базе комплексной коммерческой системы суб-6 ГГц. В Южной Корее установили 12 тыс. базовых станций 5G. К середине 2019 г. LG Uplus планирует установить еще 50 тыс. базовых станций (БС). Шанхай стал регионом, где есть одновременно покрытие 5G и гигабитная сеть широкополосной передачи данных. Компании NTT DoCoMo, KDDI, Softbank, Rakuten получили лицензии 5G в Японии, Swisscom и Ericsson 17.04.2019 г. запустили первую в Европе сеть 5G с поддержкой мобильности.

И это только часть из общего объема данных о внедрении 5G в мире. Как видно, в некоторых странах уже имеют значительные зоны покрытия

сети 5G, и все крупные операторы устанавливают БС нового поколения. Аналогичные тенденции наблюдаются и в России.

2.1. 5G в России

В открытых источниках сети Интернет опубликована информация о пилотных проектах, реализуемых в России. ПАО «Ростелеком» завершила тестирование сети 5G в Иннополисе, которое проводила с осени 2018 г. на оборудовании Huawei. Тесты показали пропускную способность до 2,1 Гбит/с на сектор и задержки порядка 1—3 мс [5]. ПАО «Ростелеком» также проводила испытания в Сколково на базе оборудования Nokia, в Эрмитаже г. Санкт-Петербург на базе технологий Ericsson. Операторы мобильной связи проводили тестовые испытания 5G во время чемпионата мира по футболу 2018 г. на базе зарубежного оборудования, в Казани — ПАО «МегаФон» с применением оборудования Nokia, Tele2 и МТС — с применением оборудования Ericsson. Базовые станции Ericsson AIR 6468 были установлены в Москве, Санкт-Петербурге, Казани, Ростове-на-Дону и др.

На заседании ГКРЧ [6] были рассмотрены и приняты решения о результатах исследований по использованию полосы радиочастот 3400—3800 МГц ПАО «МегаФон» и ПАО «Ростелеком». Определено, что электромагнитная совместимость РЭС сетей связи 5G с РЭС действующих радиослужб не обеспечивается, требуется проведение работ по оценке реализуемости и стоимости конверсии и перераспределения радиочастотного спектра. Минкомсвязи России будет подготовлен проект Плана конверсии радиочастотного спектра в интересах внедрения технологии 5G и определения возможности и условий использования соответствующих диапазонов частот.

Для Всемирной зимней универсиады 2019 г. в г. Красноярске Решением ГКРЧ разрешено использовать полосы радиочастот в диапазоне 5150-5725 МГц.

Решением ГКРЧ от 24.12.2018 г. для создания пилотных зон выделены полосы радиочастот 4800—4990 МГц и 27,1—27,5 ГГц на ряде территорий, в том числе в Дербенте, Екатеринбурге, Казани, Калининграде, Кемерове, Краснодаре, Москве, территории завода «Микрон» в г. Зеленоград и участке трассы М-11 в Московской области, Сколково, Мурманске, Санкт-Петербурге, Сочи, Томске, Ульяновске, Республике Татарстан. Заявку на тестирование технологии пятого поколения может подать любая заинтересованная организация. Результаты рассмотрения заявок планируется представить в ГКРЧ не позднее 01.06.2019 г. В 2020 г. в пяти районах Татарстана планируют запустить зону сети 5G.

Таким образом, развитие мобильных сетей в России имеет те же темпы, что и у ведущих стран, однако внедрение 5G происходит на базе оборудования зарубежных вендоров.

Центр компетенций НТИ «Технологии беспроводной связи и интернета вещей» в тестовой зоне отечественного оборудования 5G в Инновационном центре «Сколково» проводит совместные испытания с ПАО «Ростелеком» и ПАО «МегаФон» [7]. Главная задача тестовой зоны — стать независимой площадкой для непрерывной отладки и тестирования комплексных решений для сетей 5G на базе оборудования отечественных производителей. В испытаниях может принять любая компания, готовая предоставить телекоммуникационное оборудование российского производства или соответствующее программное обеспечение. Тестироваться могут решения для сетей 5G внутри и вне помещений, для дальней и средней по дальности связи, для большого и малого числа абонентских устройств. Диапазон используемых частот для тестирования от 4800 до 4990 МГц. Выходная суммарная мощность передатчиков не должна превышать 52 дБм. При этом используются ресурсы операторов «Ростелеком» и «Акадо». В число вендоров оборудования входят российские компании: ЭЛТЕКС, концерн «Созвездие», Радио-Гигабит, РТК-СТ, НПФ «Микран». Дорожная карта развития тестовой зоны 5G рассчитана до 2024 года. Результатом должно стать решение, использующее радиооборудование и ядро сети 5G российского производства.

3. Требования к 5G

К сетям 5G предъявляются следующие основные требования [8]:

- пиковая скорость 20 Гбит/с,
- скорость на одного пользователя 100 Мбит/с,
- спектральная эффективность 30 бит/с/Гц,
- задержки порядка 1 мс.

Помимо этого, в сетях IMT-2020 требуется сетевое покрытие в сложных ситуациях: при высокой мобильности абонентов, в районах с высокой плотностью населения, многолучевости из-за развитой инфраструктуры. Развитие Интернета вещей приводит к требованиям к увеличению плотности подключенных устройств до 1 млн терминалов на 1 км². Современные сети связи должны обеспечивать высокую надежность, глобальное покрытие, малую задержку при заметно увеличивающемся объеме передаваемых данных. Помимо этого, новые устройства должны обладать меньшим энергопотреблением, а сети развертываться за более короткое время.

Все эти требования соответствуют задачам разработчиков. В качестве основных таких задач можно выделить повышение спектральной эффективности до 30 бит/с/Гц, уменьшение задержки пользовательского уровня до 1 мс и построение высокоэффективных фазированных антенных решеток (ФАР) с совмещением частотных диапазонов и динамическим управлением их характеристиками направленности. Следует понимать, что для достижения спектральной эффективности 30 бит/с/Гц и пиковой пропускной способности БС в канале «вниз», равной 20 Гбит/с, необходима полоса не менее 667 МГц (линия «вниз») и 333 МГц (линия «вверх»). Тогда общая полоса частот должна составлять не менее 1 ГГц. По этой причине предпочтение часто отдается диапазону выше 6 ГГц.

4. Возможности отечественных предприятий в области 5G

Как известно из открытых источников, отечественные предприятия выпускают продукцию, которая может быть применена для производства оборудования БС и развертывания сетей 5G. Рассмотрим на примере нескольких предприятий, в том числе АО НПЦ «ЭЛВИС», АО «ПКК Миландр», АО «ВЗПП-С», АО «НПФ «Микран», МЦСТ и ИНЭУМ.

Акционерное общество Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы» (АО НПЦ «ЭЛВИС») [9] разрабатывает серию SDR-приемопередатчиков — перепрограммируемых аналогово-цифровых микросхем типа «система на кристалле», предназначенных для использования в телекоммуникационной аппаратуре и ФАР. Микросхема 1288XK1T — четырехканальный цифровой SDR-приемник Digital Down Converter (DDC) предназначен для построения приемных трактов систем радиосвязи и радиолокации.

Технические характеристики микросхемы следующие:

- четыре канала цифрового приемника с возможностью объединения каналов для построения широкополосного тракта,
- скорость отсчетов входного сигнала: свыше 100 Мвыб/с на каждый канал,
- тип входного сигнала: действительный 16-битный цифровой сигнал, комплексный 16-битный цифровой сигнал, комплексный 8-битный цифровой сигнал,
- наличие функции преобразования частоты действительного и комплексного сигнала,
- SFDR гетеродина: не хуже 100 дБ,
- точность настройки гетеродина: 0,025 Гц при частоте входных отсчетов 100 МГц,

- точность установки фазы гетеродина: $0,005^\circ$,
- двухкаскадный фильтр-дециматор с фиксированными коэффициентами в каждом канале (первый каскад: СИС-фильтр степени 2, второй каскад: СИС-фильтр степени 4, 5 или 6),
- общий коэффициент децимации: 1—16384,
- два программируемых фильтра-дециматора 64-го порядка с конечной импульсной характеристикой в каждом канале.

Производительность микросхемы достаточна для обработки четырех каналов узкополосной связи или одного канала широкополосной связи. На базе микросхемы 1288ХК1Т можно реализовать программно-перенастраиваемые фазированные и адаптивные антенные решетки, включая технологии «Smart Antenna» и ММО.

АО НПЦ «ЭЛВИС» производит процессоры серии «Мультикор» — однокристальные программируемые многопроцессорные «системы на кристалле» на базе библиотеки IP-ядер платформы «МУЛЬТИКОР» сочетающие в себе качества микроконтроллеров и цифровых процессоров обработки сигналов.

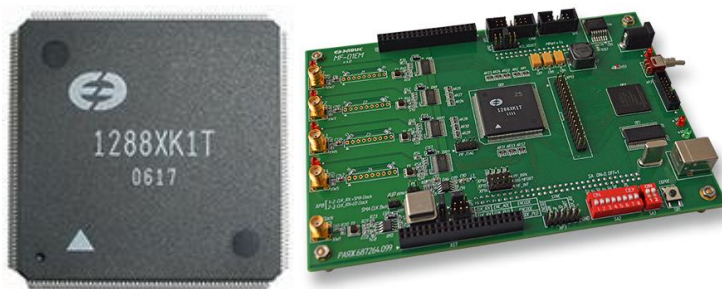


Рис. 1. Микросхема 1288ХК1Т и отладочная плата на базе микросхемы 1288ХК1Т (по материалам [9]).

Fig. 1. 1288XK1T IC and evaluation board [9]

АО «ПМК Миландр» производит: микроконтроллеры и процессоры, программно-отладочные средства, микросхемы памяти, интерфейсные микросхемы, радиочастотные микросхемы, микросхемы управления питанием, микросхемы преобразователей, микросхемы в пластиковых корпусах, радиационно стойкие микросхемы.

АО «ПМК Миландр» [10] разрабатывает синтезатор частот с дробным коэффициентом деления и встроенным ГУН и основной частотой до 6 ГГц на дифференциальных СВЧ выходах. АО «ПМК Миландр» выпускает микросхемы синтезатора частот с дробным коэффициентом деления

1508AC015, K1508AC015, K1508AC015K, 1508AC01H4, K1508AC01H4 с основной частотой до 12 ГГц. Микросхемы предназначены для построения блоков генераторов сигнала на основе фазовой автоподстройки частоты, которые могут быть применены в базовых станциях для мобильного радио, беспроводных локальных сетях, в космической радиолокации.



Рис. 2. Микросхема 1508AC015 и демонстрационная плата (по материалам [10]).

Fig. 2. 1508AC015 IC and evaluation board [10]

Акционерное общество «Воронежский завод полупроводниковых приборов — Сборка» (АО «ВЗПП-С») [11] производит программируемые логические интегральные схемы, которые функционально совместимы с изделиями фирмы Altera. Например, ПЛИС 5578TC094 ТУ — АЕНВ.431260.423ТУ предназначена для замены зарубежных микросхем EP3C25 Altera. Основные функциональные параметры таких схем следующие [12]:

- Емкость по числу системных вентилях — 1 200 000 шт.,
- Количество эквивалентных логических элементов — 24 624 шт.,
- Объем встроенной памяти — 594 Кбит,
- Количество умножителей 18×18 — 66 шт.,
- Количество выводов, программируемых пользователем — 195 шт.

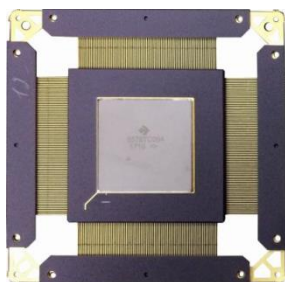


Рис. 3. ПЛИС 5578TC094 ТУ — АЕНВ.431260.423ТУ (по материалам [12]).

Fig. 3. 5578TC094 FPGA [12]

АО «НПФ «Микран» производит аппаратуру беспроводного широкополосного доступа на основе рекомендации IEEE 802.16-2004 WirelessMAN (WiMAX) в диапазоне частот 5,650—6,425 ГГц, имеющую следующие характеристики [13]:

- эффективное использование спектра (до 37 Мбит/с в полосе 10 МГц),
- отсутствие коллизий в эфире,
- устойчивая работа в условиях многолучевого приема,
- гарантированное качество обслуживания на уровне сервисных потоков,
- мультисервисность (голос, видео, данные),
- организация сетей с топологией «точка — много точек» и «точка — точка».

Также АО «НПФ «Микран» производит аппаратуру цифровых радиорелейных станций (ЦРРС) диапазонов 4—23 ГГц со скоростью передачи до 3,6 Гбит/с на интервал и антенных устройств для них в диапазоне 4—18 ГГц. Такая аппаратура при соответствующей адаптации может применяться в технологии Relay Node. Предприятие в настоящий момент также адаптирует технологию цифровых ФАР для использования в базовых станциях 5G [14].

Холдинг «Росэлектроника» 21 декабря 2017 г. приступил к выпуску транзисторов для сетей связи 5G. Речь идет о нитрид-галлиевых (GaN) транзисторов. Разработчик изделий — АО «НИИ электронной техники» (в составе холдинга входит в Концерн «Созвездие»). СВЧ/GaN-транзисторы в сетях связи позволят увеличить объемы передаваемого трафика за счет более широкого диапазона частот.

Выходная мощность таких приборов составляет от 5 до 50 Вт, коэффициент усиления по мощности — от 9 до 13 дБ, КПД стока — не менее 45 % на тестовых частотах 4 ГГц и 2,9 ГГц. Транзисторы полностью взаимозаменяемы с импортными аналогами, что позволяет не проводить дополнительных согласующих настроек в составе аппаратуры [15].

По результатам тестирования рабочей станции «Эльбрус 401-РС» на базе четырехъядерного процессора «Эльбрус 4С» для реализации безопасного режима вычислений в области релейной защиты автоматики электрических подстанций принято решение об изготовлении промышленного компьютера на базе процессора «Эльбрус 4С». По требованиям МЭК 61850 (IEC 61850) для устройств релейной защиты автоматики частота отправки сообщений трансформатором составляет 4 МГц [16]. Процессор «Эльбрус 4С» имеет тактовую частоту 800 МГц и поддерживает работу при скоростях передачи данных до 1000 Мбит/с.



Рис. 4. Рабочая станция «Эльбрус 401-PC» (по материалам [17]).

Fig. 4. «Elbrus 401-PC» workstation [17]

Компании МЦСТ и ИНЭУМ проводят ОКР по созданию микропроцессора «Эльбрус 16СВ», который планируется к выпуску в 2021 г. [18]. В табл. 1 представлено сравнение его параметров с параметрами процессоров фирмы Intel.

Таблица 1. Сравнение параметров микропроцессора «Эльбрус 16СВ» с параметрами микропроцессоров семейства Intel [18].

Table 1. Performance comparison between Elbrus and Intel processors [18]

Параметры	Intel Xeon E7-4850 v4	Intel Xeon Platinum 8153	«Эльбрус 16СВ»
Микроархитектура	Broadwell	Skylake	Эльбрус v6
Тактовая частота, ГГц	2,8	2,0 (2,8)	2,0
Пиковая производительность, Гфлопс	1075/538	1200/600 (1600/800)	1500/750
Число ядер	16	16 (28)	16
Объема кэша, МБ	40	38	Более 32
Пропускная способность памяти, ГБ/с	85	119	Более 100
Технологический процесс, нм	14	14	16
Потребляемая мощность, Вт	115	125	100
Отношение производительности к мощности, Гфлопс/Вт	4,7	4,8 (6,4)	7,5
Год выпуска	2017	2017	2021

ОАО «Байкал Электроникс» производит отечественную систему на кристалле на базе архитектуры MIPS Warrior P-class P5600, Baikal-T1 [19]. Устройство имеет следующие технические характеристики:

- 2 ядра P5600 MIPS 32 r5, рабочая частота 1,2 ГГц,
- Емкость кэша L2 — 1 Мбайт,
- Контроллер памяти DDR3-1600,
- Энергопотребление менее 5 Вт,
- Технологический процесс 28 нм,
- Интегрированные интерфейсы:
 - 1 порт 10 Gb Ethernet,
 - 2 порта 1 Gb Ethernet,
 - контроллер PCIe Gen.3,
 - 2 порта SATA 3.0,
 - порт USB 2.0.

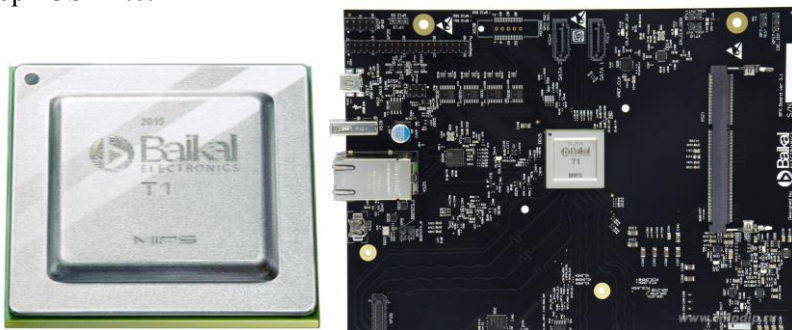


Рис. 5. Система на кристалле Baikal-T1 и компьютер на базе процессора Baikal-T1 (по материалам [19]).

Fig. 5. Baikal-T1 SoC and Baikal-T1 processor-based computer [19]

Кроме того, в настоящее время многие научные коллективы участвуют в разработке аппаратуры и технических решений для сетей 5G. В частности, в НИУ МИЭТ ведется работа по разработке приемопередающей аппаратуры для организации сетевого взаимодействия по требованиям пятого поколения мобильной связи. Разработка проводится на базе оборудования быстрого прототипирования и отладки компании National Instruments с использованием блоков USRP-2943R, работающих в диапазоне до 6 ГГц [20].

В ходе работы было разработано программно-алгоритмическое обеспечение экспериментального образца программно-аппаратного комплекса (ЭО ПАК) приемопередающей аппаратуры для организации сетевого взаимодействия по требованиям 5G в следующем составе:

- алгоритм определения местоположения радиосредств абонентов сети,
- алгоритм анализа эфира, определяющего занятость канала, уровень мощности шума, местоположение абонента и информации о состоянии канала,
- алгоритм реализации системы обработки сигнала множественного MIMO, включая программу определения условий распространения сигналов от разных лучей и компенсации интермодуляционных искажений,
- алгоритм реализации протоколов импульсной пакетной связи,
- алгоритм оценки и реализации предсказаний сигнала для компенсации пик-фактора,
- алгоритм реализации OFDM модулятора с универсальной фильтрацией (UF-OFDM) и циклическим префиксом (CP-OFDM),
- алгоритм управления средством связи в режиме программно-конфигурируемой сети (SDN).

Представленный обзор продукции отечественных предприятий позволяет делать выводы о возможности производства отечественного телекоммуникационного оборудования для сетей 5G в некоторой перспективе.

5. Заключение

Правительство РФ постановило сформировать до 1 января 2020 года единый реестр российской радиоэлектронной продукции, разработав перечень продукции, происходящей из иностранных государств, и порядок определения статуса телеком-оборудования отечественного производства. Соответствующее постановление кабмина от 10 июля 2019 года размещено на официальном интернет-портале правовой информации.

Согласно документу, в двухмесячный срок Минпромторгу поручено разработать порядок присвоения и подтверждения статуса телекоммуникационного оборудования российского происхождения и включения его в реестр, а также порядок проведения выездной проверки в целях экспертизы оборудования на территории заявителя. Кроме того, с 1 сентября 2019 года министерство обязано обеспечить формирование и ведение реестра в государственной информационной системе промышленности, до 1 января 2020 года утвердить требования по уровню локализации производства телекоммуникационного оборудования и методику определения российского происхождения такой продукции.

Работы по внедрению сети 5G в России проводятся многими научно-исследовательскими организациями и коллективами совместно с промыш-

ленными предприятиями. Базовые станции сети 5G могут быть созданы на основе существующих образцов телекоммуникационного оборудования российского производства на основе отечественных комплектующих с применением отечественного ПО. Для массового производства, адаптации в существующие сети мобильной связи и унификации телекоммуникационного оборудования российского производства с целью обеспечения коммерческой эксплуатации сетей 5G необходимо экстренно сформировать единые технические требования к программно-аппаратной платформе базовых станций, гармонизированные с документами IMT-2020.

Список литературы

1. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» / Правительство Российской Федерации. URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNL06gczMkPF.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
2. Приказ об утверждении Концепции построения и развития узкополосных беспроводных сетей связи «Интернета вещей» на территории Российской Федерации / Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/113-graficheskij-variant.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
3. Ростех подготовит дорожные карты для нацпроекта «Цифровая экономика» / Ростех. URL: www.rostec.ru/news/rostekh-podgotovit-dorozhnye-karty-dlya-natsproekta-tsifrovaya-ekonomika/ (дата обращения: 23.04.2019).
4. LTE Union / Союз операторов мобильной связи LTE. URL: <http://www.lteunion.ru/press/news/> (дата обращения: 30.08.2019)
5. В Иннополисе завершилось тестирование сети 5G: подробности / Inkazan. URL: <https://inkazan.ru/news/society/03-04-2019/v-innopolise-zavershilos-testirovanie-seti-5g-podrobnosti> (дата обращения: 30.08.2019).
6. Заседание ГКРЧ от 15 апреля 2019 года (протокол №19-49) / Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6454/#tdocumentcontent> (дата обращения: 30.08.2019).
7. Весь MIR узнал о тестовой зоне отечественного оборудования 5G в Сколково / Центр компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ) по направлению «Технологии беспроводной связи и интернета вещей». URL: <https://iot.skoltech.ru/2019/02/21/ves-mir-uznal-o-testovoj-zone-otechestvennogo-oborudovaniya-5g-v-skolkovo/> (дата обращения: 30.08.2019).
8. 3GPP Specification Set : 5G / 3GPP. URL: <https://www.3gpp.org/dynareport/SpecList.htm?release=Rel-15&tech=4&ts=1&tr=0> (дата обращения: 30.08.2019).
9. АО НПЦ «ЭЛВИС». URL: www.multicore.ru (дата обращения: 30.08.2019).
10. АО «ПМК Миландр». URL: www.milandr.ru (дата обращения: 30.08.2019).
11. АО «ВЗПП-С». URL: www.vzpp-s.ru (дата обращения: 30.08.2019).
12. АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов — Сборка» / АО «ВЗПП-С». URL: www.vzpp-s.ru/production/catalog.pdf (дата обращения: 30.08.2019).
13. Система беспроводного широкополосного доступа WiMIC-6000 / «Микран». URL: www.micran.ru/productions/telecommunication/wireless (дата обращения: 30.08.2019).

14. Компания «Микран» адаптирует технологию ЦФАР для использования в базовых станциях 5G / «Микран». URL: www.micran.ru/newsevents/news/330680 (дата обращения: 30.08.2019).
15. «Росэлектроника» приступила к выпуску транзисторов для сетей связи 5G / Ростех. URL: www.rostec.ru/news/4521887 (дата обращения: 30.08.2019).
16. Химич С. А., Колесов Ю. С., Глухов А. В., Шарафеев Т. Р. О реализации функций релейной защиты автоматики цифровых электрических подстанций с использованием вычислительных комплексов семейства «Эльбрус» // Радиопромышленность. 2019. № 29. С. 31—36.
17. Рабочая станция «Эльбрус 401-РС» (ТВГИ.466535.149) / ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука». URL: www.ineum.ru/arm-elbrus401 (дата обращения: 30.08.2019).
18. Ким А. К., Перекатов В. И., Фельдман В. М. На пути к российской экзасистеме : планы разработчиков аппаратно-программной платформы «Эльбрус» по созданию суперкомпьютера эксафлопсной производительности // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 6—13.
19. АО «БАЙКАЛ ЭЛЕКТРОНИКС». URL: www.baikalelectronics.ru (дата обращения: 30.08.2019).
20. Bakhtin A., Omelyanchuk E., Mikhailov V., and Semenova A., “5G Base Station Prototyping : Architectures Overview,” 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019. Pp. 1564–1568.

Информация об авторах

Пономарев Олег Павлович, доктор технических наук, профессор департамента радиоэлектроники и связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-4973-529X.

Мойсейченков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-2941-1298.

Бахтин Александр Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные системы» национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1107-0878.

Омельянчук Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Телекоммуникационные системы» национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0075-8383.

Семенова Анастасия Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Телекоммуникационные системы» национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-7835-4736.

Михайлов Виктор Юрьевич, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» национального исследовательского университета «МИЭТ», г. Москва, Российская Федерация., г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-2373-1124.

Information about the authors

Oleg P. Ponomarev, Full Professor, Faculty of Radio Electronics and Communications of Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation. ORCID 0000-0002-4973-529X.

Aleksandr N. Moiseichenkov, Assistant Professor, Department of Electrical Machinery of Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation. ORCID 0000-0002-2941-1298.

Aleksandr A. Bakhtin, Assistant Professor, Telecommunication Systems Department of National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1107-0878.

Elena V. Omelyanchuk, Senior Lecturer, Telecommunication Systems Department of National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0075-8383.

Anastasia Y. Semenova, Senior Lecturer Telecommunication Systems Department of National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-7835-4736.

Victor Y. Mikhailov, Graduate Student, Telecommunication Systems Department of National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0003-2373-1124.

Модель эффективного кодирования цветного изображения с учетом особенностей систем колориметрии¹

Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю.

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

ул. Авиамоторная, 8а, Москва, 111024, Российская Федерация

asykka@bk.ru, asa@mtuci.ru

Получено: 20 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В современном мире существует множество колориметрических систем, такие как RGB, XYZ и другие. Каждая из систем обладает своими достоинствами и недостатками. Однако при выборе определенной системы для передачи цветного изображения необходимо учитывать то, как повлияет на восприятие цвета человеческим глазом механизм коррекции, применяемый при передаче по каналу. Предложен алгоритм эффективного кодирования изображения при передаче с учетом особенностей систем колориметрии.

Ключевые слова: системы колориметрии, эллипсы мак-Адама, эффективное кодирование, средние риски, матрица рисков, матрица вероятностей.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Модель эффективного кодирования цветного изображения с учетом особенностей систем колориметрии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 349—360.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Аджемов, А. С. Модель эффективного кодирования цветного изображения с учетом особенностей систем колориметрии / А. С. Аджемов, А. Ю. Кудряшова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 349—360.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Effective coding model of color image based on features colorimetric systems

A. S. Adzhemov and A. Y. Kudryashova

Moscow Technical University of Communications and Informatics
8a Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russian Federation
asykka@bk.ru, asa@mtuci.ru

Received: July 20, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *In the modern world there are many colorimetric systems, such as RGB, XYZ and others. Each of the systems has its own advantages and disadvantages. However, when choosing a specific system for transmitting a color image, it is necessary to take into account how the correction mechanism used in channel transmission will affect the perception of color by the human eye. An algorithm is proposed for efficient image coding during transmission taking into account the peculiarities of colorimetry systems.*

Keywords: *colorimetry systems, Mac Adam ellipses efficient coding, medium risks, risk matrix, probability matrix.*

For citation (IEEE): A. S. Adzhemov and A. Y. Kudryashova, "Effective coding model of color image based on features colorimetric systems," *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 349–360. (In Russ.).

1. Введение

Учитывая то, что при передаче цветного изображения зрительная система человека может воспринимать окончательный, принятый вариант по-разному в зависимости от влияния различных параметров передачи, возникает задача оптимизации способа передачи изображения. Необходимо создать алгоритм, способный подстроиться под входные параметры передачи и закодировать изображение наиболее выгодным способом, несущим минимальные потери при передаче и окончательным восприятием экспертом (или человеком).

2. Основная часть

В современном мире передача изображения, в том числе передача телевизионного и видеосигнала осуществляется с использованием предварительной и восстанавливающей коррекцией по закону, который был обу-

словлен применением отображающих устройств на электронно-лучевых трубках. Если учитывать наличие нескольких каналов передачи видеoinформации, например, трех для цветного телевидения, то даже для первого случая при передаче сигналов применяется несколько цветовых моделей, например, RGB или YCrCb. При этом, с одной стороны, в каналах R, G, и B применяется не являющаяся оптимальной с позиции минимизации числа уровней квантования при визуальном контроле изображения гамма-коррекция, а с другой стороны, известно, что указанные модели не являются равноконтрастными, то есть, изменение, например, цветового тона или насыщенности на определенную величину будет в разной степени заметно в зависимости от выбора начальных значений координат выбранного цвета.

Если вести разговор о восприятии цвета и передачи цветных изображений, то нельзя не упомянуть такую науку как колориметрия. Колориметрия занимается цветовыми измерениями, это основа системы научного описания феномена цветового восприятия [1].

Рассмотрим природу цвета. Цвет — это атрибут зрительного ощущения и результат цветового восприятия, который зависит от трех компонентов. Цвет появляется за счет взаимодействия источника света, объекта и зрительной системы человека.

Если для возникновения цвета необходимы все три составляющие, то для создания системы колориметрии, необходимо определить их количественно. Источник света количественно описывается через спектральное распределение энергии, материальные объекты — через спектральное распределение энергии излучения, пропущенной ими или отраженной от них. Зрительная система человека же описывается количественно через ее способность к выявлению цветовых соответствий.

Концепция одной из современных колориметрических систем - RGB, состоит в том, что цветовые соответствия могут быть описаны как количества трех аддитивных первичных световых потоков, необходимых для достижения визуального соответствия тому или иному стимулу. Это иллюстрирует формула цвета 1.

$$C = R(r) + G(g) + B(b) \quad (1)$$

где R, G, B — количество единиц кардинального стимула r, g, b соответственно.

Таким образом, любой цвет может быть визуально уравнен точными количествами трех кардинальных стимулов. Следовательно, эти количества в совокупности с характеристиками самого набора кардинальных стимулов, позволяют специфицировать цвет [2].

Данная система координат является исходной точкой построения других колориметрических систем цветовых пространств и использует реально существующие цвета, а именно R (Red) — красный, G (Green) — зеленый, B (Blue) — синий. Данная система построена на кривых смешения цветов RGB, экспериментальные данные удалось усреднить и интерпретировать как кривые сложения цветов для стандартного наблюдателя. Кривые обозначаются как $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$. На рисунке 1 показана зависимость координат цвета от длины волны. Следует отметить, что из-за отрицательных значений красного цвета в определенном диапазоне, данная система не охватывает спектральные и пурпурные цвета.

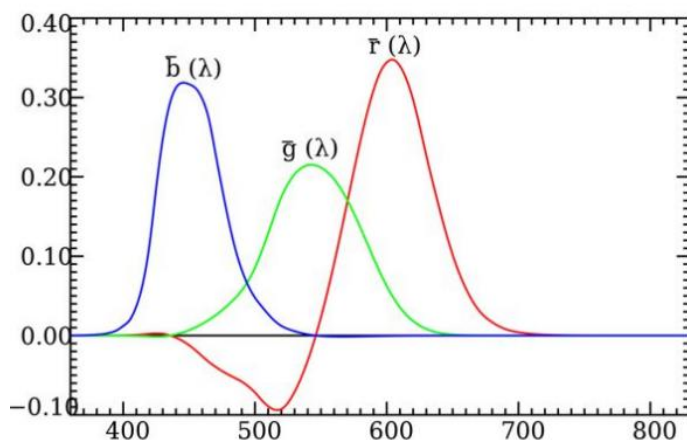


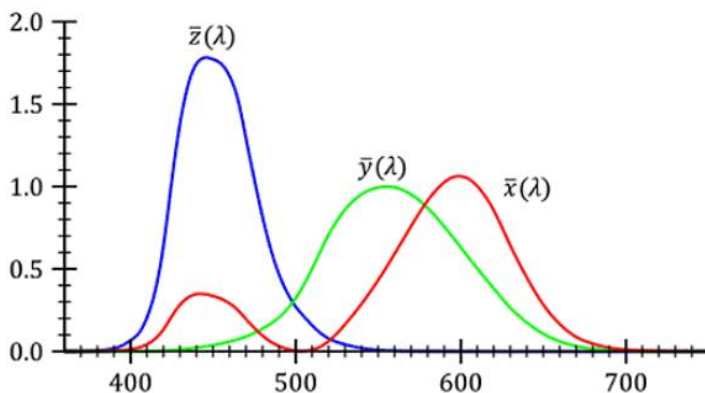
Рис. 1. Кривые сложения цветов RGB систем координат при $R=700\text{ нм}$, $G=546.1\text{ нм}$, $B=435.8\text{ нм}$.

Fig. 1. Color addition curves of RGB coordinate systems at $R = 700\text{ nm}$, $G = 546.1\text{ nm}$, $B = 435.8\text{ nm}$

Для более эффективного применения кривые сложения RGB были подвергнуты линейному математическому преобразованию, в результате чего были получены новые кривые сложения $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$. Данные кривые получили название кривые сложения цветов стандартного колориметрического наблюдателя [3].

Цвета X, Y, Z в отличие от R, G, B реально не существуют и играют лишь вспомогательную математическую роль. Переход от основных цветов RGB к XYZ происходит в соответствии с рекомендацией МКО по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X &= 0.49000 R + 0.31000 G + 0.20000 B, \\ Y &= 0.17697 R + 0.81240 G + 0.01063 B, \\ Z &= 0.00000 R + 0.01000 G + 0.99000 B. \end{aligned} \quad (2)$$

Рис. 2. Кривые сложения $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$.Fig. 2. Addition curves $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$

Недостатком системы XYZ является то, что в диапазоне длин волн от 380 нм до 460 нм значения функции сложения цветов слишком малы, а одинаковым изменениям координат цвета не соответствует равнозначные изменения цветовых ощущений, т. е. ощущения при изменении координат между двумя соседними точками в одной области цветового пространства будут более заметны, чем при изменении координат в другой области цветового пространства. Данный недостаток выявился в ходе экспериментов Мак Адама, в ходе которых он четко показал, что изменения координат цвета по ощущению наблюдателя различны для различных областей и имеют форму эллипса, а не круга. Кроме того, на пурпурных оттенках человеческий глаз заметит ошибку с большей вероятностью, чем на других оттенках из заданного диапазона [4].

При передаче видеосигнала из соображений экономии и монохромной совместимости чаще используют не сигналы RGB, а другой набор компонентных сигналов — сигнал яркости и два цветоразностных сигнала — параллельный аналоговый компонентный стык YPrPb.

В стандартном стыке YPrPb размахи цветоразностных сигналов Pr и Pb совпадают с размахом сигнала яркости Y и размахом сигналов первичных цветов R, G, B. Отсюда легко вычислить масштабные коэффициенты:

$$Pr = 0.71327 (R - Y) \text{ и } Pb = 0.56433 (B - Y) \quad (3)$$

Сигнал яркости чаще всего формируется из следующего соотношения:

$$Y = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B \quad (4)$$

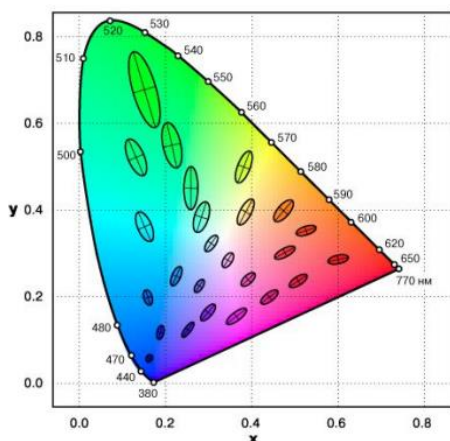


Рис. 3. Эллипсы Мак-Адама.

Fig. 3. McAdam's Ellipses

Несмотря на обратимость линейного матричного преобразования сигналов RGB в YPrPb, сигналы RGB, восстановленные из записанных сигналов YPrPb, не являются точной копией исходных, прежде всего из-за ограничения полосы частот в каналах Pr и Pb.

Если рассмотреть два стандарта кодирования цветного изображения для цифровой передачи — ITU 525/59.94 и ITU 625/50, то число отсчетов в обоих стандартах для сигнала яркости — 720, а число отсчетов для цветоразностных сигналов — 360 на каждый. Количество бит на отсчет равно 8, уровни квантования с 1 по 254 отведены для видеосигнала, уровни 0 и 255 — зарезервированы для синхронизации [5].

Однако было выявлено, что при использовании любой системы колориметрии будут найдены те или иные недостатки при окончательном восприятии изображения человеческим глазом. А это значит, что необходимо оптимизировать сам способ передачи изображения, в данном случае остановимся на способе кодирования и попытаемся найти вариант, оптимальный для любой системы, алгоритм, который в зависимости от входных параметров системы будет предлагать различные варианты кодирования.

С учетом вышеуказанных недостатков системы колориметрии и специфики восприятия человеческого зрения можно предложить иную модель кодирования цветного изображения для передачи цифровым сигналом. Для начала рассмотрим статистические меры, которые могут рассматриваться как входные и выходные параметры, рассчитываемые алгоритмом. На их основе будет производиться поиск оптимального варианта кодирования для конкретного заданного случая.

Для оценки качества приема рассматривают меру расхождения принятого сигнала относительно переданного. Часто такой мерой является средняя вероятность ошибки P_e . Оптимальный приемник обеспечивает минимум этой вероятности при заданных условиях передачи и выбранной модели помех.

Для реального приемника — это потенциальная граница и оценка эффективности его реализации.

Средний риск. В задачах проверки гипотез H_i , $i = \overline{0, M-1}$ задается матрица потерь $\mathbf{P} = [\Pi_{ij}]$, $i, j = \overline{0, M-1}$. Кроме того, наряду с заданием канала $(X, Y, P_{y|x})$, полагается известной вероятностная мера p_x . Для дискретного источника она определяется распределением вероятностей гипотез: $p_i = p(H_i)$, $i = \overline{0, M-1}$. Средний риск вводится как математическое ожидание матрицы потерь [6]:

$$\bar{R} = M\{\Pi_{ij}\} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} \Pi_{ij} \cdot p(H_i \cap H_j) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} \Pi_{ij} \cdot p(H_j) \cdot p(y \in Y_i | H_j) \quad (5)$$

Учитывая, что условные вероятности $p(y \in Y_i | H_j)$ выражаются через функцию правдоподобия $p(y \in Y_i | H_j) = \int_{Y_i} l_i(y) dy = \int_{Y_i} W(y | H_j) dy$, окончательно получаем:

$$\bar{R} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} \Pi_{ij} \cdot p(H_j) \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (6)$$

Средняя вероятность ошибки. Ошибка возникает, когда гипотеза γ_i не совпадает с истинной гипотезой H_i . При $i = j$ выносится правильное решение. Если матрица потерь простая, т.е., $\Pi_{ij} = 1 - \delta_{ij}$ где δ_{ij} — символ Кронекера, то получаем [7]:

$$\bar{R} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} p_j \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (7)$$

В данном случае средний риск — это средняя вероятность ошибки P_e . Эквивалентный критерий — средняя вероятность правильного приема: $p_{pr} = 1 - P_e$.

Апостериорная вероятность гипотезы. Если Π_{ij} не известна, то выбирают критерий, где ее нет, например, апостериорная вероятность гипотезы, вытекающая из формулы Байеса:

$$p(H_i | y) = \frac{p(H_i) \cdot W(y | H_i)}{\sum_{i=0}^{M-1} p(H_i) \cdot W(y | H_i)} \quad (8)$$

Байесовский показатель оптимальности основан на минимизации критерия среднего риска:

$$\bar{R}_B = \min \bar{R} = \min \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pi_{ij} \cdot p(H_j) \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (9)$$

Решение выносится в пользу той гипотезы H_i , для которой обеспечивается минимум среднего риска.

Показатель минимума средней вероятности ошибки (показатель Зигерта — Котельникова). В этом случае используется критерий минимизации средней вероятности ошибки [8]:

$$\overline{R_{ZK}} = \min \overline{p_e} = \min \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} p_j \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (10)$$

Этот показатель называют еще показателем «идеального наблюдателя», полагая, что некоторый «наблюдатель» на приеме задает матрицу Π_{ij} так, что ее элементы равны 0 при правильных решениях $i = j$, а при ошибочных решениях $i \neq j$ равны 1 [9].

На практике часто применяют эквивалентный показатель максимума правильного решения:

$$\max p_{pr} = \max \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} p_i \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (11)$$

Показатель максимума апостериорной вероятности задается так: среди множества гипотез H_j , $j = \overline{0, M-1}$ выбирается такой номер i , при котором достигается максимум:

$$i = \underbrace{\arg \max_{0 \leq j \leq M-1}}_{\substack{0 \leq j \leq M-1}} p(H_j | y) = \underbrace{\arg \max_{0 \leq j \leq M-1}}_{\substack{0 \leq j \leq M-1}} \left\{ p_j \frac{W(y | H_j)}{W(y)} \right\} \quad (12)$$

Минимаксный показатель оптимальности. Если не известна вероятностная мера p_x источника ДС, то предлагается минимизировать средний риск в условиях худшей меры:

$$\max_{0 \leq j \leq M-1} \min \bar{R} = \max_{0 \leq j \leq M-1} \min \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} \Pi_{ij} p_j \int_{Y_i} W(y | H_j) dy \quad (13)$$

В теории статистических решений показывается, что решение по данному показателю будет таким же, как если использовать условные риски

$$\bar{R}_j = \sum_{i=0}^{M-1} \Pi_{ij} \cdot \int_{Y_i} W(y | H_j) dy, \text{ а решение основывались бы на показателе оптимальности вида: } \min \max_{0 \leq j \leq M-1} \bar{R}_j$$

Показатель оптимальности Неймана — Пирсона. При приеме двоичных ДС есть две гипотезы H_0 — основная и H_1 — альтернативная [10, 11]. Будем проверять гипотезу H_0 против H_1 . При этом возможны два ошибочных решения α и β , оцениваемых условными вероятностями [12]:

$$\alpha = p(H_1 | H_0) = \int_{Y_1} W(y | H_0) dy \text{ и } \beta = p(H_0 | H_1) = \int_{Y_0} W(y | H_1) dy \quad (14)$$

Здесь Y_0 — область принятия гипотезы, а Y_1 — область ее отвержения. Если наблюдение (сигнал) y попадает в Y_1 , так что отвергается гипотеза H_0 , а на самом деле она являлась истинной, то говорят об ошибке первого рода с вероятностью α .

Если же y попадает в Y_0 , а правильной являлась H_0 , то говорят об ошибке второго рода с вероятностью β . Помимо вероятностей α и β рассматриваются вероятности правильных решений, вычисляемых по формулам:

$$p(H_0 | H_0) = 1 - \alpha \text{ и } p(H_1 | H_1) = 1 - \beta \quad (15)$$

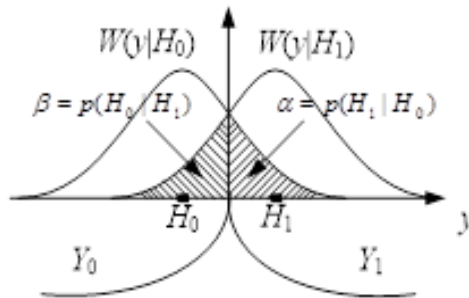


Рис. 4. Области принятых и отвергнутых гипотез.

Fig. 4. Areas of accepted and rejected hypotheses

Из всех вышеперечисленных методов наиболее выгодным вариантом будет являться использование метода нахождения среднего риска при кодировании сигнала. Это обусловлено тем, что при использовании данного метода можно задать матрицу потерь, исходя из конкретных характеристик передаваемого сигнала, а затем легко вычислить среднее значение риска или дисперсию величины риска.

Таким образом, возможно эффективно закодировать изображение, следуя предлагаемому алгоритму:

- 1) Составление матрицы рисков вида:

$$R = \begin{Bmatrix} r_{0,0} & \dots & r_{0,255} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{255,0} & \dots & r_{255,255} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

С помощью матрицы рисков появляется возможность выявления наиболее и наименее «ценных» элементов передаваемой информации.

- 2) Составление матрицы вероятностей появления риска искажения вида:

$$P = \begin{Bmatrix} p_{0,0} & \dots & p_{0,255} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{255,0} & \dots & p_{255,255} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

С помощью матрицы вероятностей появляется возможность определения риска появления искажения каждого передаваемого элемента [13].

- 3) Составление вектора появления элемента в канале передачи вида:

$$P_c = \begin{Bmatrix} p_0 \\ \dots \\ p_{255} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

С помощью вектора удобно определять вероятности появления значения сигнала в канале.

- 4) После введения всех характеристик кодирования, перейти к вычислению коэффициента рисков искажений:

$$K = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (r_{i,j} \cdot p_{i,j}) \cdot P_i \quad (19)$$

- 5) Вычисление дисперсии величины риска варианта кодирования:

$$D(R) = M(R^2) - (M(R))^2 \quad (20)$$

где $M(R) = K$ — математическое ожидание величины риска [14].

Упростим формулу, используя указанное равенство:

$$D(R) = M(R^2) - K^2 \quad (21)$$

Формула математического ожидания квадрата величины риска:

$$M(R^2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ((r_{i,j})^2 \cdot p_{i,j}) \cdot P_i \quad (22)$$

Очевидно, что число вариантов кодирования равно 256^3 ! Это число очень большое для ручных расчетов, однако при автоматизации расчетов «наилучший» вариант кодирования найти становится более реальным.

3. Заключение

Таким образом, удалось предложить алгоритм выбора наиболее «эффективного» варианта кодирования цветного изображения с учетом особенностей выбранной системы колориметрии и восприятия изменения цветности человеческим глазом. Алгоритм базируется на методе средних рисков, учитывает значения рисков при переходе элемента передачи в другой и самого в себя, а также вероятности появления данных рисков. В дальнейшем исследование предполагает разработку программного алгоритма для автоматизации предложенного выбора.

Список литературы

1. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Особенности оценки качества передачи сигналов в различных метрических пространствах // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17, № 4. С. 886—888.
2. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. About features of evaluation of the quality of generation and signal processing at stage transformations in wiring and optical communication systems // IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, 2018. Pp.1–4.
3. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Features rate estimation options binary codewords with the digitalization of the signal // IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Minsk, 2018. Pp. 1–5.
4. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Building an Algorithm for Estimating the Effective Coding of a Source when Converting Signals in Various Metric Spaces // IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). S.-Petersburg, 2018. Pp. 1–4.
5. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Об особенностях оценки качества преобразования сигналов при последовательных преобразованиях в различных метрических пространствах // Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». 2018. С. 211—213.

6. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Особенности оценки мощности множества вариантов выбора двоичных кодовых комбинаций при цифровизации сигнала // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9, № 1. С. 5—8.
7. Кудряшова А. Ю. Особенности оценки кодирования при различных конфигурациях пространства источника // DSPA : Вопросы применения цифровой обработки сигналов, 2018. Том 8, № 3. С. 228—232.
8. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y., Application of Weber-Fechner Law in Image Transmission in the Field of Onboard Communications // IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (ON BOARD 2019). Moscow, 2019. Pp.1–6.
9. Баталов А. Э., Синева И. С. Алгоритмы генетического кодирования при различных конфигурациях пространства источника // T-COMM : телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 7. С. 53—59.
10. Фенчук М. М., Синева И. С. Оптимизация алгоритма генетического кодирования для пространств произвольных размерностей // T-COMM: телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 7. С. 74—79.
11. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Model of Effective Color Image Coding Taking into Account the Peculiarities of Colorimetry System // IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Yaroslavl, 2019. Pp. 1–4.
12. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Evaluation program of an efficient source coding algorithm under the condition of converting metric spaces // IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). S.-Petersburg, 2019. Pp. 1–5.
13. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю., Долгопятова А. В. Построение эффективного алгоритма оценки кодирования источника при преобразовании метрических пространств // Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». 2019. С. 195—198.
14. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Model of Effective Color Image Coding Taking into Account the Peculiarities of Colorimetry System // IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Yaroslavl, 2019. Pp. 1–4.

Информация об авторах

Аджемов Артем Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кафедры общей теории связи Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1616-323X.

Кудряшова Анастасия Юрьевна, аспирант, ассистент кафедры общей теории связи Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3673-7667.

Information about the authors

Artem S. Adzhemov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the General Theory of Communications of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1616-323X.

Anastasiya Y. Kudryashova, graduate student, assistant at the Department of General Theory of Communications, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-3673-7667.

УДК 621.391.019

Метод оптимальной передачи двоичных сообщений без межсимвольной интерференции с учетом пространственно-временного кодирования по Аламоути¹

¹ Санников В. Г., ² Волчков В. П.

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

ул. Авиомоторная, 8а, Москва, 111024, Россия

¹tes_mtuci@mail.ru, ²volchkovvalery@mail.ru

Получено: 22 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Исследуется система передачи данных с многочастотной модуляцией и оптимальными финитными сигналами, не вызывающих межсимвольной интерференции в канале связи. Для каждого индивидуального канала системы разработана новая структура оптимального когерентного модема. С целью повышения спектральной эффективности системы введена трехэтапная модель ортогонализации канальных сигналов. Для повышения энергетической эффективности системы в канальных модемах реализован метод пространственно-временного кодирования по Аламоути. Анализ спектрально-энергетической эффективности системы показывает преимущество новой схемы организации канальных модемов по сравнению с известными современными модемами.

Ключевые слова: система передачи данных, многочастотная модуляция, когерентный модем, оптимальные финитные сигналы без межсимвольной интерференции, спектрально-энергетическая эффективность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Санников В. Г., Волчков В. П. Метод оптимальной передачи двоичных сообщений без межсимвольной интерференции с учетом пространственно-временного кодирования по Аламоути // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 361—371.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Санников, В. Г. Метод оптимальной передачи двоичных сообщений без межсимвольной интерференции с учетом пространственно-временного кодирования по Аламоути / В. Г. Санников, В. П. Волчков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 361—371.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

The method of optimal transmission of binary communication without intersymbolic interference, taking into account space-time coding by Alamouty

V. G. Sannikov¹ and V. P. Volchkov²

Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUSI)

8a, Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russia

¹tes_mtuci@mail.ru, ²volchkovvalery@mail.ru

Received: July 22, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The system of transmission of data with multi-frequency modulation and optimal finite signals that do not cause inter-symbolic interference in the communication channel is investigated. A new structure of the optimal coherent modem has been developed for each individual channel of the system. In order to improve the spectral efficiency of the system, a three-stage model of orthogonization of canal signals has been introduced. To improve the energy efficiency of the system in channel modems implemented the method of space-time coding on Alamouty. Analysis of the spectral-energy efficiency of the system shows the advantage of the new scheme of organization of channel modems compared to known modern modems.

Keywords: data transmission system, multifrequency modulation, coherent modem, optimal finite signals without inter-symbolic interference, spectral-energy efficiency.

For citation (IEEE): V. G. Sannikov et al. "Method of optimal transmission of binary messages without inter-symbolic interference taking into account space-time coding by Alamouty," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 361–371, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Развитие современных систем передачи данных (СПД) предполагает постоянное повышение их эффективности и помехоустойчивости [1]. В условиях частотно-ограниченного канала связи (КС) основными препятствиями повышения эффективности СПД являются шумы КС и межсимвольная интерференция (МСИ) [2, 3]. При этом с увеличением скорости цифровых данных доминирующее влияние на снижение качества связи оказывает МСИ. Поэтому актуальным направлением в решении задачи повышения эффективности и помехоустойчивости СПД является разработка новых оптимальных методов передачи данных без МСИ.

В цифровых КС для уменьшения МСИ часто применяют методы многочастотной модуляции (МЧМ) с узкополосными поднесущими и спектрально-эффективными сигналами [4, 5].

Использование узкополосных (полосовых) фильтров (ПФ) позволяет синтезировать в модуляторах СПД оптимальные финитные сигналы (ОФС), принципиально не вызывающие на выходах ПФ МСИ [6, 7]. При этом в демодуляторах вместо сложного приема в целом и эквалайзеров, осуществляется простой поэлементный прием на фильтры (СФ), согласованные с ОФС, обладающих потенциальной помехоустойчивостью [8].

Другим важным направлением развития современных СПД является внедрение технологий с несколькими передающими и приемными антеннами [9]. Использование таких технологий необходимо для противодействия деструктивному действию замираний в КС, а также позволяет резко улучшить такие характеристики СПД, как энергетический выигрыш и выигрыш в скорости передачи информации. Эти преимущества реализуются в системах с пространственно-временным кодированием (ПВК) [9].

В работе дан новый метод применения в многочастотном модеме с оптимальными финитными сигналами пространственно-временного кодирования по Аламоути.

2. Объект исследования

Объектом исследования является многоканальная СПД с узкополосными сигналами [8]. В индивидуальных **модуляторах** двоичные данные преобразуются в спектрально-эффективные символы квадратурной амплитудной модуляции (КАМ), которые управляют параметрами канальных гармонических колебаний на частотах $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$, вырабатываемых формирователем сетки частот; на выходах ПФ_n формируются узкополосные сигналы $s_n(t), n = \overline{1, N}$, а на выходе сумматора групповой сигнал $s(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t)$. Разделение канальных сигналов в **демодуляторе** выполняется полосовыми фильтрами и когерентными детекторами.

Недостаток данной организации СПД в наличии межканальных искажений (МКИ) и межсимвольной интерференции (МСИ) на выходах ПФ. Для уменьшения МКИ используют ПФ с узкими полосами частот и высокими порядками, а для уменьшения МСИ проводят не всегда эффективный синтез огибающей сигнала $s(t)$ [2, 3].

В данной работе с целью повышения спектрально-энергетической эффективности СПД с МЧМ разработана и анализируется новая структур-

ная схема индивидуального модулятора/демодулятора (модема) с комплексными ОФС, принципиально не вызывающих МСИ на выходах ПФ модема, и пространственно-временным кодированием по Аламоути.

Схема исследуемого модема изображена на рисунке 1.

Здесь введены следующие обозначения: БУД — блок управления длительностью символа, ФОС — формирователь оптимального сигнала, ВМЛ — вычислитель множителей Лагранжа, ГНК — генератор несущего колебания, ФВ — фазовращатель, ПВК — пространственно-временной кодер, СД — синхронный детектор, СВН — схема восстановления несущей, П/П — последовательно-параллельный преобразователь, БОП КС — блок оценки параметров канала связи, ПВД — пространственно-временной декодер, СФ — согласованный фильтр, МПРУ — многопороговое решающее устройство.

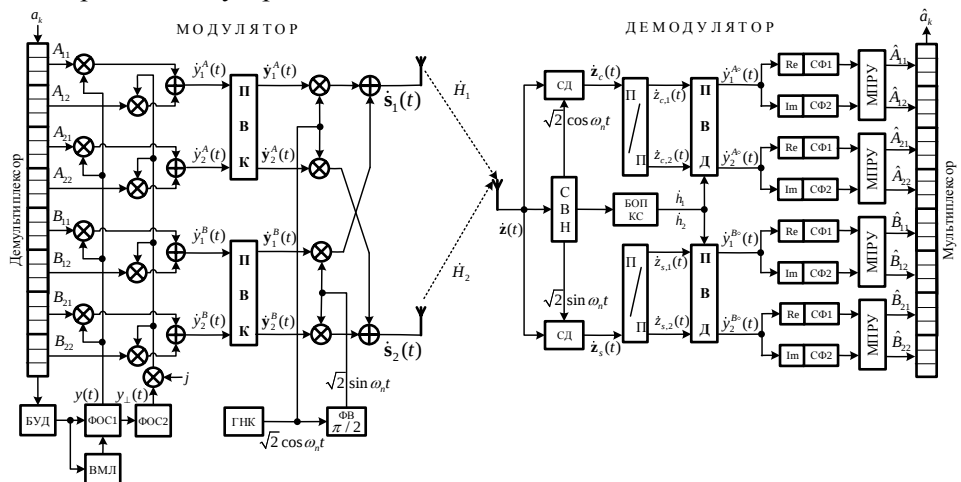


Рис. 1. Структурная схема индивидуального модема в системе передачи данных с многочастотной модуляцией.

Fig. 1. Structure of individual modem in multi-frequency modulation data transmission system

3. Работа и основные соотношения модулятора

Двоичное сообщение $a(t_k) = a_k, k = 0, 1, 2, \dots$, в виде «быстрого» потока импульсов, принимающих на длительности бита T_b значения «0», либо «1», в **демультимплексе** на длительности символа T_s разбивается на группы по m бит и преобразуется в $K = T_s / T_b$ «медленных» $M = 2^m$ -ичных импульсных потоков, с длительностью импульсов $T_m = mT_b$. Затем в моду-

ляторе проводится обработка этих данных с учетом n_0 ортогональных процедур. Первая ортогональная процедура образуется за счет перехода от двух скалярных ортогональных ОФС к одному комплексному ОФС. Вторая реализуется за счет использования двух, не перекрывающихся по времени полуинтервалов, каждый длительностью $T_s / 2$. Третья ортогональная процедура получается путем использования двух ортогональных гармонических сигналов: $\sqrt{2} \cos \omega_n t$ и $\sqrt{2} \sin \omega_n t$. На рисунке 1 рассматривается случай, когда $T_s = 2^3 T_b = 24 T_b$ — память демультимплексора.

Перейдем к математическим представлениям сигналов в различных сечениях модулятора. На выходе демультимплексора в моменты кратные T_m формируются амплитуды M -ичных импульсов сигнала МАМ вида

$$\begin{aligned} A_{11} &= (2i_1 - 1 - M)d, i_1 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{i_1,v} 2^v, & B_{11} &= (2i_2 - 1 - M)d, i_2 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{i_2,v} 2^v, \\ A_{12} &= (2j_1 - 1 - M)d, j_1 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{j_1,v} 2^v, & B_{12} &= (2j_2 - 1 - M)d, j_2 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{j_2,v} 2^v, \\ A_{21} &= (2k_1 - 1 - M)d, k_1 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{k_1,v} 2^v, & B_{21} &= (2k_2 - 1 - M)d, k_2 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{k_2,v} 2^v, \\ A_{22} &= (2l_1 - 1 - M)d, l_1 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{l_1,v} 2^v, & B_{22} &= (2l_2 - 1 - M)d, l_2 = \sum_{v=0}^{m-1} \alpha_{l_2,v} 2^v. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\{\alpha_{\mu,v}\}$ — двоичные символы сообщения, $2d$ — расстояние между сигнальными точками случайных величин в (1) или энергетическая база сигнала МАМ [1].

Далее на выходах умножителей (рис. 1) формируются взвешенные ОФС1 и ОФС2, которые затем суммируются с весом $j = \sqrt{-1}$, образуя комплексные ОФС вида

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^A(t) &= A_{11}y(t) + jA_{12}y_{\perp}(t), & \dot{y}_1^B(t) &= B_{11}y(t) + jB_{12}y_{\perp}(t), \\ \dot{y}_2^A(t) &= A_{21}y(t) + jA_{22}y_{\perp}(t), & \dot{y}_2^B(t) &= B_{21}y(t) + jB_{22}y_{\perp}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) $y(t)$ и $y_{\perp}(t)$ — взаимно ортогональные ОФС1 и ОФС2. В качестве примера на рисунке 2 приведены формы и спектры ОФС, синтезируемых по критерию максимума отношения сигнал/шум в центре интервала длительностью $T_s = 1.5$ мс, на выходе ПФ Баттерворта 8-го порядка [6].

В блоках пространственно-временного кодирования (ПВК) по правилу Аламоути [9] на основе входных сигналов (2) формируются векторные комплексные сигналы вида

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1^A(t) \\ \dot{y}_2^A(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1^A(t), & -\dot{y}_2^{*A}(t) \\ \dot{y}_2^A(t), & \dot{y}_1^{*A}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{y}_1^B(t) \\ \dot{y}_2^B(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1^B(t), & -\dot{y}_2^{*B}(t) \\ \dot{y}_2^B(t), & \dot{y}_1^{*B}(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $*$ — знак комплексного сопряжения.

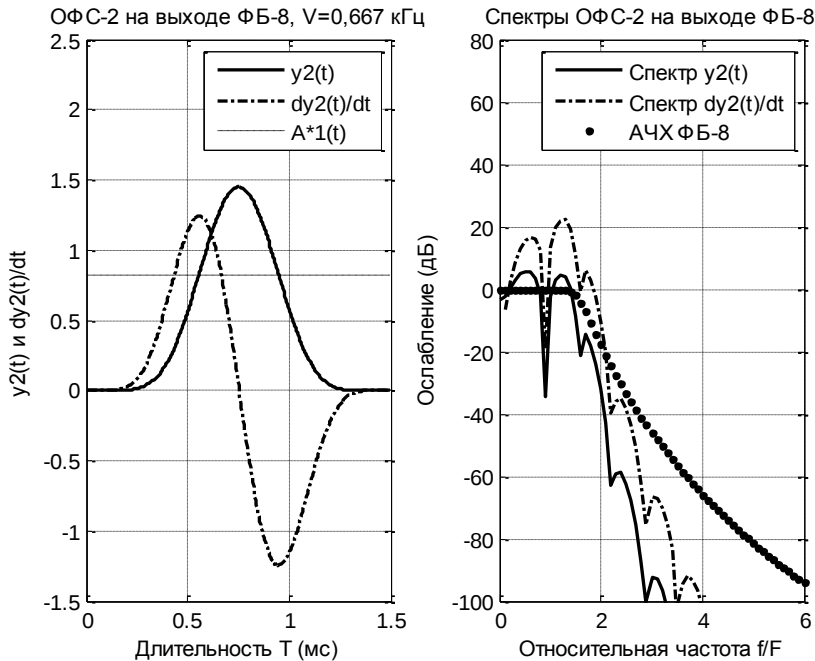


Рис. 2. Формы и спектры оптимальных финитных сигналов первого и второго вида.

Fig. 2. Forms and specs of optimal finite signals of the first and second kind

Эти ОФС представляют собой низкочастотные сигналы, согласованные с характеристиками низкочастотного эквивалента ПФ Баттерворта. Для передачи их по высокочастотному КС требуется осуществить модуляцию ортогональных гармонических переносчиков. Эта процедура на рис.1 реализуется посредством умножителей. В результате на двух пространственных выходах модулятора формируются сигналы по правилу

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_1(t) \\ \dot{s}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1^A(t)\sqrt{2} \cos \omega_n t + \dot{y}_1^B(t)\sqrt{2} \sin \omega_n t \\ \dot{y}_2^A(t)\sqrt{2} \cos \omega_n t + \dot{y}_2^B(t)\sqrt{2} \sin \omega_n t \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4. Работа и основные соотношения демодулятора

На вход демодулятора воздействует комплексный сигнал $\dot{z}(t)$ вида

$$\dot{z}(t) = \dot{H}_1(t)\dot{s}_1(t) + \dot{H}_2(t)\dot{s}_2(t) + \dot{\xi}(t) \quad (5)$$

Здесь $\dot{H}_1(t)$ и $\dot{H}_2(t)$ — комплексные замирания в высокочастотном КС, огибающие которых $\dot{h}_i, i=1, 2$, полагаем постоянными на последователь-

ных символьных полуинтервалов, $\dot{\xi}(t)$ — векторный, комплексный, гауссовский шум наблюдения с некоррелированными значениями.

Прием сигналов в когерентном демодуляторе осуществляется на синхронные детекторы (СД) [8]. Полагаем, что используется идеальная синхронизация на основе оценок параметров канала связи.

Вначале рассмотрим работу **демодулятора** без учета шума наблюдения. Для восстановления передаваемых низкочастотных ОФС в СД проводится интегрирование соотношений в (5). Затем на основе ортогональных гармонических колебаний в синфазном и квадратурном каналах демодулятора, с учетом обнуления составляющих на удвоенных частотах, формируются комплексные вектор-функции наблюдаемых сигналов вида

$$\dot{z}_c(t) = \sqrt{2} \int [\dot{H}_1 \dot{s}_1(t) + \dot{H}_2 \dot{s}_2(t)] \cos(\omega_n t) dt = \dot{h}_1 \dot{y}_1^A(t) + \dot{h}_2 \dot{y}_2^A(t) = [\dot{z}_{c,1}(t), \dot{z}_{c,2}(t)], \quad (6)$$

$$\dot{z}_s(t) = \sqrt{2} \int [\dot{H}_1 \dot{s}_1(t) + \dot{H}_2 \dot{s}_2(t)] \sin(\omega_n t) dt = \dot{h}_1 \dot{y}_1^B(t) + \dot{h}_2 \dot{y}_2^B(t) = [\dot{z}_{s,1}(t), \dot{z}_{s,2}(t)].$$

В результате перехода от последовательного к параллельному представлению в синфазном и квадратурном каналах получаем

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{c,1}(t) \\ \dot{z}_{c,2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1 & \dot{h}_2 \\ \dot{h}_2^* & -\dot{h}_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_1^A(t) \\ \dot{y}_2^A(t) \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{H}} \cdot \dot{\mathbf{y}}^A(t), \quad \begin{bmatrix} \dot{z}_{s,1}(t) \\ \dot{z}_{s,2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1 & \dot{h}_2 \\ \dot{h}_2^* & -\dot{h}_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_1^B(t) \\ \dot{y}_2^B(t) \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{H}} \cdot \dot{\mathbf{y}}^B(t). \quad (7)$$

Квадратная комплексная матрица $\dot{\mathbf{H}}$ огибающих замираний в (7) составлена из низкочастотных эквивалентов матрицы КС; она ортогональна, что подтверждается следующими вычислениями

$$\dot{\mathbf{H}}^H \dot{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1^* & \dot{h}_2^* \\ \dot{h}_2 & -\dot{h}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{h}_1 & \dot{h}_2 \\ \dot{h}_2^* & -\dot{h}_1^* \end{bmatrix} = (h_1^2 + h_2^2) \mathbf{1}_{2 \times 2}, \quad (8)$$

где H — знак сопряжения по Эрмиту, $\mathbf{1}_{2 \times 2}$ — единичная матрица.

Соотношения (7) и (8) являются основой пространственно-временного декодирования в блоках (ПВД). Действительно, умножая правые и левые части равенств в (7) на сопряженные по Эрмиту матрицы КС, на выходах блоков ПВД восстанавливаются комплексные ОФС вида

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^A(t) &= \frac{\dot{h}_1^* \dot{z}_{c,1}(t) + \dot{h}_2 \dot{z}_{c,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, & \dot{y}_1^B(t) &= \frac{\dot{h}_1^* \dot{z}_{s,1}(t) + \dot{h}_2 \dot{z}_{s,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, \\ \dot{y}_2^A(t) &= \frac{\dot{h}_2^* \dot{z}_{c,1}(t) - \dot{h}_1 \dot{z}_{c,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, & \dot{y}_2^B(t) &= \frac{\dot{h}_2^* \dot{z}_{s,1}(t) - \dot{h}_1 \dot{z}_{s,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Теперь для выделения из комплексных ОФС $\dot{y}_1^A(t)$, $\dot{y}_2^A(t)$ и $\dot{y}_1^B(t)$, $\dot{y}_2^B(t)$ их реальные и мнимые составляющие в схеме на рис. 1 введены блоки последовательно-параллельного преобразования П/П, на вы-

ходах которых формируются сигналы: $\text{Re } \dot{y}_1^A(t), \text{Im } \dot{y}_1^A(t), \text{Re } \dot{y}_2^A(t), \text{Im } \dot{y}_2^A(t), \text{Re } \dot{y}_1^B(t), \text{Im } \dot{y}_1^B(t), \text{Re } \dot{y}_2^B(t), \text{Im } \dot{y}_2^B(t)$. Пропуская эти сигналы через соответствующие согласованные фильтры СФ_1 и СФ_2 , в моменты максимума на их выходах восстанавливаются передаваемые символы сигналов МАМ в (1): $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ и $B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}$. После их двоичного кодирования восстанавливаются $\{\alpha_{\mu, \nu}\}$ — двоичные символы в (1), которые заполняют память мультиплексора. После последовательного опроса мультиплексора на его выходе формируется передаваемое двоичное сообщение $a(t_k) = a_k, k = 0, 1, 2, \dots$.

5. Прием сигналов с учетом шумов наблюдения

Соотношения для откликов синфазного и квадратурного СД при наличии шумов наблюдения записываются так

$[\dot{z}_{c,1}^\circ(t), \dot{z}_{c,2}^\circ(t)] = [\dot{z}_{c,1}(t) + \dot{\xi}_{c,1}, \dot{z}_{c,2}(t) + \dot{\xi}_{c,2}], [\dot{z}_{s,1}^\circ(t), \dot{z}_{s,2}^\circ(t)] = [\dot{z}_{s,1}(t) + \dot{\xi}_{s,1}, \dot{z}_{s,2}(t) + \dot{\xi}_{s,2}]$, (10)
где $\dot{\xi}_{c,i}, i = 1, 2$ — низкочастотные эквиваленты шумов наблюдения в синфазном канале, $\dot{\xi}_{s,i}, i = 1, 2$ — шумы наблюдения в квадратурном канале.

С учетом (10) и на основе соотношений (7)–(9) находим **оценки** комплексных оптимальных финитных сигналов (ОФС)

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^{A^\circ}(t) &= \dot{y}_1^A(t) + \frac{\dot{h}_1^* \dot{\xi}_{c,1}(t) + \dot{h}_2 \dot{\xi}_{c,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, & \dot{y}_1^{B^\circ}(t) &= \dot{y}_1^B(t) + \frac{\dot{h}_1^* \dot{\xi}_{s,1}(t) + \dot{h}_2 \dot{\xi}_{s,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, \\ \dot{y}_2^{A^\circ}(t) &= \dot{y}_2^A(t) + \frac{\dot{h}_2^* \dot{\xi}_{c,1}(t) - \dot{h}_1 \dot{\xi}_{c,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}, & \dot{y}_2^{B^\circ}(t) &= \dot{y}_2^B(t) + \frac{\dot{h}_2^* \dot{\xi}_{s,1}(t) - \dot{h}_1 \dot{\xi}_{s,2}(t)}{(h_1^2 + h_2^2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) следует, что при наличии шумов наблюдения к точным копиям ОФС добавляются случайные погрешности $\dot{\xi}_i^A, \dot{\xi}_i^B, i = 1, 2$ (вторые компоненты в (11)). Полагая, что они взаимно некоррелированы, а соответствующие им средние мощности одинаковы: $P_{\xi_{c1}} = P_{\xi_{c2}} = P_{\xi_{s1}} = P_{\xi_{s2}}$, нетрудно показать, что средние мощности погрешностей оценок также одинаковы: $P_{\xi^A} = P_{\xi^B} = P^\circ$ и соответственно равны

$$P^\circ = M_{\xi_i^A} \dot{\xi}_i^{*A} = M_{\xi_i^B} \dot{\xi}_i^{*B} = P_\xi / (h_1^2 + h_2^2). \quad (12)$$

Следовательно, отношение мощности ОФС P_y (заметим, что мощности ОФС₁ и ОФС₂ одинаковы) к мощности погрешности оценки P° (ОСШ) на входе согласованных фильтров (СФ) демодулятора равно

$$\rho^\circ = P_y / P^\circ = (h_1^2 + h_2^2) P_y / P_\xi = (h_1^2 + h_2^2) \rho_\xi. \quad (13)$$

На основе (13) введем понятие выигрыша по ОСШ от пространственно-временной обработки по Аламоути

$$k_p = \frac{\rho^\circ}{\rho_\xi} = (h_1^2 + h_2^2). \quad (14)$$

6. Спектрально-энергетическая эффективность СПД с МЧМ

При анализе работы СПД учитываются два показателя [1]: показатель спектральной эффективности $\eta_F = V_b / F_{KS}$ (бит/с/Гц), и показатель энергетической эффективности $\eta_E = E_b / G_0$, где $V_b = 1/T_b$ — битовая скорость, F_{KS} — полоса частот канала связи, — энергия, приходящаяся на бит данных, G_0 — односторонняя спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в КС.

Для СПД с МЧМ и новым модемом (рис.1) показатель спектральной эффективности равен

$$\eta_F = 2^{n_0-1} \frac{\alpha \cdot c_{\gamma,1}}{\delta_p} \log_2 M_{KAM}, \quad (15)$$

где $\alpha = 1.428$ — параметр увеличения битовой скорости в КС за счет передачи только эффективной части ОФС (рис.2), $c_{\gamma,1} = 0.387$, $F_p = \delta_p F_\gamma$, F_γ — полоса ФБ поуровню 3 дБ, F_p — полоса ФБ поуровню L_p дБ, $\delta_p = [10^{-0.1L_p} - 1]^{1/2p}$, p — порядок ФБ.

Энергетическая эффективность разработанного модема оценивается при фиксированной допустимой вероятности битовой ошибки, равной $p_{доп} = 10^{-4}$ и определяется в соответствии с [7]. На основе этой работы с учетом (14) получаем следующее соотношение для показателя энергетической эффективности СПД с МЧМ

$$\eta_E = \left[\operatorname{erfcinv} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 2p_{доп} \log_2 M_{KAM}}}{1 - 1/\sqrt{M_{KAM}}} \right) \right]^2 \frac{2(M_{KAM} - 1)}{3(\log_2 M_{KAM})k_E(V)k_p}, \quad (16)$$

где $\operatorname{erfcinv}(\bullet)$ — функция, обратная функции ошибки, $M_{KAM} = M^2$, $k_E(V)$ — коэффициент передачи по энергии для ОФС [6].

Сравнительные результаты расчетов спектрально-энергетической эффективности, разработанного модема МЧМ-ОФС, а также стандартизированных модемов: модема с OFDM [5, 9] и модема V34 (Рекомендация ITU-T, 1994 [5]), даны в таблице 1 и получены при следующих параметрах в (15) и (16): $p = 8$, $n_0 = 3$, $L_p = 20$ дБ, $k_E(V) = 15/16$, $k_p = 2$ (при $h_1^2 = h_2^2 = 1$).

Таб. 1. Данные эффективности сравниваемых модемов при $M_{KAM} = 2^2$.Tab. 1. Data on the effectiveness of comparable modems at $M_{KAM} = 2^2$

Модем	Спектральная эффективность (бит/с·Гц)	Энергетическая эффективность (дБ)
МЧМ-ОФС	$\eta_{F,DMT} = 2.0482$	$\eta_{E,DMT} = 5.57$
OFDM	$\eta_{F,OFDM} = 1$	$\eta_{E,OFDM} = 8.39$
V34	$\eta_{F,V34} = 0.8$	$\eta_{E,V34} = 9$

7. Заключение

1. Впервые предложен алгоритм и разработана на его основе функциональная схема нового модулятора/демодулятора в цифровой системе многочастотной передачи данных с повышенной энергетической эффективностью на основе пространственно-временной передачи и приема оптимальных финитных сигналов, не вызывающих межсимвольной интерференции на выходах узкополосных канальных фильтров.

2. Проведен теоретический анализ спектрально-энергетической эффективности нового модема. В частности, показано, что в достаточно сложных условиях приема, при $M_{KAM} = 2 \times 2$ данный модем по сравнению со стандартным модемом V34, обеспечивает выигрыш по энергетической эффективности на 3.4 дБ. Кроме того, разработанный модем с узкополосными поднесущими энергетически эффективнее на 2.82 дБ по сравнению с модемом OFDM и широкополосными поднесущими.

3. Реализация нового модема в цифровых телекоммуникационных системах позволит значительно повысить их спектрально-энергетическую эффективность. Предложенный подход может быть использован в новых технологиях для организации высокоскоростной передачи данных по частотно-ограниченным каналам связи.

Список литературы

1. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов, В. Л. Банкет, П. В. Иващенко. Под ред. А. Г. Зюко. М. : Радио и связь, 1985. 272 с.
2. Morelli M., Mengali U. Carrier-Frequency Estimation for Transmissions over Selective Channels // IEEE Transactions on Communications, September 2000. Vol. 48, No. 9. Pp. 1580–1589.
3. Wang X. and Poor V. H. Wireless Communication Systems. Advanced Techniques for Signal Reception. Prentice-Hall. : Upper Saddle River, NJ, 2004. 400 pp.
4. Балашов В. А., Воробийченко П. П., Ляховецкий Л. М. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2012. 228 с.

5. Лагутенко О. И. Современные модемы. М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. 343 с.
6. Санников В. Г. Синтез финитных сигналов Найквиста, согласованных с телефонным каналом связи // Электросвязь. 2012. № 5. С. 9—12.
7. Санников В. Г. Помехоустойчивость системы передачи оптимальных финитных сигналов по телефонному каналу связи // Электросвязь. 2013. № 5. С. 39 — 44.
8. Аджемов А. С., Санников В. Г. Общая теория связи. Учебник для вузов. М. : Горячая линия-Телеком, 2018. 624 с.
9. Шлома А. М., Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шумов А. П. Новые технологии в системах мобильной радиосвязи / Под ред. А. М. Шломы. М. : МТУСИ, 2005. 455 с.

Информация об авторах

Санников Владимир Григорьевич, профессор Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Российская Федерация.

Волчков Валерий Павлович, профессор Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Vladimir G. Sannikov, professor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation.

Valeriy P. Volchkov, professor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation.

Design of the hidden device resonant multi-slit antenna used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression

I. I. Savashinskiy

Ural Federal University n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin
32, Mira Str., Ekaterinburg, 620078, Russian Federation
egor37-ilya14@yandex.ru

Received: November 7, 2019

Peer-reviewed: December 16, 2019

Accepted: December 20, 2019

Abstract: *Hidden device resonant multi-slit antenna used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression designing stages are considered. ISKRA-1 is used as vehicle Doppler speed meter. Radar-detector Escort Passport 9500ix is used together with hidden device of radio-electronic repression. Imitation distraction interferences are generated for radio-electronic repression and well-known decision of the signal one coordinate elimination is used in the subject area didn't connected with the armed forces. Also designing is made taking into account the parameters that are applicable only during vehicles established speed limit monitoring.*

Keywords: *hidden device, resonant multi-slit antenna, vehicle Doppler speed meter, radar-detector, imitation distraction interferences.*

For citation (IEEE): I. I. Savashinskiy, "Design of the hidden device resonant multi-slit antenna used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 372–379, 2019.

УДК 621.396.621

Проектирование резонансной многощелевой антенны скрытного устройства радиоэлектронного подавления доплеровских измерителей скорости транспортных средств

Савашинский И. И.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
ул. Мира, 32, Екатеринбург, 620078, Российская Федерация
egor37-ilya14@yandex.ru

Получено 7 ноября 2019 г.

Отрецензировано 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 20 декабря 2019 г.

Аннотация: Рассмотрены этапы проектирования резонансной многощелевой антенны скрытного устройства радиоэлектронного подавления доплеровских измерителей скорости транспортных средств. В качестве доплеровского измерителя скорости транспортных средств использован ИСКРА-1, совместно со скрытным устройством радиоэлектронного подавления использован радар-детектор Escort Passport 9500ix. Для радиоэлектронного подавления формируются ответные имитационные уводящие помехи и известное решение по устранению сигнала по одной из координат применяется в предметной области, не связанной с вооруженными силами. Также проектирование устройства формирования помех производится с учетом параметров, применимых лишь во время контроля установленного скоростного режима транспортных средств.

Ключевые слова: скрытное устройство, резонансная многощелевая антенна, доплеровский измеритель скорости, радар-детектор, ответные имитационные уводящие помехи.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Савашинский И. И. Проектирование резонансной многощелевой антенны скрытного устройства радиоэлектронного подавления доплеровских измерителей скорости транспортных средств // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 372—379.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Савашинский, И. И. Проектирование резонансной многощелевой антенны скрытного устройства радиоэлектронного подавления доплеровских измерителей скорости транспортных средств / И. И. Савашинский // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 372—379.

1. Introduction

Not basing on the designing process it could be told that research object is the following: hidden device used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression (further it would be called as repressor) located under the vehicle hood with length of X centimeters and weight of Y centimeters and can be represented as electromagnetic field generator energizing multi-split antenna executed as rectangular waveguide with specific dimensions (length, width and height) operating in H_{10} wave emitting mode.

As for multi-split antenna designing process is based on antenna designing which provides required directivity pattern or directivity coefficient and it consists of the following stages [1]:

1. Type of antenna and type of slits are made proceeding on required microwave range and required emitting field polarization;
2. Required amplitude-phase distribution is made;
3. Constructive estimation is made where the main role is splits energizing for required amplitude distribution providing;
4. Antenna electrical estimation is made (directivity pattern, directivity coefficient, Z_{IN} and etc.).

Let's separately specify each designing stage to estimate multi-split antenna missing parameters wherein strict estimation methods are connected with significant financial difficulties that's why their usage for engineering estimations is impossible and it means that approximate method appropriate for resonant multi-slit estimation should be used – power method.

2. Type of antenna and type of slits

For required emitting field polarization obtaining cruciform slits slotted in wide waveguide sides at a quarter of its width from the midline are used. For normal emitting maximum formation resonant multi-slit antenna in the form of lengthwise slits system located in chess order at half wavelength apart is used. Waveguide supplied with short-circuited piston in the end. Also for these slits matching possibility with feeder half-wave slits are used. Directivity pattern in the parallel to the waveguide axis plane has a directivity depended on slits quantity. Directivity coefficient is approximately equal to tripled slits quantity [2].

Multi-slit antenna slit width is chosen from electrical durability conditions (for transmitting antenna) and from required bandwidth (for receiving antenna) according to the following formula:

$$d_s = \frac{k_{RES} U_{MAX}}{E_{LIM}}, \quad (1)$$

where $k_{RES} = 2:4$ – disruptive voltage reserve coefficient and the more it is the more is reserve that's why let be $k_{RES} = 4$;

$U_{MAX} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{G_{\Sigma}}}$ – slit center voltage amplitude;

P_{Σ} – slit emitting power;

G_{Σ} – slit emitting conductivity calculating in the following way:

$$G_{\Sigma} \approx \frac{0,9R_{\Sigma}}{7200\pi^2},$$

where $R_{\Sigma} = 73 \text{ Ohm}$ – half-wave symmetric equivalent vibrator emitting resistance referred to slit center current amplitude;

$E_{LIM} = 30 \text{ kW/cm}$ – field voltage limit value when electrical disruption is coming under air normal atmospheric conditions.

Let's find slit emitting power P_{Σ} taking into account reemitting with signal generated interference on the vehicle Doppler speed meter (further it would be called as meter) receiver input operating power – P_S [3]; taking into account wave fading coefficient in the meter waveguide taking into account waveguide length in the receiving side – α' [4]; taking into account meter horn-lens antenna gain coefficient using it as receiving one – D_{RCV} [4]; taking into account reemitting with signal generated interference distribution way losses – α_{DISTR} [5]:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= P_S + \alpha' - D_{RCV} + \alpha_{DISTR} = (-130,4) + (-2,9) - 17,9 + 123,3 \\ &= -27,9 \text{ dB} = 10^{-2,79} \text{ W} = 1620 \times 10^{-6} \text{ W}. \end{aligned} \quad (2)$$

Let's find slit emitting conductivity G_{Σ} :

$$G_{\Sigma} \approx \frac{0,9R_{\Sigma}}{7200\pi^2} = \frac{0,9 \times 73}{7200\pi^2} = 925 \times 10^{-6} \text{ W}. \quad (3)$$

Let's find slit width d_s :

$$d_s = \frac{k_{RES} \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{G_{\Sigma}}}}{E_{LIM}} = \frac{4 \sqrt{\frac{1620 \times 10^{-6}}{925 \times 10^{-6}}}}{30 \times 10^3} = 1,76 \text{ } \mu\text{m}. \quad (4)$$

In order to provide resonant multi-slit antenna construction manufacturability all slits width should be equal to $d_s = 1,76 \text{ } \mu\text{m}$.

For wide waveguide side half-wave lengthwise slit resonant length estimation let's used the following formula:

$$\begin{aligned}
 l_s &= 2(l - \Delta l) = 2 \left(l - \frac{0,225l}{\ln \frac{2\lambda_0}{\pi d}} \right) = 2 \left(\frac{\lambda_0}{4} - \frac{0,225 \frac{\lambda_0}{4}}{\ln \frac{2\lambda_0}{\pi \frac{\lambda_0}{2}}} \right) \\
 &= 2 \left(\frac{0,0124}{4} - \frac{0,225 \frac{0,0124}{4}}{\ln \frac{4}{\pi}} \right) = 425 \text{ } \mu\text{m}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

In order to provide resonant multi-slit antenna construction manufacturability lengthwise and slantwise (angle incline should not exceed 15° otherwise parasitic polarization emitting power exceed 1% from all emitting power) length of all slits (cruciform slits) should be equal to $l_s = 425 \text{ } \mu\text{m}$.

3. Required amplitude-phase distribution

Let be amplitude distribution along resonant multi-slit antenna as uniform one then slits equivalent conductivity can be found according to the following formula:

$$g'_n = \frac{1}{N}, \quad (6)$$

where $N \approx \frac{G_S}{3}$ – slits quantity approximately equal to resonant multi-slit antenna directivity coefficient;

$G_S \approx G_{HL} = 138$ – let be resonant multi-slit antenna and horn-lens antenna directivity coefficients are the same [4].

4. Constructive estimation

Knowing resonant multi-slit antenna main maximum direction θ_m – normal ($\theta_{max} = 90^\circ, n = 0$), and its way of energizing – π , let's set maximum possible generator wave delay coefficient in the rectangle waveguide $\beta = \frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,91 \rightarrow 1$ and let's find wave in waveguide to narrow waveguide ratio from the nomogram of the figure 1 in case of $\frac{\lambda_0}{a} = 1,82$ [2]:

Second stage conductivities provisioning should be made by slits displacement on wide waveguide side b at a quarter of its width from the midline x_n according to the following formula:

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g'_n}{g'_{max}}}, \quad (7)$$

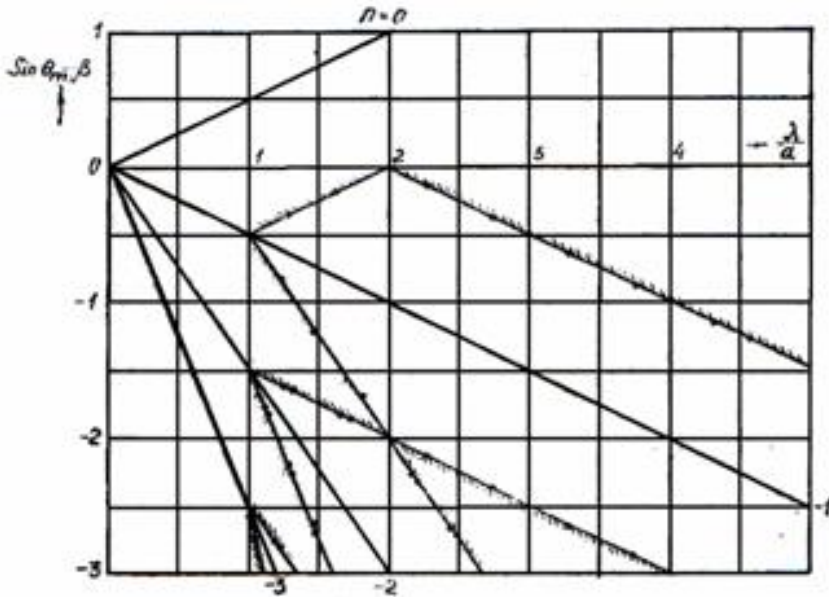


Fig. 1. Multi-slit antenna estimation nomogram for π way of energizing.

Рис. 1. Номограмма для расчета многоселевой антенны при π способе возбуждения

where $g'_{max} = 2,09 \frac{a\beta}{b} \cos^2 \frac{\pi\beta}{2}$ from where based on (6) and wave in waveguide to narrow waveguide ratio $\frac{\lambda_0}{a}$ let's find the following formula for wide waveguide side b :

$$b = \frac{4\lambda_0}{1,82\pi} \arcsin \sqrt{\frac{b}{N2,09 \frac{\lambda_0\beta}{1,82b} \cos^2 \frac{\pi\beta}{2}}}. \quad (8)$$

Based on (8) we found that wide rectangular waveguide side is equal to $b = 0,006297 \text{ m}$ and narrow rectangular waveguide side is equal to $a = 0,006813 \text{ m}$ those even if maximum possible generator wave delay coefficient in rectangular waveguide is equal to $\beta = 0,91$ variant with wide side b and narrow side a of rectangular waveguide is impossible then let's use square waveguide with sides equaled to $a = b = \frac{(0,006813+0,006297)}{2} = 0,00656 \text{ m}$ for which wave delay coefficient is equal to $\beta' = 0,99277$.

Also resonant multi-slit antenna for its matching possibility with feeder is supplied with short-circuited piston in the end located from last slit center in the

following distance $l_0 = (2n + 1) \frac{\lambda_0}{4}$, where $n = 0$ those in the following distance $l_0 = 0,0031 \text{ m}$.

Final resonant multi-slit antenna length is the following:

$$L = dN + l_0 = \frac{0,0124 \times 46}{2} + 0,0031. \quad (9)$$

5. Antenna electrical estimation

Resonant multi-slit antenna with short-circuited piston in the end efficiency coefficient is closed to one those $n_s = 0,95$. Then resonant multi-slit antenna gain coefficient is equal to D_s and it can be found according to the following formula:

$$D_s = G_s n_s = 138 \times 0.95 = 131 = 21,2 \text{ dB}. \quad (10)$$

6. Conclusion

So device resonant multi-slit antenna used for vehicle Doppler speed meter radio-electronic repression designing process considered as completed one because all designing stages are considered and all missing antenna parameters are found.

References

- [1] G. N. Kocherzhevskij, G. A. Erohin, N. D. Kozyrev, *Antenno-fidernye ustrojstva: uchebnik dlya VUZov* [Antenna-feeder devices: textbook for universities]. Moscow : Radio i svyaz', 1989. (In Russ.).
- [2] D. M. Sazonov, *Antenny i ustrojstva SVCH: uchebnik dlya VUZov* [Antennas and microwave devices: a textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. (In Russ.).
- [3] I. I. Savashinskiy, "Active masking noise energy parameters finding used for vehicles speed measurement system "Iskra-1" radio-electronic repression," *Tekhnicheskie nauki v mire: ot teorii k praktike* [Engineering in the world: from theory to practice], pp. 76–81, 2016.
- [4] I. I. Savashinskiy, "Active masking noise no energy parameters finding used for vehicles speed measurement system "Iskra-1" radio-electronic repression," *Nauka v sovremennom informacionnom obshchestve* [Science in the modern information society], pp. 113–115, 2016.
- [5] D. A. Osincev, *Proektirovanie sistemy peredachi dannyh telemekhanicheskikh izmerenij: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovogo proekta* [Design of a telemetry measurement data transmission system: guidelines for the implementation of a course project]. Ekaterinburg : Ural'skij federal'nyj universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'cina, 2016. (In Russ.).

Список литературы

1. Кочержевский Г. Н., Ерохин Г. А., Козырев Н. Д. Антенно-фидерные устройства: учебник для ВУЗов. Москва : Радио и связь, 1989. 352 с.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: учебник для ВУЗов. Москва : Высшая школа, 1988. 432 с.

3. Active masking noise energy parameters finding used for vehicles speed measurement system “Iskra-1” radio-electronic repression / И. И. Савашинский // Технические науки в мире: от теории к практике : материалы междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 76—81.
4. Active masking noise no energy parameters finding used for vehicles speed measurement system “Iskra-1” radio-electronic repression / И. И. Савашинский // Наука в современном информационном обществе : материалы 9 междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 113—115.
5. Осинцев Д. А. Проектирование системы передачи данных телеметрических измерений : методические указания к выполнению курсового проекта. Екатеринбург : Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2016. 21 с.

Information about the authors

Иля I. Savashinskiy, Postgraduate, Assistant of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation.

Информация об авторах

Савашинский Илья Игоревич, аспирант, ассистент Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация.

УДК 621.3.051.025

Система беспроводной передачи энергии¹

¹ Широков И. Б., ² Широкова Е. И., ³ Азаров А. А.

¹ Севастопольский государственный университет

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

¹ shirokov@ieee.org

² shirokova@ieee.org

³ azarov@ieee.org

Получено: 20 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В статье описана система беспроводной передачи энергии. Система состоит из двух микрополосковых структур, каждая из которых не излучает микроволновую энергию в своих отдельных локализациях. При приближении этих структур лицом к лицу они образуют направленный микроволновый ответвитель, который обладает хорошими характеристиками при передаче энергии от одной структуры к другой. Результаты системного моделирования представлены в работе. Моделирование системы проводилось в среде проектирования AWR. Результаты моделирования показали, что потери энергии не превышают 1 дБ на расстоянии между частями системы 10 мм. Были осуществлены моделирования работы системы передачи энергии для различных расстояний между полосками системы при различных частотах и для различных смещениях микрополосковых структур друг относительно друга. Моделирование показало, что система обладает приемлемыми характеристиками для организации беспроводной передачи энергии. Система может передавать энергию свыше сотен ватт и может использоваться на практике в широком спектре приложений. Наиболее полезным приложением является зарядка батареи автономных устройств, таких как электромобили, беспилотные летательные аппараты и т. д.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; электромагнитное поле; микрополосковая линия передачи; симметричная полосковая линия передачи; переходное затухание; потери.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Широкова Е. И., Азаров А. А. Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 380—389.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Широков, И. Б. Система беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, Е. И. Широкова, А. А. Азаров // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 380—389.

System of wireless energy transfer

I. B. Shirokov¹, E. I. Shirokova², and A. A. Azarov³

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

¹shirokov@ieee.org

²shirokova@ieee.org

³azarov@ieee.org

Received: July 20, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The article describes a wireless power transmission system. The system consists of two microstrip structures. They have good performance in transferring energy from one structure to another. The results of system modeling are presented in the paper. System modeling was carried out in the AWR design environment. It is shown the energy loss does not exceed 1 dB at a distance between the parts of the system in 10 mm. Simulations of the operation of the energy transmission system were carried out for different distances between the strips of the system at different frequencies and for different displacements of the microstrip structures relative to each other. Modeling showed that the system has acceptable characteristics for organizing wireless energy transfer. The system can transfer energy for hundreds of watts and use it in practice in a wide range of applications. The most useful application is the battery charging of autonomous devices, such as electric cars, unmanned aerial vehicles, etc.

Keywords: wireless power transfer; electromagnetic field; microstrip transmission line; symmetrical strip transmission line; transient attenuation; losses.

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. "System of Wireless Energy Transfer," *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 380–389, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Электрические транспортные системы быстро растут во всем мире. В последнее время очень популярной транспортной системой является беспилотный летательный аппарат (БПЛА), который широко используется во всех аспектах жизни человека. Однако потребление электроэнергии двигателями БПЛА приводит к разрядке его аккумуляторной батареи.

Стремление к увеличению полезной нагрузки БПЛА приводит к снижению массы батареи и, как следствие, к снижению ее емкости. В результате полезное время работы батареи БПЛА ограничено 1 часом или около того, и, соответственно, с той же периодичностью батарея должна заряжаться.

Контактный метод зарядки батареи обеспечивает решение этой проблемы практически без потерь энергии, однако включает в себя множество других проблем. Прежде всего, частое механическое переключение зарядного разъема резко сокращает срок его службы. Во-вторых, механическое соединение батареи и системы зарядки требует либо присутствия человека на зарядной станции, либо автоматической высокоточной посадки БПЛА на стол зарядной станции. Иногда эти подходы не могут быть реализованы в принципе, например, при обслуживании БПЛА в пустыне. Чистота поверхностей электрических контактов должна быть идеальной.

Беспроводная передача энергии для зарядки аккумуляторной батареи свободна от упомянутых проблем, и зарядка батареи любой транспортной единицы может быть реализована в автоматическом режиме.

2. Беспроводная передача энергии

Первые опыты по беспроводной передаче энергии проводились еще Н. Тесла в конце 19 века [1, 2]. История развития методов беспроводной передачи энергии кратко отражена в [3, 4]. Для передачи энергии используются различные методы. Теория передачи энергии посредством физических полей всесторонне развита в классических работах [5, 6]. Некоторые способы и устройства запатентованы [2, 7, 8].

В последнее время получил распространения индукционный способ передачи энергии, все аспекты которого собраны в так называемый стандарт Qi (Ци) [9, 10]. Подобный подход повсеместно используется сегодня при подзарядке батарей мобильных телефонов. При этом в столике зарядной станции размещают многовитковую катушку, через которую пропускают переменный ток низкой частоты, а в заряжаемом устройстве размещают подобную многовитковую катушку, в которой в свою очередь наводится напряжение индукции, используемое для заряда батарей. При очевидной простоте данного решения, использование двух связанных между собой катушек индуктивности имеет существенный недостаток. Высокий КПД системы достигается только при плотном контакте катушек и при полном совпадении их осей. Любые незначительные отклонения от этого правила приводят к резкому ухудшению эффективности передачи энергии. На расстоянии между плоскостями катушек уже в 5—10 мм передача энергии практически полностью прекращается (опробовано на реальных

беспроводных зарядных устройствах мобильных телефонов). К тому же максимальная мощность зарядной станции по такому подходу не превышает 5—10 Вт [9, 10]. Совершенно очевидным является тот факт, что использовать подобный подход для зарядки батарей автономного электротранспорта не представляется возможным.

Более прогрессивным является магнито-резонансный метод беспроводной передачи энергии, описанный в [11, 12, 13]. За непонятным названием и не менее неясным механизмом (метод запатентован и держится в секрете), скрывается способ передачи энергии без проводников с эффективностью более 40 %. Технология получила название «WiTricity». По заявлению авторов изобретения, это не «чистый» резонанс связанных контуров и не трансформатор Теслы с индуктивной связью. Радиус передачи энергии на сегодня составляет чуть больше двух метров, в перспективе — до 5—7 метров. Сходные технологии разрабатываются и другими фирмами: компания Intel демонстрировала свою технологию WREL с КПД передачи энергии до 75% [3]. В 2009 году фирма Sony продемонстрировала работу телевизора без сетевого подключения. При совершенно очевидном прогрессе в развитии технологии передачи энергии настораживает только одно обстоятельство: независимо от способа передачи и технических ухищрений плотность энергии и напряженность поля в зоне действия зарядной станции должна быть достаточно высокой, чтобы питать устройства мощностью несколько десятков ватт. По признанию самих разработчиков, информации о биологическом воздействии на человека подобных систем пока нет. Учитывая недавнее появление и разный подход к реализации устройств передачи энергии, подобные исследования еще только предстоят, а результаты появятся не скоро. Человечество пока может судить об их негативном воздействии только косвенно. В любом случае при организации систем беспроводной зарядки батарей городского автономного электротранспорта следует строго руководствоваться существующими стандартами, регламентирующими воздействие на человеческий организм электромагнитных полей [14]. Представляется, что описанные выше технологии неприемлемы для массового и повсеместного внедрения на городских улицах и дорогах, особенно если принять во внимание тот факт, что для зарядки батарей электротранспорта требуются мощности, исчисляемые киловаттами и более.

В работах [15, 16] ведется разговор об использовании для передачи энергии магнитных антенн, образованных связанными радиальными спиралями. В работе описываются широкие возможности такого способа передачи энергии, и говорится о вполне приемлемых допусках на взаимное пози-

ционирование антенн системы передачи энергии. Однако конструкция антенн при этом представляется достаточно сложной и в работе не приводится сведений об экспериментальных исследованиях и (или) моделировании процессов передачи энергии. Дальнейшего развития этого направления указанными авторами осуществлено не было, несмотря на его очевидную перспективность, по крайней мере, отследить развитие этого направления не удалось. Представляется, что данное направление является развитием описанного выше магнито-резонансного метода передачи энергии [12, 13].

Передачу энергии с помощью лазерного луча и/или направленного СВЧ излучения в качестве альтернативного варианта передачи энергии для зарядки батарей городского автономного электротранспорта в контексте настоящего проекта авторы не рассматривают по нескольким простым причинам: низкий КПД систем, значительные габариты направленных антенн (как приемной, так и передающей) микроволнового диапазона, неизбежное попадание живых организмов в апертуру луча передачи энергии.

Таким образом, можно сделать несколько предварительных выводов. Ни один из описанных выше способов беспроводной передачи энергии не подходит для реализации системы зарядки батарей электротранспорта. Либо принципиально мала мощность системы, либо сама система оказывается громоздкой, либо проявляется негативное воздействие электромагнитного излучения на людей и другие живые организмы, влияние на которые в настоящее время совершенно не изучено.

3. Новый подход к проблеме

Основной целью исследований является упрощение конструкции элементов беспроводной системы передачи энергии, снижение непроизводительных потерь энергии, обусловленными ее излучением в свободное пространство, потерь в подводящих фидерах и конструктивных элементах генерирующих устройств. Отдельно рассматриваются вопросы снижения вредного влияния энергии высокочастотного излучения на человека и другие биологические объекты, расположенные в непосредственной близости от беспроводной системы передачи энергии.

Предлагается использовать микрополосковую технику для беспроводной передачи энергии [17]. Существуют два типа полосковых линий, представляющие в данном случае интерес. Первый вид — несимметричная или микрополосковая структура. Для этого типа структуры электромагнитное поле сосредоточено исключительно между микрополосковой линией, с ее внутренней стороны и проводящей подложкой. Второй вид включает в себя симметричную полосковую структуру, для которой элек-

тромагнитное поле сконцентрировано между обеими сторонами полосковой линии и обеими проводящими подложками. Обе структуры имеют незначительные потери электромагнитной энергии и не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство.

В то же время направленные ответители с приемлемыми качественными параметрами могут быть реализованы на симметричной полосковой линии, и наилучший результат получается при расположении линиями с лицевой связью. В любом случае в структуре можно передавать энергию только от одной полосковой линии на другую. Это свойство симметричной полосковой связанной структуры будет использоваться для беспроводной передачи энергии. Таким образом, система передачи энергии состоит из двух симметричных идентичных частей, каждая из которых представляет собой микрополосковую линию передачи определенной длины, закороченную или открытую на одном конце и возбужденную с другого конца. Для предотвращения непроизводительных потерь энергии в конструкциях не используется согласованная нагрузка 50 Ом (или любое другое сопротивление). Микрополосковые структуры не излучают электромагнитную энергию в свободное пространство; это абсолютно доказанный факт. Соответственно, непроизводительные потери энергии отсутствуют.

4. Конструкция и моделирование

Система как единое целое представляет собой направленный ответитель на симметричных линиях передачи с лицевой связью. Для экономии места полосковые линии свернуты в спирали. Электромагнитная структура была моделирована в среде Microwave Office, модель структуры показана на рис. 1. Для моделирования использовались полосковые линии, открытые с одного конца. С другого конца полосковые линии заканчивались портами 50 Ом (1 и 2).

Полосковые линии размещались на идеальных диэлектрических подложках из диэлектрика с проницаемостью $\epsilon = 4,3$ и $\text{tg}\delta = 0,005$. Толщина подложек составляла 3 мм. Расстояние между полосками изменялось от 5 до 30 мм. Внутренний диэлектрик (между полосковыми линиями) представлял собой воздух с относительной диэлектрической проницаемостью 1. Общая длина обеих полосок составляла около 1 м, ширина составляла 10 мм, а их толщина при моделировании составляла 30 мкм. Размер обеих подложек составлял $200 \times 200 \text{ мм}^2$.

Первая линия возбуждалась через 50-омный порт. При этом анализировалась энергия на выходе второй линии, также заканчивавшейся 50-омным портом.

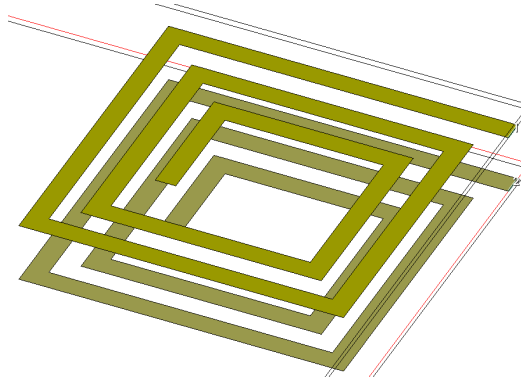


Рис. 1. Электромагнитная структура в МВО.

Fig. 1. Electromagnetic structure in MWO

Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм показаны на рис. 2, а. На этом на рисунке показаны два графика: обратные потери (треугольники) и переходное затухание (ромбы). Очевидно, что наблюдается несколько максимумов при передаче энергии в диапазоне частот. Первый максимум соответствует основной частоте (четверть длины волны полосковой линии). Другие максимумы соответствуют гармоникам основной частоты. Видно, что на гармониках выше третьей переходное затухание не превышает 1 дБ. Результаты моделирования для расстояния 20 мм между полосковыми линиями показаны на рис. 2, б. С увеличением расстояния между полосковыми линиями видно, что частоты максимумов передачи энергии сдвигаются в низкочастотном направлении. Также видно, что коэффициент передачи уменьшается, возвратные потери возрастают.

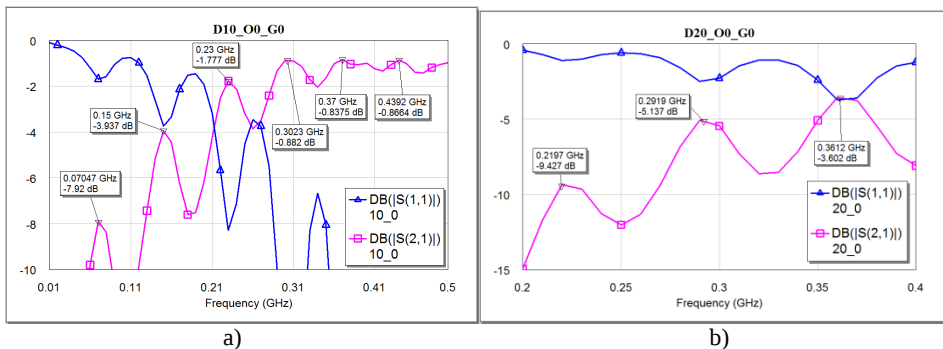


Рис. 2. Результаты моделирования при расстоянии между полосками: а) 10 мм, б) 20 мм.

Fig. 2. Simulation results at a distance between strips: а) 10 mm, б) 20 mm

Было проанализировано переходное затухание при передаче энергии для различных расстояний между полосками и различными частотами. Результаты анализа показаны на рис. 3.

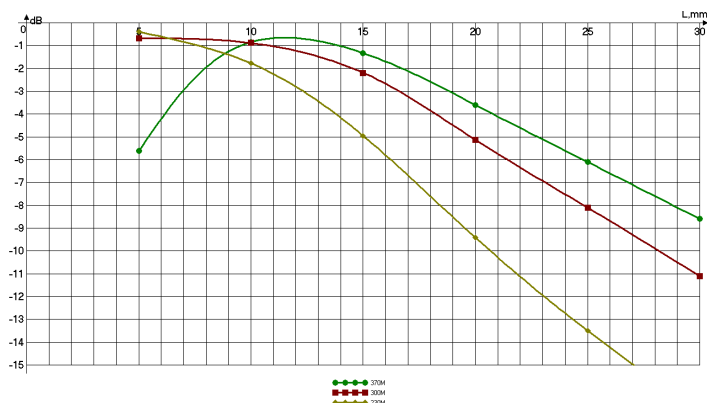


Рис. 3. Результаты моделирования при различных расстояниях между полосками и при различных частотах.

Fig. 3. Simulation results at different distances between strips and at different frequencies

Было исследовано влияние взаимного смещения полосковых структур друг относительно друга на переходное затухание в системе. Результаты моделирования электромагнитной структуры для расстояния между полосковыми линиями 10 мм и взаимным смещением полосковых линий 10 мм и 20 мм показаны на рис. 4.

Ситуация с изменением расстояния смещения несколько лучше.

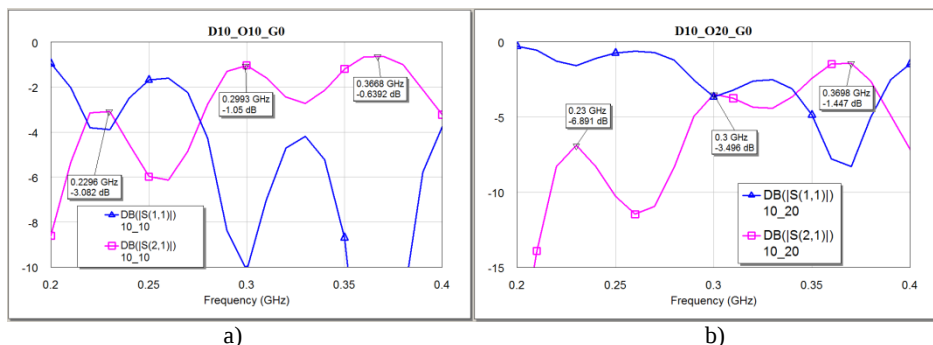


Рис. 4. Результаты моделирования при различных взаимных смещениях полосок:
а) 10 мм, б) 20 мм.

Fig. 4. Simulation results at different mutual offsets between strips:
а) 10 mm, б) 20 mm

Увеличение взаимного смещения между полосковыми линиями приводит к уменьшению мощности передачи энергии, но это уменьшение не является критическим. Как видно на рисунке, смещение на 10 мм практически не влияет на параметры передачи энергии. Это дает нам «запас» в ошибке взаимного позиционирования электромагнитных структур при решении задач по передаче энергии для подзарядки батарей различных устройств, таких как мобильные телефоны, автономный электрический транспорт и т. д.

5. Заключение

Таким образом, рассмотрена система передачи энергии для беспроводной зарядки батарей. Система состоит из двух микрополосковых структур, которые образуют направленный ответвитель с лицевой связью. Система обеспечивает передачу энергии на разумные расстояния между микрополосковыми структурами. Так, на предельном расстоянии 30 мм между структурами переходное затухание не превышает значения в 10 дБ. На рабочих расстояниях 5—10 мм переходное затухание при беспроводной передаче энергии не превышает 1 дБ.

Использование спиральных микрополосковых линий существенно уменьшает размеры электромагнитных структур и открывает хорошие возможности по снижению требований по взаимному расположению элементов системы беспроводной передачи энергии.

Благодарности

Работы проведены при государственной поддержке в рамках реализации Проекта № 5.6208.2017/8.9 базовой части Государственного задания Российской Федерации.

Список литературы

1. Tesla N. Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination // AIEE, Columbia College, N.Y., May 20, 1891.
2. Tesla N., U.S. patent 1,119,732 (1914).
3. Беспроводная передача электроэнергии: трудная история становления (Электронный ресурс) <http://elektrik.info/main/fakty/673-besprovodnaya-peredacha-elektroenergii-trudnaya-istoriya-stanovleniya.html>
4. Brown W. C. The History of Power Transmission by Radio Waves // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on September, 1984, v. 32 (9), pp. 1230—1242.
5. Pozar D. M. Microwave Engineering // Wiley, New Jersey, 2005.
6. Jackson J. D. Classical Electrodynamics // Wiley, New York, 1999.
7. Scheible G., Smailus B., Klaus M., Garrels K., Heinemann L. System for wirelessly supplying a large number of actuators of a machine with electrical power // US patent number 6,597,076, issued in July 2003.

8. Ka-Lai L., Hay J. W., Beart P. G. W. Contact-less power transfer // US patent number 7,042,196, issued in May 2006.
9. Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging (Электронный ресурс). <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>
10. Guidelines for Automotive Aftermarket Qi // Chargers The Wireless Power Consortium 2012 2012/10/01
11. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P, Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science, 06 Jul 2007, Vol. 317, Issue 5834, P. 83—86 DOI: 10.1126/science.1143254
12. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer // Annals of Physics 323 (2008) P. 34—48.
13. Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords (Электронный ресурс). <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>
14. IEEE Std C95.1—2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz (IEEE, Piscataway, NJ, 2006).
15. Pchelnikov Yu.N. Features of slow waves and potential for their nontraditional application // Journal of Communications Technology and Electronics, 2003, vol. 48, No 4, pp. 494—507.
16. Pchelnikov Yu. N., Yelizarov A. A., Pchelnikov A. G. Wireless charging mechanism for outdoor appliance // IEEE Proc. 23rd International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology,” Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9—13 September 2013, pp. 1058—1059.
17. Широков И. Б. Способ беспроводной передачи электрической энергии высокой частоты // Патент № 2704602, Россия. МПК H02J 50/20, H02J 50/90, H01Q 7/08. Оpubл. 30.10.2019, Бюл. № 31.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Азаров Андрей Андреевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey A. Azarov, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 004.75:004.896

Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств

Кудрявченко И. В.

Севастопольский государственный университет

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

IVKudryavchenko@sevsu.ru

Получено 7 ноября 2019 г.

Отрецензировано 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 20 декабря 2019 г.

Аннотация: Рассматриваются требования к беспроводным инфокоммуникационным сетям, формируемым на основе роя самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств. Предлагается механизм динамической кластеризации узлов сети на основе барицентрических координат и критерия соседства.

Ключевые слова: дискретное пространство, самоорганизующаяся инфокоммуникационная сеть, динамическая кластеризация, барицентрические координаты, протоколы беспроводной связи, рой мобильных интеллектуальных устройств.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кудрявченко И. В. Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 390—400.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Кудрявченко, И. В. Особенности построения инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся мобильных интеллектуальных устройств / И. В. Кудрявченко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 390—400.

Features of infocommunication networks formation based on self-organizing mobile smart devices

I. V. Kudryavchenko

Sevastopol State University,

Institute of Radio Electronics and Information Security

33, University St., Sevastopol, 2990533, Russian Federation

IVKudryavchenko@sevsu.ru

Received: November 7, 2019

Peer-reviewed: December 16, 2019

Accepted: December 20, 2019

Abstract: *The requirements for the formation of wireless infocommunication networks based on the swarm of self-organizing mobile intelligent devices are considered. A mechanism for the dynamic clustering of network nodes based on barycentric coordinates and the neighborhood criterion is proposed.*

Keywords: *discrete space, self-organizing infocommunication network, dynamic clustering, barycentric coordinates, wireless protocols, a swarm of mobile smart devices.*

For citation(IEEE): I. V. Kudryavchenko. "Features of infocommunication networks formation based on self-organizing mobile smart devices," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 390–400, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Развитие малоразмерных мобильных интеллектуальных устройств (МИУ), объединяемых на основе беспроводных сетевых технологий в рой для совместного решения общих задач [1], требует дальнейшего совершенствования старых и создания новых сетевых протоколов. Основные требования к вновь разрабатываемым беспилотным авиа- и автотранспортным средствам, которые можно отнести к МИУ, сформулированы в дорожных картах Национальной технологической инициативы «Аэронет» и «Автонет».¹ В частности, в указанных документах перечислены требования к беспроводной сети роя, которые накладывают определенные ограничения на возможности его организации с помощью известных сетевых протоколов самоорганизующихся сенсорных сетей или сетей мобильной связи [2].

¹http://nti.one/documents/Normative_road_maps/?sphrase_id=10945#d839 (Дата обращения: 09.10.2019).

Работа посвящена выявлению особенностей инфокоммуникационных сетей, обеспечивающих самоорганизацию роя МИУ и его перемещение по маршруту следования.

2. Анализ роевой организации мобильных интеллектуальных устройств

Организация роя из однотипных МИУ обеспечивается за счет объединения их в инфокоммуникационную сеть, в которой циркулируют информационные потоки, обусловленные решаемой задачей, внешней средой, системным программным обеспечением (ПО), внутренними состояниями МИУ. В процессе функционирования роя системное ПО должно координировать поведение его элементов, например, своевременно выдавать команды на исполнительные устройства с целью корректировки траекторий МИУ. Учитывая, что с течением времени могут происходить отказы отдельных элементов роя, необходимо обеспечить распределенное хранение данных в сети, а также добавление новых и удаление отказавших узлов. Должен быть предусмотрен порядок назначения приоритетных и/или командных узлов. Также должны обеспечиваться инициализация роя, формирование заданных пространственных построений МИУ, защита каналов связи между элементами. В течение всего времени функционирования роя должны решаться задачи навигации, диагностики, идентификации и ряд других. Решение перечисленных задач должно осуществляться на основе протоколов беспроводной сети, объединяющей МИУ.

В данной работе под протоколом понимаются правила взаимодействия МИУ, которые могут быть описаны в виде набора процедур для каждого из уровней OSI (Open System Interconnection) модели. Протокол регламентирует топологию сети, маршрутизацию, адресацию, порядок доступа узлов сети к каналу передачи данных, формат передаваемых пакетов, набор управляющих команд для узлов сети и систему защиты информации [3]. Иными словами, протоколы определяют последовательность и формат сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты одного уровня, находящиеся в разных узлах.

Перечислим некоторые особенности инфокоммуникационной сети, которые задает роевая организация МИУ:

- 1) ограничение времени жизни сети;
- 2) высокая живучесть сети;
- 3) широковещательный характер рассылки пакетов (дейтаграмм);
- 4) применение коммуникационных устройств разных типов;

5) динамическая кластеризация узлов сети;

6) защищенность информации в сети.

Отметим, что время жизни сети ограничивается решаемой роом задачей и может составлять от нескольких минут до десятков и более часов.

Очевидным условием также является высокая живучесть сети, которая должна обеспечивать выполнение задачи в случае деградации роа вследствие отказов его элементов, а также при неблагоприятных воздействиях внешней среды.

Широковещательный характер рассылки пакетов связан с решением навигационной задачи и необходимостью поддерживать сеть в рабочем состоянии в режиме реального времени.

Применение коммуникационных устройств разных типов связано с условием 2). Предполагается, что МИУ могут использовать каналы связи, основанные на различных физических принципах: радио-, оптические и/или акустические. Следствием чего является возможность наложения сетей, которая может быть реализована в виде оверлейных сетей, обеспечивающих параллельное распределение информационных потоков между элементами роа [5].

Динамическая кластеризация узлов сети является необходимым требованием самоорганизации сети и должна осуществляться в автоматическом режиме или по инициативе оператора роа. Кластеризация предполагает возможность изменения роли отдельных узлов при одно-, двух- или трехуровневой архитектуре сети, которая может изменяться в процессе выполнения поставленной задачи. В автоматическом режиме кластеризация может осуществляться в связи с ограниченными возможностями каналов связи и значениями мощности передатчиков на основании критерия соседства узлов роа [6]. Например, при организации радио- или оптических каналов фронт волны распространяется «по лучу» и сигнал может надежно приниматься соседними элементами, находящимися в пределах прямой видимости. Остальные элементы попадают в область тени. Другим критерием разбиения узлов сети на кластеры является учет барицентрических координат [7].

Защищенность информации в сети обеспечивается шифрованием передаваемых и хранимых данных на основе криптографически стойких алгоритмов [8]. Стойкость алгоритмов должна быть достаточной для обеспечения возможности многоразового применения отдельных МИУ в качестве элементов сети. Также высокая защищенность информации достигается благодаря применению направленных антенн и маломощных излучателей.

3. Пример организации инфокоммуникационной сети роя, сформированного в дискретном пространстве на основе циклического кодирования

Рассмотрим модель роя, размещенного в дискретном пространстве, который содержит N_1 узлов (МИУ), соединенных акустическими и радиоканалами [1]. Расстояние между i -м и j -м узлами ($i=0, 1, 2, \dots, N_1$; $j=0, 1, 2, \dots, N_1$) определяется по формуле

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n |x_{ki} - x_{kj}|, \quad (1)$$

где $k \leq 3$ — количество координатных осей дискретного пространства; $x_{ki} \in \mathbb{Z}$ — координаты i -го узла, $x_{kj} \in \mathbb{Z}$ — координаты j -го узла; $\mathbb{Z}$ — множество целых чисел.

Рассмотрим рой из $N_1=8$ узлов, сформированный с помощью циклического кода (6,3), который задан образующим полиномом $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$. Данный код обеспечивает минимальное кодовое расстояние по Хэммингу $d_{\min}=3$, что позволяет разместить узлы роя на безопасных расстояниях друг от друга, исключаящих коллизии/столкновения МИУ [9]. Результаты кодирования даны в табл. 1, а соответствующая схема размещения роя на дискретной плоскости изображена на рис. 1.

Табл. 1. Пример кодирования роя циклическим кодом (6, 3): $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$
Table 1. An example of encoding a swarm with a cyclic code (6, 3): $P(x)=x^3 \oplus x \oplus 1$

Номер узла	Двоичный код $Q(1,0)$	Циклический код $F(1,0)$	Координаты узла (x_i, y_i)
0	000	000 000	0, 0
1	001	000 011	1, 2
2	010	010 110	3, 4
3	011	011 101	2, 6
4	100	100 111	7, 5
5	101	101 100	6, 7
6	110	110 001	4, 1
7	111	111 010	5, 3

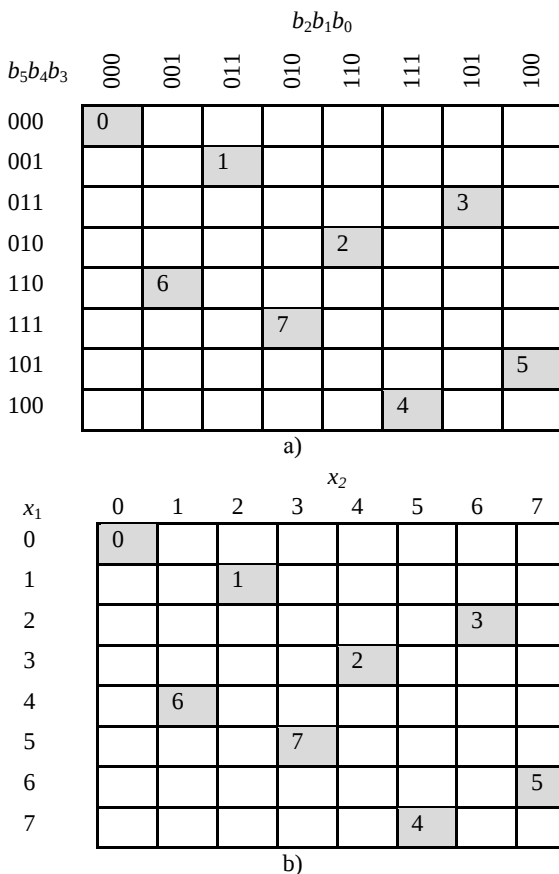


Рис. 1. Пример размещения на дискретной плоскости роя, сформированного на основе циклического кода (6,3).

Разметка координатных осей: а) — коды Грея; б) — десятичные коды.

Fig. 1. An example of placement on a discrete plane of a swarm formed on the basis of code (6,3)
 Marking of coordinate axes: a) – Gray codes; b) – decimal codes

Отметим, что для правильного позиционирования узлов на дискретной плоскости кодовые слова из табл. 1 разбивались на триады, которые затем были использованы для кодирования строк и столбцов карты Карно на рис. 1, а. Полученные таким образом координаты узлов в двоичном коде Грея пересчитывались в десятичные координаты, что хорошо видно на рис. 1, б.

Расчет расстояний между узлами роя (рис. 1, б) осуществлялся по формуле (1). Результаты расчета даны в табл. 2.

Табл. 2. Расстояния между узлами роя, сформированного на основе кода (6,3)

Table 2. Distances between the swarm nodes, which were calculated on the basis of the code (6,3)

Номер узла	Расстояния d_{ij}							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	3	7	8	12	13	5	8
1	3	0	4	5	9	10	4	5
2	7	4	0	3	5	6	4	3
3	8	5	3	0	6	5	7	6
4	12	9	5	6	0	3	7	4
5	13	10	6	5	3	0	8	5
6	5	4	4	7	7	8	0	3
7	8	5	3	6	4	5	3	0

На рис. 2 и рис. 3 изображены графы радиосети и сети на основе акустических каналов для сформированного роя с учетом возможных отказов оборудования радиоканалов МИУ и ограничений на дальность распространения сигналов по радио- и акустическим каналам.

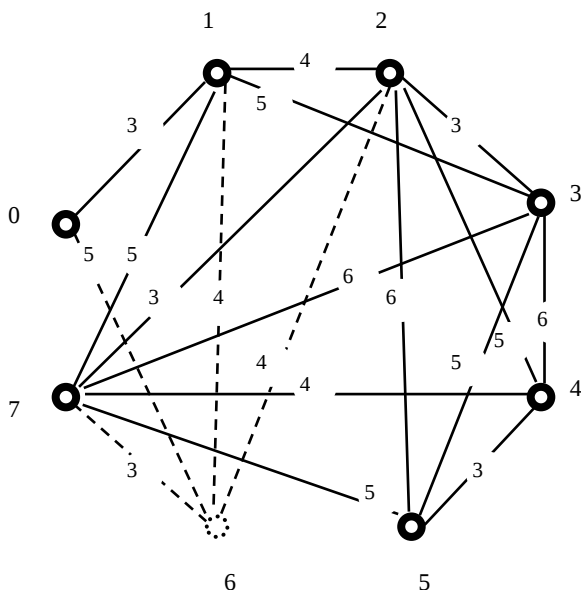


Рис. 2. Граф радиосети роя, сформированного на основе кода (6,3): $D_{R \max} = 6$, $q_R = 1/8$
Штриховыми линиями обозначены каналы, связанные с отказавшим 6-м узлом.

Fig. 2. The radio network graph of the swarm, based on code (6,3): $D_{R \max} = 6$, $q_R = 1/8$
The dashed lines indicate the channels associated with the failed 6th node

Для упрощения анализа было принято, что акустические каналы обеспечивают связь между i -м и j -м узлами с вероятностью отказа q_s при условии, что расстояние, определяемое по формуле (1), не превышает значения $D_{s \max}$, а радиоканалы обеспечивают связь между i -м и j -м узлами, находящимися на расстоянии $d_{ij} \leq D_{R \max}$, с вероятностью отказа q_R . Отказ радиоканала, связанного с i -м узлом, интерпретируется как отказ приемо-передающего оборудования, размещенного в i -м узле.

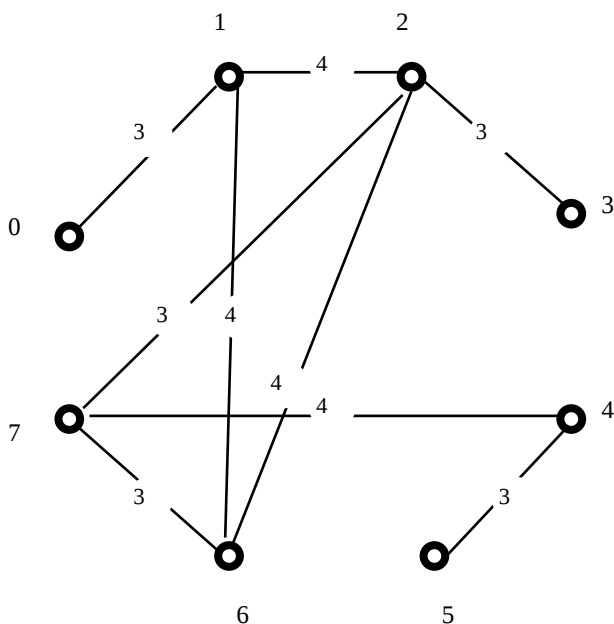


Рис. 3. Граф сети роя на основе акустических каналов: $D_{s \max} = 4$, $q_s = 0$.

Fig. 3. The graph of the swarm network, based on acoustic channels: $D_{s \max} = 4$, $q_s = 0$

На рис. 4 изображен граф сети на основе акустических и радиоканалов с параметрами: $D_{s \max} = 4$, $q_s = 0$; $D_{R \max} = 6$, $q_R = 1/8$.

Для каждого узла сети сформированного роя были рассчитаны параметры, сведенные в табл. 3, на основе которых может осуществляться его дальнейшая кластеризация.

Вес узла определяется как сумма расстояний от всех узлов роя до данного узла. Минимальный вес имеет узел, находящийся в центре масс роя [1]. Таким образом, координаты узла с минимальным весом соответствуют барицентрическим координатам роя.

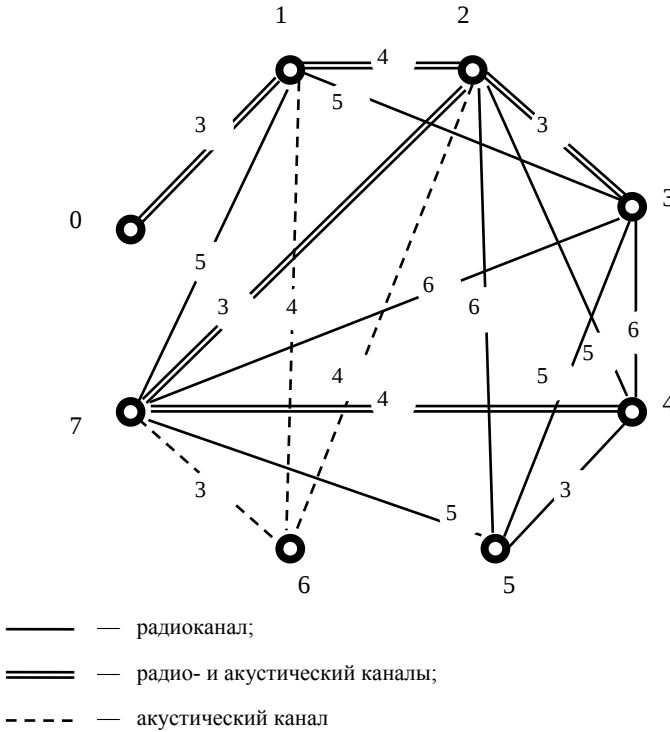


Рис. 4. Граф сети роя на основе радио- и акустических каналов:
 $D_{S\max} = 4, q_S = 0; D_{R\max} = 6, q_R = 1/8$.

Fig. 4. The graph of the swarm network, based on radio- and acoustic channels:
 $D_{S\max} = 4, q_S = 0; D_{R\max} = 6, q_R = 1/8$

Табл. 3. Расчетные параметры сети роя
 Table 3. The swarm network calculated parameters

Номер узла	Число соседей	Число каналов	Вес узла
0	1	2	56
1	5	7	40
2	6	9	40
3	5	6	30
4	4	5	38
5	4	4	34
6	3	3	50
7	6	8	46

В необходимых случаях рой может быть разделён на кластеры относительно узлов-претендентов с учетом барицентрических координат и

критерия соседства. Должны учитываться следующие расчетные параметры узлов роя:

- максимальное число доступных каналов связи;
- максимальное количество соседних узлов;
- возможность доступа к каналам различной физической природы;
- веса узлов.

В рассмотренном примере узлами-претендентами являются узлы 1, 2, 7 (табл. 3).

Вопрос об учете веса узла, то есть меры близости узла-претендента к центру масс роя, требует дополнительного изучения и является дискуссионным. С одной стороны, разделение роя, осуществляемое по инициативе оператора, предполагает возможность приема управляющих сигналов. В этом случае приоритет следует отдавать внешним узлам роя, имеющим максимальный вес. С другой стороны, внутренние узлы в большей степени скрыты от внешнего наблюдения и могут перемещаться по кратчайшим траекториям с минимальными скоростями, что является дополнительным преимуществом в режиме самоорганизации роя.

4. Заключение

Проведенный анализ роевой организации МИУ и особенностей функционирования самоорганизующейся инфокоммуникационной сети на их основе позволил сформулировать дополнительные требования к сетевым протоколам.

Была рассмотрена модель формирования роя в дискретном пространстве на основе циклического кодирования с кодовым расстоянием по Хэммингу $d_{\min} = 3$. Данная модель позволяет исключить коллизии между узлами роя и выбрать узлы-претенденты, относительно которых должна осуществляться его динамическая кластеризация.

По результатам исследования может быть сделан вывод о недостаточных возможностях известных протоколов беспроводных сенсорных сетей и сетей мобильной связи для решения задач организации и надежного функционирования роя МИУ. Дополнительными свойствами протоколов инфокоммуникационных сетей на основе самоорганизующихся МИУ должны стать поддержка механизмов создания оверлейных сетей, функционирующих с разными типами каналов связи, а так же динамической кластеризации узлов сети по критериям соседства и барицентрических координат.

Список литературы

- 1 Кудрявченко И. В. Описание двумерного роя частиц как объекта терминального управления // Инновационная наука. 2016. № 1, Ч. 2. С. 64—67.
- 2 Колыбельников А. И. Обзор технологий беспроводных сетей // Труды МФТИ. 2012. Т. 4, № 2. С. 3—29.
- 3 Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб. : Питер. 2012. 960 с.
- 4 Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб. : Питер. 2016. 992 с.
- 5 Ponomarenko A. A., Malkov Yu. A., Logvinov A. A., Krylov V. V. An overlay network for distributed exact and range search in one-dimensional space // Business Informatics. 2016. No. 1 (35). P. 26—36.
- 6 Барсегян А. А. и др. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб. : БХВ-Петербург. 2004. 336 с.
- 7 Кудрявченко И. В., Карлусов В. Ю. Измерение параметров движения мобильных объектов с «коллективным» поведением // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2018. № 3. С. 92—99.
- 8 Фергюсон Н. Практическая криптография. М. : Диалектика. 2005. 424 с.
- 9 Березкин Е. Ф. Основы теории информации и кодирования. СПб. : Лань, 2019. 320 с.

Информация об авторе

Кудрявченко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1669-5447.

Information about the author

Ivan V. Kudryavchenko, candidate of technical sciences, docent of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1669-5447.

УДК 621.391

Анализ надежности аппаратуры локальной вычислительной сети¹

Карпенко Е. А., Мухтаров А. А., Шегал А. А.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

ул. Мира, 32, Екатеринбург, 620078, Российская Федерация

ashegal@mail.ru

Получено: 28 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В работе представлен материал по анализу и расчету надежности аппаратуры ЛВС Института радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ — РТФ). Показано, что надежность сети отвечает требованиям современных стандартов. Приводятся рекомендации по модернизации ЛВС, которые позволяют на основе имеющегося оборудования повысить показатели качества ЛВС.

Ключевые слова: Локальная вычислительная сеть (ЛВС), надежность, аппаратура связи, линия связи, коммутационные узлы.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Карпенко Е. А., Мухтаров А. А., Шегал А. А. Анализ надежности аппаратуры локальной вычислительной сети // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 401—410.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Карпенко, Е. А. Анализ надежности аппаратуры локальной вычислительной сети / Е. А. Карпенко, А. А. Мухтаров, А. А. Шегал // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 401—410.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Reliability analysis of local area network equipment

Evgenij A. Karpenko, Andrey A. Mukhtarov, and Anna A. Shegal
Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin
32, Mira Str., Ekaterinburg, 620078, Russian Federation
ashegal@mail.ru

Received: July 28, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: Paper presents the material of the analysis and calculation of LAN equipment reliability of the Institute of radio electronics and information technology (IRIT–RTF). It is shown that the network reliability meets the requirements of modern standards. Recommendations about upgrade of a LAN which allow to raise LAN figures of merit on the basis of the available equipment are provided.

Keywords: Local area network (LAN), reliability, communication equipment, communication line, switching nodes.

For citation (IEEE): Evgenij A. Karpenko et al. “Reliability analysis of local area network equipment,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 401–410, 2019. (In Russ.).

1. Введение

В соответствии с национальной программой «Цифровая экономика Российской Федерации» [1] во всех сферах общественной деятельности поставлена задача перехода к цифровым данным.

Решение этой задачи, в частности, зависит от качества предоставления разнообразных информационно-вычислительных услуг пользователям сетей путем организации удобного и надежного доступа к сетевым ресурсам.

Успешная работа Института радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ — РТФ) и его взаимодействие с другими подразделениями Уральского федерального университета (УРФУ) непосредственно зависит от качества работы ЛВС ИРИТ — РТФ.

Целью предлагаемой работы является исследование надежности ЛВС института, для чего требуется решить следующие задачи:

- провести анализ структуры ЛВС ИРИТ — РТФ;
- выполнить расчет надежности ЛВС;
- на основании анализа работы сети и расчета ее надежности разработать технические решения по модернизации сети.

2. Структура ЛВС ИРИТ — РТФ

ЛВС имеет топологию типа «звезда» (рисунок 1): все узлы связаны с центральным узлом сети (узел А3) с использованием оптической линии связи. На каждом этаже находится по два узла (в коммутационных шкафах), один в левом крыле, второй в правом. Каждый коммутационный шкаф подключает по медной линии все терминальные устройства, находящиеся в аудиториях своего крыла.

Уровень ядра ЛВС построен на базе маршрутизирующих коммутаторов Cisco Catalyst 4500. На коммутаторах ядра сети терминируются магистральные виртуальные сети, образующие магистральный сегмент ЛВС.

Уровень распределения ЛВС организован на базе стеков коммутаторов Cisco Catalyst 3750 и Cisco Catalyst 3850. К коммутаторам распределения подключается оборудования уровня доступа.

Уровень доступа ЛВС реализован на базе коммутаторов Cisco Catalyst 2960 и Cisco Express 500: при этом к коммутатору Cisco Catalyst 2960 идет подключение последующих коммутаторов Cisco Express 500 с использованием соединения типа «звезда» (рисунок 2). Узлы доступа размещены в коммутационных шкафах А0, А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7, А8, А9.

Отдельным элементом ЛВС является серверная ферма. Серверы подключаются к коммутатору Cisco Catalyst 3750G.

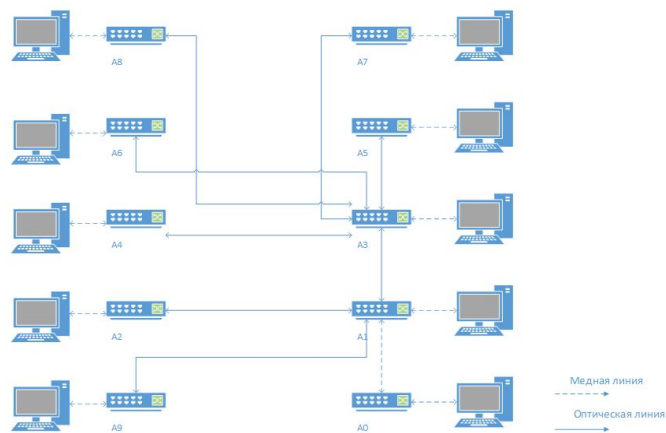


Рис. 1. Схема ЛВС ИРИТ — РТФ: цокольный этаж — коммутационные шкафы (узлы) А9, А0; первый этаж — коммутационные шкафы А2, А1; второй этаж — коммутационные шкафы А4, А3; третий этаж — коммутационные шкафы А6, А5; четвертый этаж — коммутационные шкафы А8, А7.

Fig. 1. The IRIT – RTF LAN scheme: ground floor – nodes А9, А0; ground floor – А2, А1; second floor – А4, А3; third floor – А6, А5; fourth floor – А8, А7

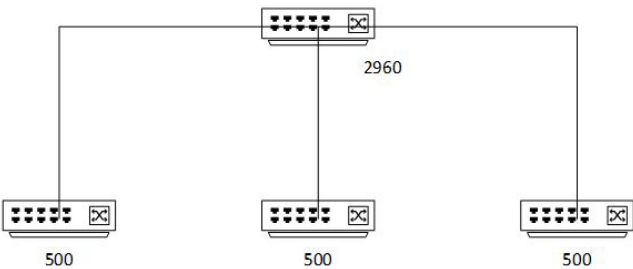


Рис. 2. Схема подключения узлов доступа. 2960 — обозначает коммутатор Cisco Catalyst 2960; блок 500 — коммутатор Cisco Express 500

Fig. 2. Access nodes connection diagram. 2960 refers to the Cisco Catalyst 2960 Switch; Block 500 — Cisco Express 500 Switch

На рисунке 3 для примера приводится компоновка телекоммуникационной стойки А 2, расположенной вблизи аудитории Р-125, а в таблице 1 характеристика ее оборудования.

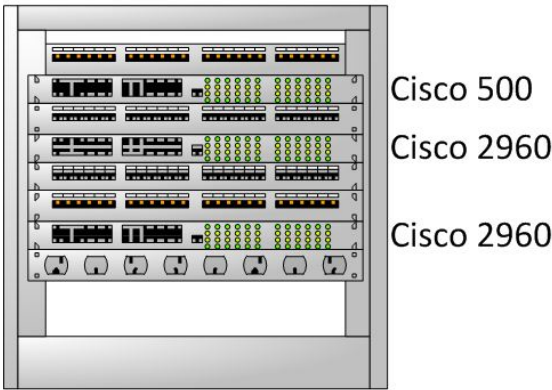


Рис. 3. Компоновка телекоммуникационной стойки А2
Fig. 3. A2 telecommunication rack layout

Таблица 1. Характеристики телекоммуникационной стойки А2

Table 1. A2 Telecom Features

№	Обозначение	Наименование	Кол.
1	Коммутатор Cisco 500, 24 Port	WS-CE500-24TT V02	1
2	Коммутатор Cisco, Catalyst 2960, 24 Port	WS-C2960-24-S V03	1
3	Коммутатор Cisco Catalyst 2960-S, 48 Port	WS-C2960S-48TS-S	1
4	Патч-панель RJ-45 Cat.5, 24 Port		4
5	Сетевой фильтр		1

3. Расчет показателей надежности ЛВС ИРИТ — РТФ

Для анализа надежности ЛВС воспользуемся рекомендациями [2] и применим метод построения структурной схемы надежности (Reliability block diagram – RBD). RBD является графическим представлением работоспособного состояния системы [3], показывающим логическую связь функционирующих блоков, необходимых для успешной работы системы.

В качестве показателя надежности восстанавливаемых блоков используется [4] стационарный коэффициент готовности — K_g , который определяется как

$$K_g = T_n / (T_n + T_v), \quad (1)$$

где T_n — средняя наработка (среднее время работы) между отказами блока, T_v — среднее время восстановления блока.

В соответствии со схемой соединения абонента к сети (для примера рассматривается подключения абонента для левого крыла первого этажа к телекоммуникационному узлу А2, рисунок 4), представим ее структурную схему надежности (рисунок 5). Подобных подключений для ЛВС ИРИТ — РТФ насчитывается 10.

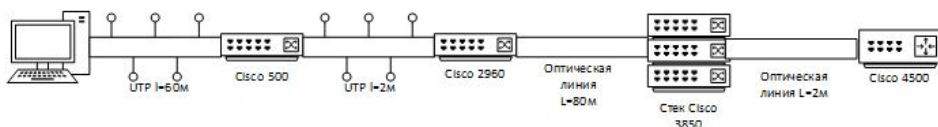


Рис. 4. Схема подключения абонента к сети ИРИТ — РТФ для левого крыла 1 этажа.

Fig. 4. The scheme of connecting a subscriber to the IRIT—RTF network for the 1st floor

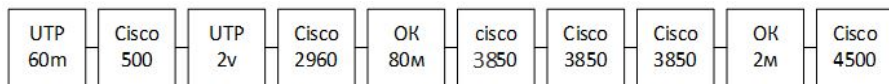


Рис. 5. Структурная схема соединения компонентов ЛВС по надежности для левого крыла 1 этажа. UTP60м, UTP2м — медный провод длиной 60 м и 2 м; блоки ОК80м, ОК2м — оптический кабель длиной 80 и 2 м соответственно.

Fig.5. The structural diagram of the LAN connections components. UTP60m, UTP2m – copper cable 60 m and 2 m long; blocks ОК80m, ОК2m – optical cable 80 and 2 m long, respectively

Согласно [5, 6] для последовательной по надежности схеме соединения элементов коэффициент готовности системы определяется как

$$K_{гс} = \prod K_i, \quad (2)$$

где $K_{гс}$ — коэффициент готовности системы подключения абонента к узлу А2, K_i — коэффициент готовности любого i -блока ($i = 1, 2, \dots, 10$), представленного на рисунке 5.

Таким образом,

$$K_{сcA2} = K_{UTP60m} * K_{cisco500} * K_{UTP2m} * K_{cisco2960} * K_{OK80m} * K_{cisco3850} * K_{cisco3850} * K_{cisco3850} * K_{OK2m} * K_{cisco4500} \quad (3)$$

Для расчета требуемых показателей надежности воспользуемся технической документацией для сетевого оборудования [7—11] и рассчитаем коэффициенты готовности устройств (таблица 2).

Таблица 2. Показатели надежности для сетевого оборудования

Table 2. Reliability indicators for network equipment

Сетевое устройство	Время наработки на отказ — T_n (час)	Интенсивность отказов — λ (1\час)	Время восстановления — T_v (ч)	Коэффициент готовности — K_g
Cisco Catalyst 2960-24TT-L	407707	$2,45 \cdot 10^{-6}$	2	$K_{cisco2960} = 0,99999$
Cisco Catalyst WS-C4500X-24X-ES	209330	$4,77 \cdot 10^{-6}$	2	$K_{cisco4500} = 0,99999$
Cisco Catalyst Express 500-24LC	282705	$3,53 \cdot 10^{-6}$	2	$K_{cisco500} = 0,99999$
Cisco Catalyst WS-C3850-24S	300760	$3,32 \cdot 10^{-6}$	2	$K_{cisco3850} = 0,99999$
Cisco Catalyst 3750X-24T	189704	$5,27 \cdot 10^{-6}$	2	$K_{cisco3750} = 0,99999$

Длина линий связи подключения абонентов для всех узлов ЛВС ИРИТ — РТФ приводится в таблице 3.

Таблица 3. Длина линий связи подключения коммутационных узлов к абоненту
Table 3. The length of communication lines connecting switching nodes to the subscriber

Наименование	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
УТР(м)	60	55	57	60	58	50	49	48	60
Cisco 500	+	+	+	+	+	+	+	+	+
УТР(м)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cisco 2960	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ОК(м)	30	2	50	2	80	45	90	70	130
Стек 3850				+	+	+	+	+	+
Стек 3750	+	+	+						
ОК (м)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cisco 4500x	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Для вычисления коэффициентов готовности линий связи воспользуемся выражением, предложенным в [6]:

$$T_n(L) = T_{нз} (L_3 / L), \quad (4)$$

где $T_n(L)$ — зависимость средней наработки между отказами линии связи от ее длины L , $T_{нэ}$ — средняя наработка между отказами для линии связи эталонной длины, $L_э$ — эталонная длина кабельной линии.

Известно [6], что среднее число отказов оптического кабеля длиной 100 км за год (8760 ч) — $\lambda_{ОК} = 0,34$ отк/год.

Следовательно, рассматривая установившийся режим [4], для которого $T_{нОК} = 1/\lambda_{ОК}$, можно определить, что средняя наработка между отказами оптической линии связи длиной 100 км = 25773 ч.

Для кабеля категории UTP длиной 100 м наработка между отказами $T_{нUTP} = 16337066$ ч.

Заметим, что значение показателя $T_{нUTP}$ (как и аналогичные значения T_n — среднего времени между отказами, представленные в таблице 2) выглядит фантастическим, поскольку оно превышает 10 столетий! Конечно, так однозначно («вульгарно», как отмечал один из первых выпускников РТФ УПИ, д. т. н. Алимов Ю. И. [12]) подходить к этим расчетам нельзя, поскольку данные отражают только вероятность появления внезапного отказа, а старение, отказы искусственного происхождения (умышленные и неумышленные), «моральный износ» не рассматриваются!

С другой стороны, например, для современных цифровых АТС значение коэффициента готовности $K_{гс}$ должно быть $\geq 0,999995$ [13], что подразумевает подобные характеристики средней наработки между отказами компонентов. Зная длину линий связи (таблица 3) и воспользовавшись (4), можно определить значение $T_n(L)$ для всех кабельных соединений.

Согласно [6] среднее время восстановления любого типа кабеля не зависит от его длины. Для оптического кабеля принимается $T_{в ОК} = 4, 24$ ч, а для кабеля категории UTP $T_{в UTP} = 1$ ч.

С учетом (1, 4) и данных, представленных таблицей 3, определим коэффициенты готовности линий связи для наихудшего случая (самых длинных линий связи).

В результате получим, $K_{г UTP} \geq 0,99999997$; $K_{г ОК} \geq 0,9999998$.

Подставляя в (3) исходные данные для расчета, получим для абонентов, подключаемых к коммутационному узлу А2, стационарный коэффициент готовности: $K_{гА2} = 0,999900004$.

Проводя аналогичные расчеты для остальных коммутационных узлов сети, с учетом данных, представленных в таблицах 2 – 3, рассчитаем надежность ЛВС ИРИТ — РТФ: $K_{г ЛВС} = 0,999$.

В соответствии с требованиями к устойчивости функционирования сети передачи данных [14], значение коэффициента готовности — $K_{г}$ должно быть $\geq 0,99$, поэтому можно сделать вывод, что аппаратная надежность ЛВС ИРИТ — РТФ соответствует требованиям стандарта.

4. Рекомендации по модернизации сети

В ходе анализа работы оборудования ЛВС ИРИТ — РТФ выявлено, что часть узлов не справляется с нагрузкой по скорости передачи информации, кроме того, для бесперебойной работы локальной сети необходимо организовать резерв ядра ЛВС, поскольку выход из строя коммутационного узла А3 выводил из строя всю сеть. По указанным причинам был разработан план модернизации ЛВС ИРИТ — РТФ на базе существующего оборудования.

Основная идея заключается в расформировании стеков коммутаторов, построенных на оборудовании Cisco Catalyst 3750 и Cisco Catalyst 3850. Первоначально стек коммутаторов Cisco Catalyst 3750 находился в коммутационном шкафу А1, стек коммутаторов Cisco Catalyst 3850 — в шкафу А3.

Для решения поставленной задачи предлагается установить сетевое оборудование по коммутационным шкафам в соответствии с рисунком 6, вследствие чего будет получено увеличение пропускной способности узла до 10 G. Как следует из рисунка 6, все узлы сети будут подключены к ядру — двум коммутаторам Cisco Catalyst 4500, территориально разделенным. Сами коммутаторы Cisco Catalyst 4500 соединяются друг с другом по технологии Cisco VSS, которая позволяет объединить два физических коммутатора в один логический. Оба коммутатора являются активными и обеспечивают передачу пакетов. При этом управление коммутаторами осуществляется только одним из устройств (по существу, реализуется нагруженное резервирование замещением ядра ЛВС).

5. Выводы

1. Исследована структура и оборудование, применяемое для реализации ЛВС ИРИТ — РТФ.
2. Выполнен расчет надежности ЛВС ИРИТ — РТФ. Надежность сети соответствует требованиям, предъявляемым стандартом [14] к устойчивости работы сети связи общего пользования.
3. Предложены мероприятия, которые позволяют увеличить пропускную способность узла ЛВС до 10 Гбит/с за счет расформирования стеков коммутаторов, построенных на оборудовании Cisco Catalyst 3750 и Cisco Catalyst 3850.
4. Рекомендуется реализовать нагруженное резервирование замещением ядра сети, которое будет построено на двух коммутаторах Cisco Catalyst 4500, территориально разделенных.

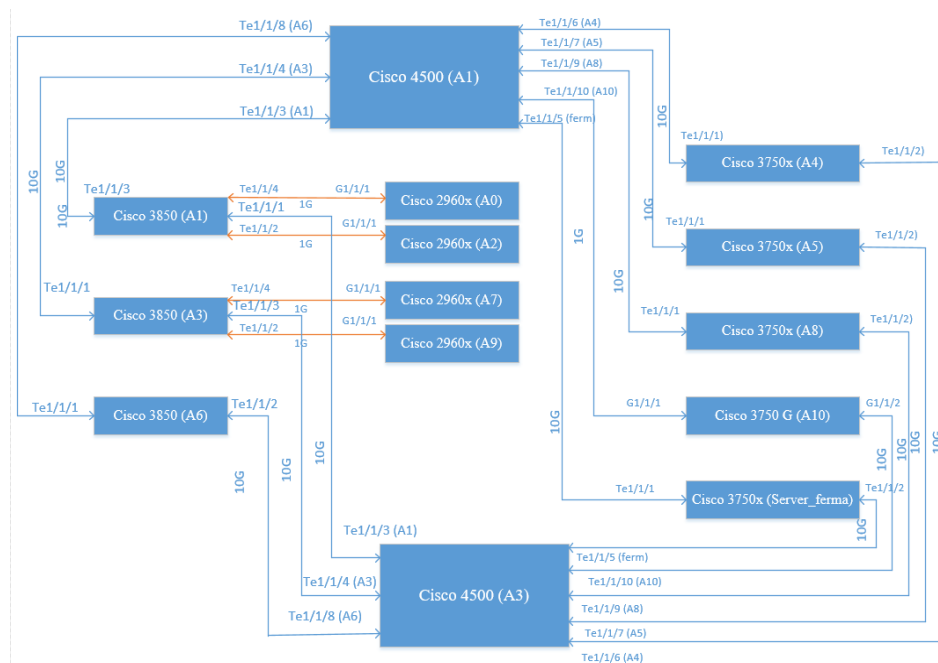


Рис. 6. Предлагаемая схема модернизации ЛВС ИРИТ — РТФ, где А — узел коммутации, server_ferma — коммутатор для подключения серверов.

Fig. 6. The proposed IIRIT–RTF LAN modernization scheme, where A is the switching node, server_ferma is the switch for connecting the servers

Список литературы

1. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Распоряжение правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 года № 1632-р.
2. ГОСТ Р 51901.5—2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. М. : Стандартинформ, 2005. 45 с.
3. ГОСТ Р 51901.14—2007. Менеджмент риска. Структурные схемы надежности и булевы функции. М. : Стандартинформ, 2008. 24 с.
4. ГОСТ 27.002—2015. Надежность в технике. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2016. 28 с.
5. Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. Надежность технических систем. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
6. Шувалов В. П., Егунов М. М., Минина Е. А. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей. М. : Горячая линия — Телеком, 2015. 168 с.
7. Cisco 2960 datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-2960-series-switches/product_data_sheet_0900aecd80322c0c.html (дата обращения: 22.05.2018).
8. Cisco 4500x datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-4500-x-series-switches/data_sheet_c78-696791.html (дата обращения: 22.05.2018).

9. Cisco express 500 datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-express-500-series-switches/70485-cat-exp-500-config.html> (дата обращения: 22.05.2018).
10. Cisco 3750 datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-3750-series-switches/product_data_sheet0900aecd80371991.html (дата обращения: 22.05.2018).
11. Cisco 3850 datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-3850-series-switches/datasheet_c78-720918.html (дата обращения: 22.05.2018).
12. Алимов Ю. И. Элементы теории эксперимента. Опытная проверка утверждений математической статистики : учебное пособие для студентов радиотехнического факультета УПИ. Свердловск, Из-во Уральского политехнического института, 1978. 92 с.
13. Приказ Мининформсвязи от 27 сентября 2007 года № 113 / www.minsvyaz.ru.
14. ГОСТ 53111—2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М. : Стандартинформ, 2008. 11 с.

Информация об авторах

Карпенко Евгений Андреевич — выпускник 2018 г. Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, направление подготовки 11.04.02 — Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Россия, Екатеринбург).

Мухтаров Андрей Александрович — инженер отдела обеспечения деятельности Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург).

Шегал Анна Айзиковна — канд. техн. наук, доцент Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург).

Information about the authors

Evgenij A. Karpenko is a graduate of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, direction of training 11.04.02 – Infocommunication technologies and communication systems (Russia, Ekaterinburg).

Andrey A. Mukhtarov – engineer of the department for the activity of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Russia, Ekaterinburg).

Anna A. Shegal is a Candidate of Engineering Sciences, associate professor of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Russia, Ekaterinburg).

Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды

Малаховский О. Ю., Фотина Л. В.

*Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
ул. Красноармейская, 99а, Томск, 634034, Россия
toy@niipr.ru*

Получено 1 ноября 2019 г.

Отрецензировано 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 20 декабря 2019 г.

Аннотация: *Представлены результаты исследования зависимости параметров быстродействующих импульсных кремниевых диодов, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния n-типа с различной концентрацией примеси, от диффузии примеси золота.*

Ключевые слова: *обратное восстановление, p-n переход, p-область, n-область, диффузия, диффузия золота, эпитаксиальная структура, быстровосстанавливающийся диод, время обратного восстановления.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Малаховский О. Ю., Фотина Л. В. Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 411—415.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Малаховский, О. Ю. Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды / О. Ю. Малаховский, Л. В. Фотина // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 411—415.

High-speed switching diodes

O. Yu. Malakhovskiy and L.V. Fotina
Scientific & Research Institute of Semiconductor Devices
99a, Krasnoarmeiskaya Str., Tomsk, 634034, Russia
moy@niipp.ru

Received: November 1, 2019
Peer-reviewed: December 16, 2019
Accepted: December 20, 2019

Abstract: *The results of studies of the effect gold-to-silicon diffusion for the electrical parameters of silicon high-speed switching diodes are presented.*

Keywords: *high-speed diodes, p-n junction, reverse recovery time.*

For citation (IEEE): O. Yu. Malakhovskiy et al. "High-speed switching diodes," *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 411–415, 2019.

1. Введение

Время обратного восстановления диода — это переходный процесс, возникающий при переключении диода с p - n переходом из проводящего состояния (прямого) в закрытое (обратное). Процесс обратного восстановления возникает вследствие накопления неосновных носителей в обеих областях диода — катоде и аноде при прямом протекании тока через диод. После смены полярности напряжения на обратное, накопленные неосновные носители, которые не успели рекомбинировать, возвращаются в области, где они являются основными, но неравновесными (электроны в p -область, дырки в n -область), создавая короткий импульс (выброс) обратного тока. Время действия этого импульса тока (время обратного восстановления) тем меньше, чем меньше величина накопленного заряда неосновных носителей заряда при прямом смещении и меньше время установления равновесного состояния. Известно [1, 2], что для уменьшения времени обратного восстановления используется процедура легирования золотом области p - n перехода. Примесь золота существенно уменьшает времена рекомбинации и установления равновесного состояния при переключении смещения на диоде из прямого направления в обратное.

Процессы, происходящие в кремнии при легировании золотом, рассмотрены достаточно подробно [1], однако результаты влияния легирования золотом на параметры диодов (за исключением времени обратного

восстановления) в литературе практически не встречаются. В данной работе авторы попытались ликвидировать этот пробел и рассмотреть влияние примеси золота на такие параметры диодов с p - n -переходом как обратное напряжение, обратный ток, емкость, прямое напряжение.

2. Технология изготовления экспериментальных образцов

Для исследования зависимости параметров быстродействующих импульсных кремниевых диодов от концентрации носителей заряда в n -слое нами выбраны кремниевые эпитаксиальные структуры с удельным сопротивлением рабочего эпитаксиального слоя n -типа от 0,9 до 60 Ом·см, изготовленные АО «ЭПИЭЛ» (г. Зеленоград).

Структурная схема кристалла представлена на рис. 1. Кристаллы изготовлены по планарно-эпитаксиальной технологии. В целом технология изготовления экспериментальных образцов близка к известной технологии [2]. Существенное отличие заключается в том, что пленка золота для дальнейшей диффузии в данной работе наносилась не на всю поверхность, а формировалась локально с помощью гравировки золота диаметром значительно меньшим (40—80 мкм), чем диаметр анода (220—360 мкм). Первоначально пленка золота толщиной 0,1—0,2 мкм наносилась термическим напылением на поверхность рабочей пластины, на которой локально сформирован диффузионный p - n переход, а затем гравировалась по маске фоторезиста. Легирование кремниевой эпитаксиальной структуры золотом осуществлялось при температуре 1150°C в течение 10—20 мин. Режимы диффузии золота для всех концентраций были одинаковыми.

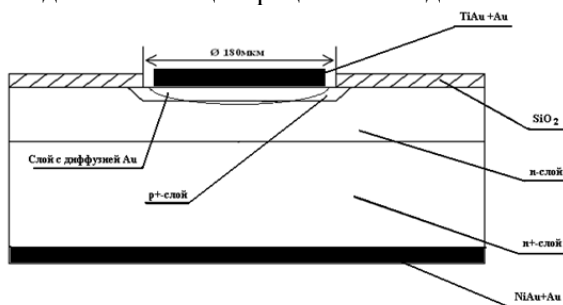


Рис. 1. Структурная схема кристалла.

Fig. 1. Block diagram of the crystal.

Металлизация анодного контакта проводилась послойным термическим напылением композиции TiAu толщиной 0,25+0,25 мкм с последующим осаждением золота толщиной 1,7 мкм. Термическое напыление слоев

титана (Ti) и золота (Au) проводилось в одном процессе на всю поверхность кремниевой пластины при температуре 200^0C . Металлизация катодного контакта формировалась электрохимическим осаждением никеля (Ni) толщиной $0,08\text{—}0,1\text{ мкм}$ на шлифованную поверхность подложки с последующим осаждением золота толщиной $1,5\text{ мкм}$.

3. Основные результаты

Установлено, что влияние процесса легирования золотом рабочей области эпитаксиальной структуры кремния на электрофизические параметры (емкость и обратное напряжение) диодов зависит от концентрации носителей заряда в эпитаксиальных n -слоях кремния, на которых изготовлены эти диоды.

Сравнительный анализ характеристик изготовленных диодов показал, что диффузия золота, как и ожидалось, значительно уменьшает время обратного восстановления на диодах, изготовленных на каждой из выбранных эпитаксиальных структур. Однако емкость диодов после диффузии золота может изменяться как в большую, так и меньшую сторону. После диффузии золота емкость уменьшалась на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах с высокой концентрацией носителей заряда ($8KЭФ0,9$) и увеличивалась на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния со средней и низкой концентрацией носителей заряда ($9KЭФ9$ и $15KЭФ60$). Влияние диффузии золота на обратное напряжение диодов также зависит от удельного сопротивления (концентрации носителей заряда) эпитаксиальной пленки. Значительное увеличение обратного напряжения наблюдается на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах с высокой концентрацией носителей заряда ($8KЭФ0,9$) и крайне малое изменение значений обратного напряжения — на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния со средней и низкой концентрацией носителей заряда ($9KЭФ9$ и $15KЭФ60$). Численные значения основных параметров этих диодов, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния без диффузии золота и после диффузии золота представлены в таблице 1.

4. Заключение

На основании проведенных исследований можно заключить, что на эпитаксиальных структурах кремния с высокой концентрацией носителей заряда в рабочем n -слое диффузия золота приводит к уменьшению значения емкости и значительному увеличению обратного напряжения. На эпитакси-

альных структурах кремния с низкой концентрацией носителей заряда в n -слое диффузия золота, наоборот, приводит к увеличению значений емкости и незначительному изменению (увеличению) обратного напряжения.

Таблица 1

Table 1

Тип эпитаксиального материала	Наименование параметра	Параметры без диффузии золота	Параметры после диффузии золота
8КЭФ0,9	Обратное напряжение при 1мкА, В	55	90
	Емкость при нулевом смещении, пФ	8,2	0,8
	Время обратного восстановления, нс	8,5	2,1
9КЭФ9	Обратное напряжение при 1мкА	70	100
	Емкость при нулевом смещении, пФ	3,02	6,6
	Время обратного восстановления, нс	6,5	1,96
15КЭФ60	Обратное напряжение при 1мкА	98	100
	Емкость при нулевом смещении, пФ	1,29	7,98
	Время обратного восстановления, нс	5,1	1,85

Список литературы

1. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зуев А. В., Зуев В. В. Особенности проявления акцепторного состояния золота в кремнии с термодонорами // ФТП. 2008. Т. 42, вып.3. С. 271—275.
2. Верховодов В. И., Носов Ю. Р., Склярчук А. М., Тарасевич А. И., Тарасиков М. В. Кремниевый быстродействующий микродиод // Электронная техника. 1990. Вып. 4 (207). С. 91—95.

Информация об авторах

Малаховский Олег Юрьевич, к.ф.-м.н., начальник лаборатории Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов, г. Томск, Российская Федерация.

Фотина Любовь Владимировна, ведущий инженер-технолог Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Oleg Yu. Malakhovskiy, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of Department of Semiconductor Devices of Research Institute of Semiconductor Devices (Tomsk, Russian Federation).

Liubov V. Fotina, Lead technology engineer of Laboratory of Department of Semiconductor Devices of Research Institute of Semiconductor Devices (Tomsk, Russian Federation).

УДК 53.043

Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои $n\text{-GaAs}(100)$ ¹

Торхов Н. А., Кривчук А. С.

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
ул. Красноармейская, 99 А, Томск, 634034, Россия
trkcf@mail.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: В локальном приближении исследовано влияние процессов имплантации ионов хлора Cl^{++} в эпитаксиальные слои арсенида галлия $\text{GaAs}\{100\}$ на фрактальные размерности D_f функциональных пространств $\mathbf{S}$ слоевых сопротивлений R_{SH} эпитаксиальных слоев $n\text{-GaAs}$ $\mathbf{S}(R_{\text{SH}})$ и функциональных пространств $\mathbf{S}(\rho_c)$ удельных сопротивлений сплавных ρ_c омических контактов. Обнаружено изменение внутренней геометрии исследуемых объектов под воздействием облучения.

Ключевые слова: имплантация, тяжелые ионы, размерный эффект, арсенид галлия, гетероэпитаксиальные структуры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Торхов Н. А., Кривчук А. С. Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои $n\text{-GaAs}$ // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 416—426.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Торхов, Н. А. Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои $n\text{-GaAs}$ / Н. А. Торхов, А. С. Кривчук // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 416—426.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Size effects in the processes of large ion implantation into n-GaAs(100) epitaxial layers

N. A. Torkhov and A. S. Krivchuk
Research Institute of Semiconductor Devices
99a, Krasnoarmeyskaya Str., Tomsk, 634034, Russia
e-mail: trkf@mail.ru

Received: September 8, 2019
Peer-reviewed: September 13, 2019
Accepted: September 16, 2019

Abstract: The paper investigates in local approximation the influence of the processes of Cl^{++} ion implantation into gallium arsenide GaAs{100} epitaxial layers on fractal dimensions D_f of functional spaces $S(R_{SH})$ of n-GaAs epitaxial layer sheet resistances R_{SH} and functional spaces $S(\rho_c)$ of alloyed ohmic contact specific resistances ρ_c . It is found out that the internal geometry of the studied objects is changed under the action of irradiation.

Keywords: implantation, large ions, size effect, gallium arsenide, heteroepitaxial structures.

For citation (IEEE): N. A. Torkhov et al. "Size effects in the processes of large ion implantation into n-GaAs(100) epitaxial layers," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 416–426, 2019. (In Russ.).

1. Введение

Характер рассеяния в процессах имплантации тяжелых ионов в полупроводники достаточно подробно освещен в мировой научной литературе. Исследования были направлены в основном на изучение физических механизмов проникновения имплантируемых частиц вглубь полупроводниковых материалов (по нормали к плоскости (x,y)) в одномерном случае [1, 2].

Между тем, реальные процессы имплантации имеют заметные латеральные (в плоскости (x,y)) неоднородности определяемые, с одной стороны, локальными неоднородностями в сечении потока имплантируемых частиц, обусловленными как конструктивными особенностями установки, так и физическими особенностями формирования микроструктуры потока, а, с другой стороны — латеральными неоднородностями полупроводниковых мишеней (мозаичная структура эпитаксиальных слоев, характер латерального распределения примесей и дефектов в объеме, фазового состава неровностей поверхности).

Латеральные размеры таких неоднородностей часто соизмеримы с размерами конструктивных элементов твердотельных приборов. Тем не менее в мировой научной литературе практически нет описаний физических механизмов формирования подобного рода неоднородностей в процессах имплантации тяжелых ионов.

Исходя из вышеизложенного, с применением методов фрактальной геометрии в локальном приближении в работе изучается изменение слоевого сопротивления (латеральной проводимости) эпитаксиального n -GaAs{100} под воздействием имплантированных ионов хлора Cl^{++} .

2. Методическая часть

Облучением ионами хлора Cl^{++} с энергией 240 КэВ и дозой 0.02 мКл (облучение) подвергались эпитаксиальные n^+ - n -GaAs{100} мезоструктуры глубиной $d=200$ нм. Толщина n^+ -GaAs с концентрацией $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ составляла 50 нм, а n -GaAs с концентрацией $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ — 100 нм.

Для измерения слоевого сопротивления (латеральной проводимости) эпитаксиальной структуры с учетом токов растекания методом длины переноса на поверхности мезоструктур формировались тестовые элементы с линейной геометрией контактных площадок LTLM (Linear Transmission Line Method [3]) на основе металлизации омических контактов (ОК) $Au-GeNi$ с последующим их утолщением золотом до $d_m=0.5$ мкм (рис. 1). Длина линий ширинами $W_i=10, 20, 30, 50, 100, 150, 250$ и 500 мкм составляла $L=20$ мкм с пошаговым увеличением расстояния l_j между соседними линиями как $l_j=5, 10, 20, 40, 80, 160$ и 320 мкм. Данный метод, с одной стороны, позволяет достаточно точно измерять контактные сопротивления ρ_c ($<10^{-7} \text{ Ом} \times \text{см}^2$), а с другой — выявлять размерные эффекты в их электрических характеристиках: слоевом сопротивлении полупроводника [$R_{SK}=R_{\square}$]= Ω (известном, как размерность “Ом-на-квадрат”, или просто — $\text{Ом} \equiv \Omega$), длиной токов растекания [L_T]=мкм — расстоянием, на котором ток в области контакта уменьшается в e раз и относительным контактным сопротивлением [ρ]= $\text{Ом} \times \text{см}^2$ (или [ρ^*]= $\text{Ом} \times \text{мм}$) (1).

$$R_T = 2 \frac{L_T R_{SK}}{W} + \frac{l_i R_{SK}}{W}, \quad \rho = L_T^2 R_{SK}, \quad \rho^* = L_T R_{SK} \quad (1)$$

Конструктивные размеры тестов LTLM полностью удовлетворяли условию точного измерения токов растекания $L > 5L_T$ [3]. В данных экспериментах $L > 9L_T$.

Размерные эффекты в параметрах R_{SK} , L_T и ρ^* определенных из (1) графическим методом часто проявляются в зависимости их значений от

линейных размеров (например, W_i) конструкций тестов LTLM. Во многих практически значимых случаях такие эффекты определяются фрактальной геометрией внутренней структуры тестов [4, 5].

Измерение последовательного сопротивления R_T между линиями ОК на исходном и облученном образцах осуществлялось измерителем электрических характеристик полупроводниковых приборов В1500А производства Keysight Technologies четырехзондовым методом Кельвина (два зонда "sensor" и "force" на одном линейном контакте и два "sensor" и "force" — на соседнем, рис. 1) с помощью зондовой станции Cascade MicroTech M150. Собственное сопротивление короткозамкнутой измерительной системы не превышало 0.04 Ом.

Для определения Хаусдорфовой размерности D_H функциональных пространств $\mathbf{s}(R_{SH})$ и $\mathbf{s}(\rho_c)$ использовался метод, основанный на определении размерности подобия D_S путем подсчета относительного увеличения меры объекта M в $\eta = M_i/M_0$ раз при относительном уменьшении линейных размеров (ширины W_i) в $\zeta = W_i/W_0$, раз (2) [2, 3]. В рассматриваемых частных случаях Хаусдорфова размерность метрических пространств равна фрактальной размерности объекта $D_H = D_f$.

$$D_f = 2D_T - D_S = 2D_T - \frac{\ln(\eta)}{\ln(\zeta)} \quad (2)$$

Для фрактальных объектов значение D_f по условию Мандельброта должно быть больше значения топологической размерности Евклидова пространства $D_f > D_E = D_T$.

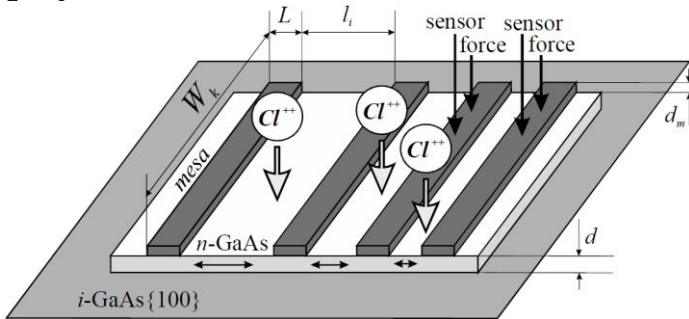


Рис. 1. Схема эксперимента по имплантации ионов хлора Cl^{++} в эпитаксиальные слои n⁺-n -GaAs {100} тестов LTLM.

Fig. 1. Scheme of the experiment on the implantation of Cl^{++} chlorine ions into the epitaxial layers of n⁺-n -GaAs {100} LTLM tests

В качестве линейных размеров объектов будем рассматривать ширину линий W_i являющуюся элементом метрического пространства R

сформированного парой $R=\{X, \rho\}$, состоящей из некоторого множества $X=\{x_i\}$ размеров конструкций элементов тестов LTLM, в котором определено расстояние ρ между любой парой элементов с аксиомами треугольника, симметрии и нулевого расстояния [6]. Из (2) следует, что топологическая размерность D_T линейных тестов LTLM равна единице $D_T=1$, а поверхности эпитаксиальной структуры — двум $D_T=2$.

В качестве интересующих нас мер M_k тестов LTLM будем рассматривать интегральные характеристики $\Phi_{1,i} \equiv R_{SH,i}$ и $\Phi_{2,i} \equiv \rho_{c,i}$, являющиеся элементами (функционалами $\Phi_{k,i}$) функциональных пространств.

Связь функционального пространства с метрическим можно организовать, поставив в соответствие каждой области из множества метрического пространства R некий функционал Φ из функционального пространства $\mathbf{M}_k$ набора мер $\{M_{k,i}\}$ описывающих некую k -ю аддитивную (интегральную) электрофизическую характеристику, где $k=1, 2, \dots, K$ — количество мер $\mathbf{M}_k=\{M_{k,i}\}$, а $i=1, 2, \dots, N$ — количество элементов образующих каждую такую k -ю меру. При этом все аргументы функций $\Phi \equiv M_{k,i}$ линейного пространства $\mathbf{M}_k$ должны принадлежать множеству метрического пространства R .

Объединение R и $\mathbf{M}_k$ образует метрическое пространство с мерой $S_{M,k}=\{R, \mathbf{M}_k\}$, представляющее собой совокупность элементов метрического пространства R , в зависимость от которого (через аргументы) поставлено в соответствие некоторое множество мер $M_{k,i}$ из линейного функционального пространства $\mathbf{M}_k$ [6]. При этом размерность как метрических пространств R , так и функциональных пространств $\mathbf{M}_k$ может укладываться в топологические размерности евклидовых пространств, так как может быть выражена любым вещественным числом от 1 до 3.

Например, интегралы от функции плотности электрического тока, удельного сопротивления, плотности электрического заряда или массы можно рассматривать в качестве мер, характеризующих проводящие, емкостные и массогабаритные свойства передающих линий. В отличие от метрического пространства R , меры (функционалы Φ) функционального пространства могут иметь и отрицательные значения, как, например, меры электрических зарядов.

Согласно [7] мера фрактального объекта в зависимости от его линейного размера W_i может быть выражена следующим образом:

$$M_{k,i} = M_0 \left(\frac{W_i}{W_0} \right)^{2D_T - D_f} \quad (3)$$

откуда легко можно определить значение D_f как

$$D_f = 2D_T - \frac{\ln\left(\frac{M_{k,i}}{M_{k,0}}\right)}{\ln\left(\frac{W_i}{W_0}\right)} \quad (4)$$

Для больших линейных размеров, в случае предельного перехода из локального приближения в глобальное — размер L , при котором значения размерностей $D_f=D_T$ начинают совпадать, выражение (3) переходит в известное выражение для объектов с целой топологической размерностью:

$$M_{k,i} = M_{k,0} \left(\frac{W_i}{W_0}\right)^{D_T}. \quad (5)$$

Известно, что элементам функционального пространства (функционалам) могут быть присущи основные свойства метрических пространств: свойство треугольника, симметрии и нулевого расстояния [6]. Поэтому, как показано в [8, 9], для определения значений D_S и D_f функциональных пространств $\mathbf{M}_k$ можем воспользоваться выражениями (2) и (4), где в качестве M_0 будем пользоваться минимальными значениями $R_{SH,0}=R_{SH}(W_0)$ и $\rho_{c,0}^*=\rho_c^*(W_0)$.

В данных экспериментах количество $N=7$ определяется количеством межлинейных интервалов в тестах LTLM, а $k=2$, так как будут рассмотрены только две меры $\mathbf{M}_1=\{M_{1,i}\}$ и $\mathbf{M}_2=\{M_{2,i}\}$, где $M_{1,i}=R_{SH,i}$ и $M_{2,i}=\rho_{c,i}^*$. Таким образом, согласно [9], наборы сопротивлений $R_{SH(1,i)}$ и $\rho_{c(2,i)}^*$ могут быть найдены из подобных выражений:

$$R_{SH,i} = R_{SH,0} \left(\frac{W_0}{W_i}\right)^{D_T-D_f} \quad \text{и} \quad \rho_{c,i}^* = \rho_{c,0}^* \left(\frac{W_0}{W_i}\right)^{D_T-D_f} \quad (6)$$

В качестве W_0 выбиралось минимальное значение ширины линий LTLM $W_0=10$ мкм (таб. 1).

Выражения (6) описывают также и случай предельного перехода элементов функциональных пространств слоевых и удельных сопротивлений из локального приближения в глобальное, когда значения размерностей D_f и D_T совпадают, а $R_{SH,i}=R_{SH,0}$ и $\rho_{c,i}^*=\rho_{c,0}^*$ перестают зависеть от линейных размеров W_i .

3. Результаты эксперимента

Полученные результаты измерения значений R_T выявили наличие сильных размерных эффектов как на исходном (рис. 2, а), так и на облученном (рис. 2, б) образцах.

Фрактальная размерность пространства слоевых сопротивлений $S(R_{SH})$ исходных тестов LTLM при $W \geq 100$ мкм ($L=100$ мкм) соответствует двумерному случаю $D_f \approx 2$ плоской двумерной поверхности с $D_T=2$ (таб. 1). Согласно вышеизложенному, случай, когда $D_f = D_T$ относится к глобальному приближению. Двухмерность в глобальном приближении функционального пространства $S(R_{SH})$ исходных тестов LTLM указывает, по всей вероятности, на то, что формирование R_{SH} эпитаксиальной тонкопленочной структуры обусловлено в основном двумерными процессами рассеяния при диффузионном переносе электронов.

При $W < 100$ мкм значения D_f начинают превышать D_T и наступает случай локального приближения ($W < L$), когда в определении слоевых сопротивлений R_{SH} начинает наблюдаться размерный эффект — значительная зависимость значений R_{SH} от W_i (таб. 1). В этом случае дробные значения $2 < D_f < 3$ указывают на то, что в формировании R_{SH} принимают участие не только двумерные, но и в некоторой степени трехмерные процессы рассеяния, вызванные, по всей вероятности, на трехмерных неоднородностях эпитаксиальных слоев.

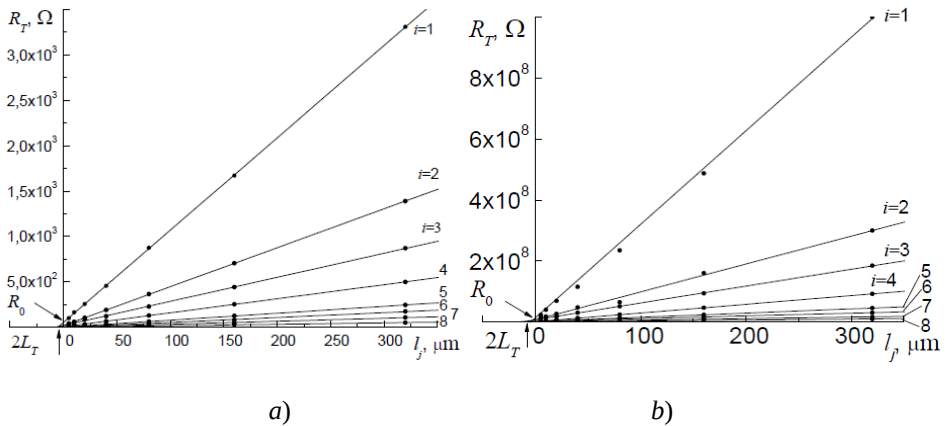


Рис. 2. Линейные зависимости $R_T(l)$ тестов LTLM для разных значений W_i : 1—10 мкм, 2—20, 3—30, 4—50, 5—100, 6—150, 7—250 и 8—500 мкм: (а) исходного и (б) подвергнутого имплантации ионов Cl^{++} с дозой $Q=0.02$ мкКл.

Fig. 2. Linear dependences $R_T(l)$ of LTLM tests for different values of W_i : 1—10 μm , 2—20, 3—30, 4—50, 5—100, 6—150, 7—250, and 8—500 μm : (a) the initial and (b) implanted Cl^{++} ions with a dose of $Q=0.02$ μC

Значение фрактальной размерности пространства удельных сопротивлений ОК $S(\rho_c^*)$ исходных тестов LTLM, начиная уже с $W_i < 500$ мкм ($L \approx 500$ мкм), заметно превышают одномерный случай $D_f > D_T$ — линейную

геометрию метрического пространства R тестов LTLM с $D_T=1$ (табл. 1). Это говорит о том, что по мере уменьшения W_i в формировании токов растекания, а, следовательно, и ρ_c^* при диффузионном переносе электронов в плоскости эпитаксиальной структуры оказывают возрастающее влияние и двухмерные процессы рассеяния.

Необычно ведет себя и параметр длины токов растекания L_T . Уменьшение ширины тестов W_i начиная с 50 мкм сопровождается заметным увеличением длины L_T , что очередной раз подтверждает наличие значительных размерных эффектов в электрических характеристиках тестов LTLM.

Имплантация ионов Cl^{++} в эпитаксиальные слои тестов LTLM с дозой $Q=0.02$ мкКл приводит к значительному увеличению значений фрактальных размерностей обоих пространств $S(R_{SH})$ и $S(\rho_c^*)$ (таб. 1), что указывает на значительное изменение геометрии процессов рассеяния электронов как в глобальном ($W \geq L$), так и в локальном ($W < L$) приближениях. Значительное расширение интервала линейных размеров W_i до 500 мкм ($L \geq 500$ мкм), в котором размерность функционального пространства $S(R_{SH})$ принимает дробные значения $2 < D_f < 3$, указывает на то, что в формировании R_{SH} после имплантации даже для относительно больших размеров $W_i > 100$ мкм начинают принимать участие трехмерные процессы рассеяния. Центрами такого рассеяния, по всей вероятности, могут являться трехмерные неоднородности, образованные имплантацией ионов хлора Cl^{++} в эпитаксиальные слои n^+-n -GaAs.

Таблица 1. Значения параметров LTLM —тестов в зависимости от W_i [1].

Table 1. Parameters of LTLM tests depending on W_i [1].

i	W_i , мкм	Исходные значения параметров тестов LTLM					Значения параметров тестов LTLM после облучения ионами Cl^{++} дозой $Q=0.02$ мкКл				
		L_T , мкм	R_{SH} , $\Omega/\square$	$D_f(R_{SH})$	ρ_c^* , $\Omega \times \text{мм}$	D_f	L_T , мкм	R_{SH} , $\text{K}\Omega/\square$	$D_f(R_{SH})$	ρ_c^* , $\Omega \times \text{мм}$	D_s
1	10	2.7	101.6	2.24	0.27	1.51	2.9	30996	2.67	7415	2.95
2	20	2.4	85.7	2.22	0.19	1.37	2.9	19464	2.57	57410	1.93
3	30	2.3	79.4	2.17	0.18	1.45	3.8	16543	2.48	62070	1.36
4	50	1.7	77.4	2.13	0.13	1.32	4.6	14221	2.35	65682	0.99
5	100	1.7	76.0	2.09	0.13	1.24	5.3	13773	2.31	73423	1.18
6	150	1.7	80.5	2.07	0.14	1.20	13.9	13224	2.29	183486	0.99
7	250	1.8	82.2	2.06	0.14	1.19	15.8	12131	2.23	181781	0.97
8	500	1.7	79.1	---	0.13	---	26.3	12604	---	330884	---

Более сильное влияние процесс имплантации оказывает на размерность функционального пространства удельных сопротивлений $\mathbf{S}(\rho_c^*)$, проявляющееся в значительном увеличении их фрактальной размерности D_f и уменьшении предела локального приближения L . В этом случае даже для $W_i \geq 50$ мкм фрактальная размерность $\mathbf{S}(\rho_c^*)$ $D_f = 1 + D_s$ значительно превышает топологическую размерность линейных элементов LTLM $D_f > D_T = 1$ и практически совпадает с топологической размерностью плоской поверхности $D_f = D_T = 2$. Это говорит о том, что под воздействием процессов имплантации в формировании ρ_c^* начинают преобладать двумерные процессы рассеяния.

Уменьшение ширины тестовых элементов $W_i < 50$ мкм приводит к еще более сильному постепенному увеличению значений фрактальной размерности функционального пространства $\mathbf{S}(\rho_c^*)$. Так, при уменьшении W_i от 30 мкм до 20 мкм значение размерности подобия D_s увеличивается от 1.36 до 1.93 (табл. 1), а значения $D_f = 1 + D_s$ функционального пространства $\mathbf{S}(\rho_c^*)$ начинают попадать теперь в интервал $2 < D_H(\rho_c^*) < 3$ (таб. 1). Существенное увеличение значений D_f до 2.93 в этом случае может указывать на то, что в формировании ρ_c^* начинают преобладать уже трехмерные эффекты рассеяния. По всей вероятности, это обусловлено увеличением размерности геометрии метрического пространства R сплавных переходных слоев омических контактов в области токов растекания L_T .

Дальнейшее уменьшение W_i до 10 мкм приводит к еще большему увеличению значения размерности подобия D_s до 2.95 (таб. 1). В этом случае значение $D_f = 1 + D_s$ функционального пространства $\mathbf{S}(\rho_c^*)$ можно представить в виде суммы размерностей подпространств $D_f = D_{f1} + D_{f2}$. В качестве $D_{f1} = 1$ можно взять значение топологической размерности исследуемых линейных объектов LTLM. Тогда для D_{f2} остается принять значение 2.95, количественно равное значению размерности подобия D_s (табл. 1). Такое представление D_f может указывать на то, что при $W_i \leq 10$ мкм происходит резкое изменение геометрии интерфейса, когда в формировании ρ_c^* в одинаковой степени могут принимать участие как линейные, так и трехмерные эффекты.

В отличие от значений L_T исходных тестов LTLM увеличение ширины тестов в ряду $W_1 \dots W_8$ после имплантации сопровождается значительным увеличением длин растекания L_T (табл. 1). Данный факт также не является тривиальным и подтверждает существенное влияние имплантации на геометрию процессов, происходящих в тестах LTLM не только в локальном, но и глобальном приближении.

Для дозы $Q=0.03$ мкКл значения слоевых сопротивлений R_T превышают 10^9 Ом и адекватное восстановление остальных параметров тестов становится невозможным.

5. Заключение

Увеличение дозы облучения ионами хлора Cl^{++} Q приводит к существенному росту значений R_{SH} , ρ_c и L_T , что сопровождается значительным увеличением размерности D_f их функциональных пространств S . Для $S(R_{SH})$ наблюдается увеличение предела локального приближения с $L \approx 100$ мкм (для исходного образца) до $L \approx 500$ мкм для подвергнувшегося имплантации (табл. 1). Для $S(\rho_c^*)$ рост значения $L \approx 500$ мкм не обнаружен по причине конструктивного ограничения максимальной ширины W_i тестовых элементов. Уменьшение ширины тестов W_i начиная с 50 мкм сопровождается нетривиальным увеличением длины L_T вызванном, по всей вероятности, фрактальной геометрией интерфейса.

Изменение размерностей D_f и пределов локальных приближений L функциональных пространств $S(R_{SH})$ и $S(\rho_c^*)$ после проведения процессов имплантации указывает на значительное изменение внутренней геометрии объекта под воздействием облучения в достаточно широком интервале масштабов $L \geq 500$ мкм. При этом сильное увеличение значений D_f в интервале от 1 до 3 указывает на то, что на изменение электрофизических параметров тестов LTLM с линейной геометрией оказывают влияние как двумерные, так и трехмерные эффекты. При этом с увеличением ширины тестов LTLM наблюдается не уменьшение, а увеличение значений L_T . Это может указывать на то, что процессы имплантации Cl^{++} оказывают значительно большее влияние на геометрию объектов не только в локальном, но и в глобальном приближении.

Список литературы

1. Комаров Ф. Ф., Комаров А. Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. Минск : УП «Технопринт», 2001.
2. Nastasi M., Mayer J. W. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Springer Series in Materials Science. 2006. 266 p.
3. Новицкий С. В. Методологические аспекты измерения удельного контактного сопротивления TLM методом с линейной и радиальной геометрией контактов. Материалы электронной техники. Петербургский журнал электроники. 2013. Т. 3. С. 59—71.
4. Торхов Н. А., Новиков В. А., Ивонин И. В. Влияние размерных эффектов на контактное сопротивление омических контактов. В кн. : 25-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2015 (Севастополь, 6—12 сент. 2015 г.). 2015. С. 609—610.

5. Торхов Н. А. Размерные эффекты в электрических характеристиках омических контактов к AlGaIn/GaN гетероэпитаксиальным структурам. 7-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. «Моковские чтения». Москва, 25 мая 2016 г. С. 51—52.
6. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. : Наука, 1976. 543 с.
7. Torkhov N. A. Method to Determine the Interface's Fractal Dimensions of Metal–Semiconductor Electric Contacts from Their Static Instrumental Characteristics // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2010. Vol. 4, No. 1. Pp. 45—58.
8. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A. The Influence of AlGaIn/GaN Heteroepitaxial Structure Fractal Geometry on Size Effects in Microwave Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs // Symmetry. 2019, 11, 1495.
9. Торхов Н. А. Слоевое сопротивление TiAlNiAu тонкопленочной металлизации омических контактов к нитридным полупроводниковым структурам // ФТП. 2019. Т. 53, № 1. С. 32—40.

Информация об авторах

Торхов Николай Анатольевич, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Кривчук Александр Сергеевич, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А.

Information about the authors

Nikolay A. Torkhov, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Aleksandr S. Krivchuk, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A.

УДК 621.375.026

Твердотельный СВЧ-генератор ISM-диапазона с выходной мощностью до 5 кВт на основе LDMOS-транзисторов¹

¹ Жуков В. В., ¹ Куканов А. М., ¹ Поздеев К. А., ^{1,2} Собченко М. И.,
¹ Искандеров Ф. Г., ¹ Меденков А. Н., ^{1,2} Ухандеев В. И.

¹ АО «Научно-технический центр ЭЛИНС»

Панфиловский пр-т, д. 10, г. Москва, г. Зеленоград, 124460, Россия
info@elins.ru

² Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

пл. Шокина, д. 1, г. Москва, г. Зеленоград, 124498, Россия
netadm@miee.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: Приведено сравнение твердотельного и магнетронного СВЧ-генератора ISM-диапазона. Изложен принцип работы и характеристики разработанного и изготовленного СВЧ-генератора, обеспечивающего выходную мощность не менее 4,5 кВт в диапазоне частот 2,3–2,5 ГГц. Описаны возможные области применения разработанного устройства.

Ключевые слова: мощный СВЧ генератор, ISM, LDMOS-транзистор, применение СВЧ излучения.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Жуков В. В., Куканов А. М., Поздеев К. А., Собченко М. И., Искандеров Ф. Г., Меденков А. Н., Ухандеев В. И. Твердотельный СВЧ-генератор ISM-диапазона с выходной мощностью до 5 кВт на основе LDMOS транзисторов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 427—433.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Жуков, В. В. Твердотельный СВЧ-генератор ISM-диапазона с выходной мощностью до 5 кВт на основе LDMOS транзисторов / В. В. Жуков, А. М. Куканов, К. А. Поздеев, М. И. Собченко, Ф. Г. Искандеров, А. Н. Меденков, В. И. Ухандеев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 427—433.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Solid-state ISM UHF generator with output power up to 5 kW based on LDMOS-transistors

V. V. Zhukov¹, A. M. Kukanov¹, K. A. Pozdeev¹, M. I. Sobchenko^{1,2},
F. G. Iskanderov¹, A. N. Medenkov¹, and V. I. Ukhandeev^{1,2}

¹ Joint-stock company "NTC ELINS"

10, Panfilovskiy Str., Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation
info@elins.ru

² National Research University of Electronic Technology (MIET)
1, Shokina SQ Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation
netadm@miee.ru.

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: The comparison of the solid-state and magnetron microwave generator of the ISM-range is given. The principle of operation and characteristics of the developed and manufactured microwave generator, which provides an output power of at least 4.5 kW in the frequency range 2.3–2.5 GHz, are outlined. Possible areas of application of the developed device are described.

Keywords: high-power microwave generator, ISM, LDMOS transistor, microwave radiation applications.

For citation(IEEE): V. V. Zhukov et al. "Solid-state ISM UHF generator with output power up to 5 kW based on LDMOS-transistors," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 427–433, 2019. (In Russ.).

1. Введение

В последнее время появляется все больший интерес к применению СВЧ излучения в различных технологических процессах. Для подобных применений выделен так называемый ISM-диапазон (Industrial, Scientific, Medical application). Одним из широко применяемых является диапазон 2450 ± 50 МГц, где в основном используются магнетронные генераторы, главным недостатком которых, кроме ограниченного срока службы, является невозможность управлять частотой генерации. Стоит отметить еще один недостаток магнетронных генераторов, а именно отсутствие возможности фазовой синхронизации, что не позволяет эффективно суммировать мощности единичных магнетронов.

В работе приведены результаты разработки и изготовления системы формирования импульсов СВЧ-энергии с возможностью управления параметрами выходного сигнала: частотой, фазой, мощностью. Интенсивное развитие и удешевление транзисторной LDMOS-технологии позволило реализовать СВЧ генератор на твердотельной элементной базе.

2. Описание конструкции системы

Система формирования импульсов СВЧ-энергии состоит из двух функциональных узлов: Блока импульсного питания и СВЧ генератора. Блок питания содержит емкостной накопитель энергии, обеспечивающий импульсное потребление генератора, а также устройство плавного заряда конденсаторной батареи. Функциональная схема СВЧ генератора показана на рисунке 1. СВЧ генератор функционально состоит из блока формирования опорного сигнала (БФОС), блока цифрового управления (БЦУ) и усилителя мощности (УМ).

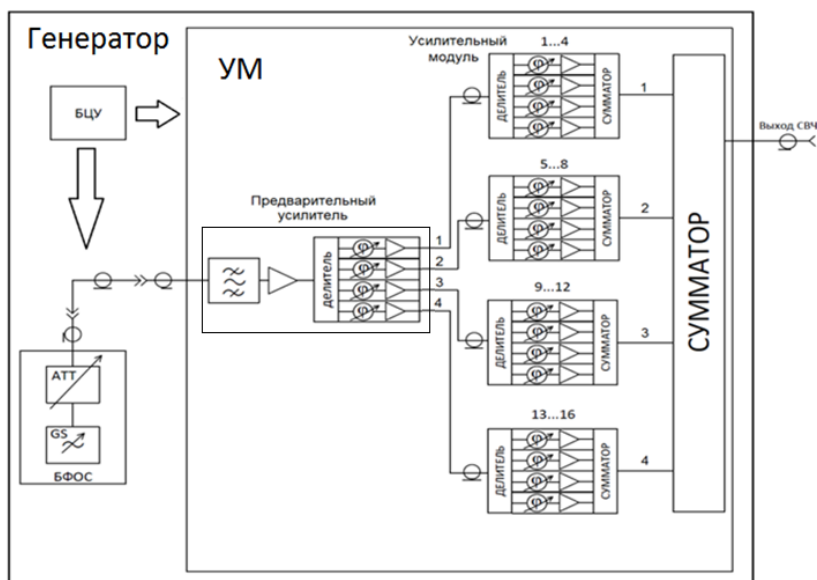


Рис. 1. Функциональная схема СВЧ-генератора.

Fig. 1. Functional scheme

БФОС разработан на основе синтезатора частот, обеспечивающего диапазон перестройки частоты 2,2—2,6 ГГц с переменным шагом, и, управляемого напряжением аттенуатора для изменения выходной мощности.

В качестве вычислителя в БЦУ применен микроконтроллер. Для него разработано специализированное программное обеспечение, которое позволяет осуществлять: как ручное дистанционное, так и автоматическое управление внешними характеристиками генератора, непрерывный контроль работоспособности составных частей, измерение выходной мощности и КСВн нагрузки. Генератор поддерживает дистанционное управление по стандартным промышленным интерфейсам CAN или RS-485.

УМ реализован по схеме квадратурного суммирования шестнадцати субмодулей, конструктивно объединенных в четыре усилительных модуля. Каждый субмодуль может использоваться как независимый усилитель мощности. В его составе имеется управляемый напряжением фазовращатель, с помощью которого обеспечивается компенсация разности фаз между каналами при суммировании в составе усилительного модуля. Также в СВЧ генератор входит предварительный усилитель мощности, содержащий четыре канала, сигнал с выхода которых поступает на вход усилительных модулей.



Рис. 2. Внешний вид СВЧ-генератора

Fig. 2. UHF-generator

Для компенсации разности фаз между усилительными каналами в них установлены управляемые фазовращатели. Для повышения КПД сумматоры выполнены на базе воздушных полосковых линий передачи. КПД схемы суммирования СВЧ генератора составляет более 90 %.

3. Характеристики системы

Представленная система позволяет формировать импульсы СВЧ мощностью до 5 кВт и длительностью до 200 мс, что определяется запасом энергии в батарее блока питания. Блок питания обеспечивает работу системы от бортовой сети +27 В с потреблением до 60 А, выдавая в импульсе более 12 кВт. Скважность импульсов ограничена числом 15.

Генератор питается от постоянного напряжения 310 В (220—360 В) и при обеспечении сетью мощности в 12 кВт способен работать на больших длительностях (до 600 мс) и скажностях. Выходной СВЧ тракт генератора, оканчивающийся розеткой типа 7/16, ограничивает скажность четырьмя (средняя мощность до 1250 Вт). В генераторе реализованы режимы стабилизации как выходной СВЧ мощности, так и потребляемой от сети во избежание ее перегрузки. На уровне 4 кВт мощность поддерживается в диапазоне частот 2,25—2,53 ГГц. В диапазоне 2,3—2,5 ГГц мощность превышает 4,5 кВт и достигает 5000 Вт на центральных частотах. Таким образом, КПД генератора составляет от 37 до 41 % (КПД системы около 33%).

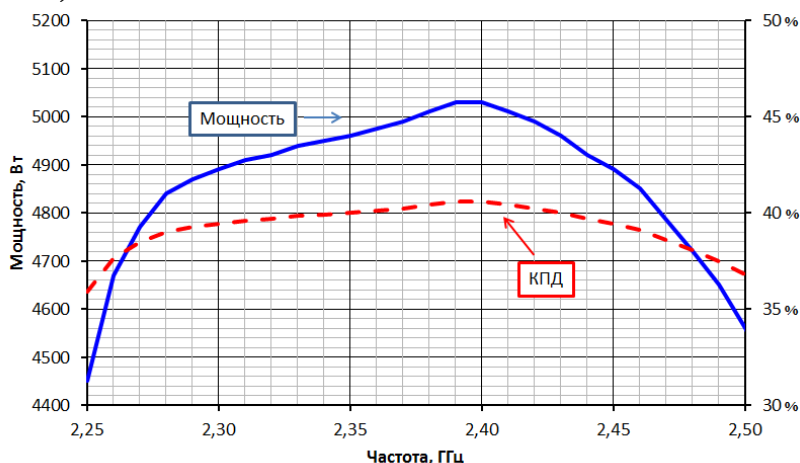


Рис. 3. График зависимости мощности и КПД от частоты.

Fig. 3. Power and efficiency from frequency

Конструкцией блока предусмотрен радиатор, обеспечивающий работу на скажности 30 при пассивной конвекции и на скажности не менее 10 при принудительном охлаждении (обдув снаружи вентилятором). Рабочий диапазон температур генератора от -50 до $+80^{\circ}\text{C}$, выходная мощность изменяется при этом не более чем на 10 % в режиме ограничения потребления.

Генератор рассчитан для работы на нагрузку с переменным во времени КСВн и имеет функцию его автоматического измерения. Пороговое значение уровня КСВн для прекращения генерации задается программно значением не более 5.

4. Заключение

В настоящей работе практически реализована система формирования сверхдлинных импульсов СВЧ-энергии мощностью до 5 кВт с КПД около 33 %. СВЧ-генератор возможно применять независимо от блока питания при обеспечении соответствующей питающей сети. Составные части СВЧ-генератора могут использоваться как независимые усилители мощности.

Возможные применения разработанного СВЧ-генератора: генерация СВЧ плазмы, физические исследования, объемный поджиг топливных смесей в энергетике (угольная пыль и т. п.), системы распределенного управляемого СВЧ нагрева.

Список литературы

1. Каганов В. И. Транзисторные радиопередатчики. М. : Энергия, 1976. 448 с.
2. Мазепова О. И., Мещанов В. П., Прохорова Н. И., Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р. Справочник по элементам полосковой техники. М. : Связь, 1979. 336 с.
3. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Наука, 1989. 544 с.
4. Первачев С. В. Радиоавтоматика. М. : Радио и связь, 1982. 296 с.

Информация об авторах

Жуков Владимир Владимирович, инженер-электроник АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Куканов Артем Михайлович, начальник отдела АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Поздеев Константин Анатольевич, заместитель начальника отделения АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Собченко Максим Иванович, начальник отдела АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация. Ассистент института МПСУ НИУ «МИЭТ» г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Искандеров Фаил Гилемьянович, ведущий инженер-электроник АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Меденков Александр Николаевич, ведущий инженер-конструктор АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Ухандеев Владимир Ильич, начальник отделения АО «НТЦ ЭЛИНС», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация. Доцент института МПСУ НИУ «МИЭТ» г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация.

Information about the authors

Vladimir V. Zhukov, engineer of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation.

Artem M. Kukanov, head of sector of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation.

Konstantin A. Pozdeev, head of department assistant of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation.

Maxim I. Sobchenko, head of sector of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation. Lecturer assistant of National Research University of Electronic Technology (MIET).

Fail G. Iskanderov, leading engineer of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation.

Alexander N. Medenkov, leading engineer of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation.

Vladimir I. Ukhandeev, head of department of joint-stock company “NTC ELINS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation. Senior lecturer of National Research University of Electronic Technology (MIET).

УДК 621.37-621.39(091)

Организация научно-исследовательских работ в компании General Electric в начале XX века

Пестриков В. М.

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

Получено: 13 октября 2019 г.

Отрецензировано: 9 ноября 2019 г.

Принято к публикации: 16 ноября 2019 г.

Аннотация: В 1900 году американский химик Уиллис Р. Уитни создал в компании General Electric (GE) первую в США промышленную научно-исследовательскую лабораторию (GERL), Скенектади, Нью-Йорк. Изобретения, усовершенствования, новые процессы и новые знания, которые были получены и разработаны в исследовательской лаборатории не только в области радиоэлектроники, но и других направлениях, стали неоценимым достоянием как для компании, так и для общества. Это позволило GE стать крупнейшей американской корпорацией, а также самой диверсифицированной корпорацией в мире. Уитни стал известен как «отец фундаментальных исследований в промышленности». Его организация научных исследований стала моделью для промышленных научных лабораторий в других частях США.

Ключевые слова: компания General Electric, Уиллис Р. Уитни, промышленная научно-исследовательская лаборатория, Скенектади, стиль руководства, творческая атмосфера, подбор кадров.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Организация научно-исследовательских работ в компании General Electric в начале XX века // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 434—450.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Организация научно-исследовательских работ в компании General Electric в начале XX века / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 3. С. 434—450.

Organization of research work at General Electric in the early twentieth century

V. M. Pestrikov

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

Received: October 13, 2019

Peer-reviewed: November 9, 2019

Accepted: November 16, 2019

Abstract: *In 1900, American chemist Willis R. Whitney established the first U.S. industrial research laboratory (GERL), Schenectady, New York, at General Electric (GE). Inventions, improvements, new processes and new knowledge, which were obtained and developed in the research laboratory not only in the field of radio electronics, but also in other areas, have become an invaluable asset for both the company and society. This allowed GE to become the largest American Corporation as well as the most diversified Corporation in the world. Whitney became known as "the father of basic research in industry." His organization of research has become a model for industrial science laboratories in other parts of the United States.*

Keywords: *General Electric Company, Willis R. Whitney, industrial research laboratory, Schenectady, leadership style, creative atmosphere, recruitment.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Organization of research work at General Electric in the early twentieth century," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 434–450, 2019. (In Russ.).

1. Введение

На рубеже XIX и XX веков рынок электрических ламп GE стал испытывать острую конкуренцию со стороны ламп Нернста¹ и танталовых ламп накаливания, рис.1. В Европе и в США лампы Нернста продавала компания Westinghouse, а продажу танталовых ламп осуществляла компания Siemens & Halske. Это явилось тем толчком, который заставил компанию General Electric (GE) переосмыслить свою исследовательскую стратегию.

¹ Лампа Нернста представляет собой электрическую калильную лампу, изобретенную немецким физиком и химиком В. Нернстом (нем. *Walther Hermann Nernst*, 25.06.1864—18.11.1941) в 1897 году. В лампе используется в качестве калильного тела тонкий стерженек из смеси окиси циркония и окиси натрия, который нагревался в воздухе. Эта лампа излучает естественный свет, близкий к спектру дневного света, в отличие от лампы накаливания. Светоотдача в лучших образцах доходила до 8,5 люмен/ватт. С появлением ламп с металлической нитью лампа Нернста вышла из употребления.

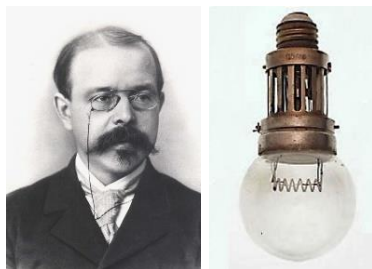


Рис. 1. Вальтер Герман Нернст (1889 г.) и общий вид его электрической лампы образца 1901 года.

Fig. 1. Walter Hermann Nernst (1889) and a general view of his electric lamp of the 1901 model

В 1897 году начальник вычислительного отдела GE Чарльз Штейнмец (Charles Proteus Steinmetz) предложил создать исследовательскую лабораторию, которая должна была помочь компании войти в быстрорастущий бизнес по получению алюминия из руды электрохимическим способом [1]. Его обращение однако осталось без внимания. Последовавшее за этим второе предложение так же было не услышано. В сентябре 1900 года Штейнмец написал письмо вице-президенту и техническому директору компании Эдвину Уильяму Райсу (Edwin William Rice). На этот раз он вместо электрохимической направленности лаборатории предлагал светотехнический тренд, чтобы противостоять производителям ртутных ламп. Штейнмец отправил копии своего письма Элиу Томсону (Elihu Thomson), а также патентному поверенному компании Альберту Дж. Дэвису (Albert G. Davis). Оба поддержали идею. Дэвис писал Райсу: «Мне кажется, что было бы разумно потратить значительную сумму денег на активное развитие ртутной лампы. Если кто-то опередит нас в этом развитии, то нам придется потратить большие суммы на покупку патентных прав, тогда как, если мы сделаем работу самостоятельно, этой необходимости удастся избежать». Томсон взглянул на проблему несколько иначе: «Мне кажется, что такая крупная компания, как General Electric, не должна продолжать исследования и разработки в новых областях. На самом деле необходима исследовательская лаборатория для коммерческого применения новых принципов и даже для открытия этих принципов».

К октябрю первый президент GE Чарльз Коффин (Charles A. Coffin) сформулировал основные требования к организации лаборатории. Отражение атак на ламповый бизнес GE было наивысшим приоритетом. Организаторы также определили, что лаборатория должна быть удалена от повседневной исследовательской работы, и что для привлечения первоклассных исследователей ей необходимо заниматься более широким спектром дея-

тельности, чем электрическое освещение. Как позже вспоминала Райс: «Мы все согласились, что это будет настоящая научная лаборатория».

Руководство General Electric Co. в конце концов поняло, что для ее дальнейшего процветания необходимы новые подходы в организации научных исследований и разработок, которые могли быть сразу внедрены в производство и составить конкуренцию европейским компаниям. Необходим был мощный научно-исследовательский центр, который в основном занимался бы не изобретательством, а научными экспериментами и теоретическими обобщениями.

Предполагалось, что между будущей исследовательской лабораторией GE и Menlo Park Томаса Эдисона должна быть большая разница. Лаборатория Эдисона Menlo Park напоминала в некотором роде «фабрику изобретений», рис. 2. Это было место, где изобретатели работали, экспериментировали, чтобы создать новую товарную продукцию. Эдисон был очень сильной личностью, и любой, кто ему не нравился по какой-либо причине, мог быть уволен.



Рис. 2. Общий вид лаборатории Menlo Park (1879 г.) и Томас Эдисон.

Fig. 2. General view of the laboratory of Menlo Park (1879) and Thomas Edison

В организуемой лаборатории GE предполагалось создать теплую атмосферу сотрудничества, чтобы сохранить таланты. В дополнение к этому команда должна была быть подготовлена с учетом последних знаний в области физики, механики и математики. Команда же Эдисона имела недостаточную научно-образовательную подготовку. Неудивительно, что Edison's Menlo Park в Оранже (штат Нью-Джерси) не удалось закрепить свои успехи в дальнейшем, в сравнении с результатами, достигнутыми лучше управляемой и более адаптированной исследовательской лабораторией GE в Скенектади (Schenectady).

2. Поиск директора лаборатории GE

Лаборатория GE предназначалась для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок. Она должна была стать

первым такого рода учреждением в США. Вопрос о том, кто возглавит лабораторию, долго оставался открытым. Известные ученые под любым предлогом отказывались от возможности занять пост директора лаборатории. К концу октября 1900 года один из академических консультантов GE, физик Чарльз Р. Гросс (Charles R. Gross) из Массачусетского технологического института (англ. *Massachusetts Institute of Technology, MIT*), предложил молодого ученого Уиллиса Родни Уитни (Willis Rodney Whitney, 22.08.1868—09.01.1958), преподавателя химии из этого института. По мнению Гросса, Уиллис Уитни (рис. 3) был идеальным человеком для руководства лабораторией. Он являлся выпускником MIT и в 1896 году защитил диссертацию (Ph.D по химии) в Лейпцигском университете. После этого работал в качестве ассистента профессора химии в MIT.

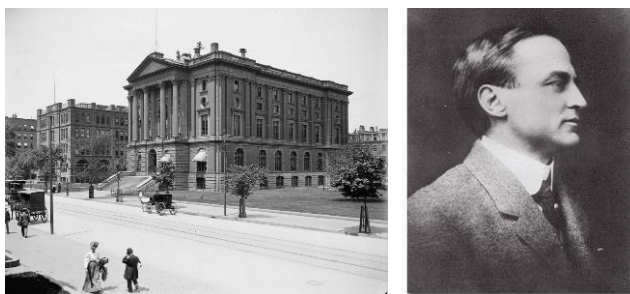


Рис. 3. Здание Массачусетского технологического института, расположенного в Бостоне (около 1890 г.) и его выпускник Уиллис Р. Уитни (Willis Rodney Whitney) — первый директор GE Research Lab. 1900 г.

Fig. 3. The building of the Massachusetts Institute of Technology, located in Boston (1890) and its graduate Willis Rodney Whitney – First Director of GE Research Lab. 1900

В октябре 1900 года преподаватель химии встретился с Томсоном, Райсом и Дэвисом. Он пообещал серьезно рассмотреть предложение только в том случае, если будет работать неполный рабочий день, что позволит ему остаться в MIT. В академических кругах существовало давнее предубеждение в отношении научной работы в области промышленности. Весь проект, поскольку это был эксперимент, содержал в себе элемент риска. Кроме того, Уитни сомневался в том, что в компании General Electric будет достаточно сложных проблем, чтобы удерживать его интерес в течение длительного периода времени. Уитни не желал устраиваться на работу с полным рабочим днем из-за страха «похоронить свою возможную индивидуальность в большой бездушной индустрии». Руководители GE сразу согласились.

Уиллис Уитни, работая 1 или 2 дня в неделю, должен был получать \$2400 в год, что было в три раза больше годового дохода средней амери-

канской семьи. Дело было не только в деньгах. До этого Уитни отказался от высокооплачиваемой работы консультанта у Артура Д. Литтла² (Arthur D. Little). В MIT он получал зарплату плюс существенную подработку от его консультационной работы. Его недавняя просьба о ежегодном повышении на \$75 в MIT не была удовлетворена. Все это заставило Уитни хорошо подумать, прежде чем дать свое согласие. Через несколько недель, почувствовав свою неудовлетворенность узкоспециализированной научной деятельностью, он ухватился за предоставленную ему возможность и принял предложение, после встречи со Штейнмцем в Скенектади.

15 декабря 1900 года Уиллис Уитни стал руководителем научно-исследовательской лаборатории GE (General Electric Research Laboratory или сокращенно GERL), а также стал постоянным пассажиром поезда, идущего на запад из Бостона каждую пятницу в сторону Скенектади, где его путь лежал к Каретному сараю за Либерти-Холлом (Liberty Hall), рис. 4.

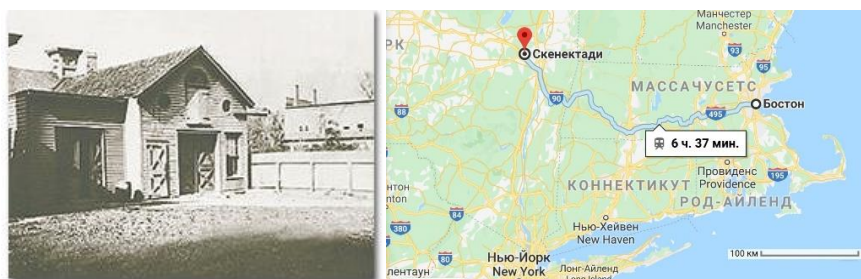


Рис. 4. Каретный сарай за меблированными комнатами главного инженера GE Чарльза Штейнмца был первым домом исследовательской лаборатории GE и карта движения поезда Бостон — Скенектади.

Fig. 4. The carriage shed behind the furnished rooms of GE Chief Engineer Charles Steinmets was the first home of the GE research laboratory and a Boston–Schenectady train traffic map

Вскоре сарай сгорел, и новая лаборатория была перенесена в одно из зданий завода General Electric. Через три года Уитни отказался от графика неполного рабочего времени и посвятил все свое время и энергию руководству работой растущего персонала лаборатории.

3. Первые годы работы лаборатории

В годовом отчете компании за 1902 г., было отмечено, что работа лаборатории должна «быть посвящена исключительно оригинальным ис-

² Артур Д. Литтл работал в MIT, открыл ацетаты, которые применяют как растворители для лаков, смол, в производстве целлулоида, в парфюмерии и пищевой промышленности. Он впервые применил концепцию контрактных профессиональных услуг.

следованиям», которые ни в коем случае не должны быть просто научными исследованиями ради науки. «Есть надежда, — говорилось в отчете, — что многие прибыльные направления могут быть открыты». Уитни очень хорошо понимал, что представляют собой коммерческие продукты, а также в чем состоит поиск фундаментальных знаний.

Уиллис Уитни не хотел бросать свои исследования и преподавательские обязанности в MIT и поэтому первое время работал в лаборатории по совместительству. В ней он проводил половину рабочего времени. И только в 1904 году он окончательно оставил MIT, и все свое время посвящал лаборатории GE. Первое время штат сотрудников ограничивался директором и его помощником. В этот период времени Уитни еще имел возможность проводить свои собственные научные исследования, которые привели его к изобретению металлизированной углеродной нити накала для электрической лампочки. Лампа с такой нитью получила название «лампа GEM» (General Electric Metallized) и была в три раза эффективнее лампочки Эдисона, рис. 5. Это был первый значительный шаг в повышении эффективности электроламп, производимых компанией GE.

Первые лампы GEM для сетей напряжением 110 Вольт, поступили на рынок в 1905 году. Миллионы этих новых ламп были проданы в течение одного года. Лампы были сделаны в типоразмерах от 30 до 250 ватт, но с появлением вольфрамовых ламп накаливания в 1907 году, GEM-лампы высокой мощности скоро исчезли из употребления [2]. Разработки электрических ламп с вольфрамовыми нитями накала конкурирующих компаний опережали GE в этом сегменте оборудования для электрического освещения. Для исправления ситуации компания GE была вынуждена купить у русского инженера А. Н. Лодыгина патент на использование в лампах накаливания нитей из тугоплавких металлов. Это позволило компании GE в 1910 году начать серийное производство по патенту Лодыгина первых американских коммерческих электрических лампочек с вольфрамовой нитью.

Благодаря Уитни штат научных сотрудников лаборатории расширялся быстрыми темпами: 1901 г. было восемь человек, в 1906 г. — 102, в 1920 г. — 301, а в 1929 г. стало 555. Все это привело к тому, что для выполнения Уитни функций директора требовалось довольно много времени и у него уже не оставалось времени для своих исследований. Из-за этого он был вынужден остановить свои научные изыскания и полностью переключиться на административную деятельность. На этом поприще он и достиг выдающих результатов и известности [3].

Лаборатория предопределила направления научно-исследовательских работ компании GE на многие годы вперед. За ее основу была взята

модель лаборатории немецкого университета. Главным в работе лаборатории было проведение поисковых научных исследований с целью создания новых коммерческих продуктов. Нужно заметить, что во второй половине XX века компания отказалась от такой формы организации научно-технических работ, так как гораздо выгоднее стало купить целую фирму под решение конкретной проблемы, а затем превратить ее в дополнительный отдел GE.

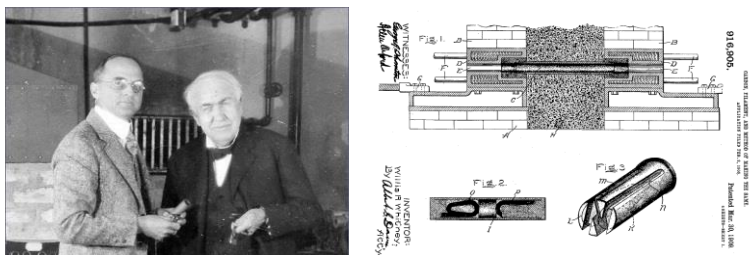


Рис. 5. Изобретатель лампы GEM Уиллис Р. Уитни с Томасом Эдисоном. Скенектади. General Electric Co. (1922 г.) и патент Уитни US916905 «Углеродная нить накала и способ ее изготовления» с приоритетом от 2 февраля 1905 г.

Fig. 5. GEM lamp inventor Willis R. Whitney with Thomas Edison. Schenectady. General Electric Co. (1922) and Whitney patent US916905 “Carbon filament and method of its manufacture” with priority from February 2, 1905

3. Стиль руководства и творческая атмосфера

В первые годы Уитни уделял личное внимание каждому входящему предложению и исходящему изобретению. Он оказался при смерти в 1907 году из-за тяжелого приступа аппендицита, однако после трехмесячного лечения врачи поставили его на ноги. После выздоровления он в основном занимался общим управлением лабораторией. В частности, новыми областями исследований, которые ближе к непосредственным деловым интересам GE. В связи с этим он стремился активизировать команды в связанных проектах. Его обширные научные знания, способности химика и находчивость экспериментатора заложили основу всей работы лаборатории. Его энергия и личный магнетизм создавали мощную атмосферу творчества в коллективе.

Уитни поддерживал в лаборатории академическую атмосферу. Ежедневно устраивал семинары, на которых участники исследований сообщали о своей работе, а иногда на таких мероприятиях заслушивались выступления приглашенных ученых. Все его усилия были направлены на проведение научных исследований, востребованных промышленностью с их акцентом на фундаментальную науку. Это тот мост, который был в значи-

тельной степени построен Уитни в то время, когда на него был очень небольшой спрос. Как позже, заметил Уитни, «его стремление сделать карьеру в отраслевой науке было вызвано желанием принять участие в более обширных исследованиях, нежели этого можно было достичь за счет своих личных усилий в одиночку». Он говорил: «У некоторых людей найдется тысяча причин, почему они не могут сделать то, что хотят, в то время как все, что для этого нужно, — это найти ту одну причину, благодаря которой они могут это сделать» (Some people have thousands of reasons why they cannot do what they want to, when all they need is one reason why they can).

Уиллис Уитни однажды сравнил научные исследования с мостом, который строит строитель, будучи очарован созданием связанных с этим проблем. Фундаментальное исследование, предположил он, — это такой мост, который строят везде, где он поражает воображение строителя — там, где строительные проблемы кажутся ему наиболее сложными. Прикладные исследования, с другой стороны, это мост, построенный там, где люди ждут, чтобы пересечь реку. По словам Уитни, вызов изобретательности и мастерству строителя в одном случае может быть столь же великим, как и в другом.

Исследовательская лаборатория при Уитни с упорством занималась проблемой приобретения новых знаний, «базовых» и «прикладных», и делала это с заметным успехом. За время, проведенное Уитни во главе исследований General Electric, было достигнуто немало важных научных и практических достижений. Фундаментальные исследования вакуумных явлений и раскаленных тел дали важные результаты для улучшения электрического освещения и для новой важной области под названием «Электроника». Та же самая фундаментальная наука позволила Кулиджу разработать современную рентгеновскую трубку и гораздо позже концепцию Лэнгмюра для атомно-водородной сварки. Сам Уитни разработал высокочастотный нагрев для терапии, воплощенный в устройстве, известном как Inductotherm. Он проявил большую активность в лабораторном проекте по обнаружению подводных лодок в Первой мировой войне, который привел к знаменитому ламповому детектору «С» (C-tube detector). Можно с уверенностью сказать, что многие важные достижения Уитни и его коллег в области промышленных научных исследований оказали глубокое и благотворное влияние на жизнь почти всех цивилизованных людей.

4. Подбор сотрудников

Одним из самых больших достижений Уитни на посту директора была его способность привлекать к работе в лаборатории талантливых молодых людей, которые могли генерировать новые научные идеи. Он давал

им большую свободу в выборе исследовательских проектов и содействовал карьере таланта, которого он привлекал к работе.

Преданность Уитни принципу свободы исследования, так же как и его нетерпение к рутинным административным деталям была основана не просто на стремлении обеспечить своим сотрудникам благоприятную атмосферу, а, скорее всего, это было основано на его убежденности в том, что исследования, не зависящие от остроты ежедневных кризисов, были верным путем к основным выгодам для корпорации-спонсора. Уитни был убежден в том, что, хотя путем решения небольших проблем можно добиться относительно небольших успехов, настоящие прорывы в науке произойдут из широкомасштабного и относительно неопределенного подхода к границам человеческого невежества [4].

Уитни знал, как извлекать выгоду из совместной работы людей, но при этом он точно так же знал, что основным компонентом любого крупного научного достижения должен быть талантливый человек. Он был особенно успешным в привлечении такого таланта в исследовательскую лабораторию General Electric, и такие люди, как Ленгмюр, Кулидж, Халл и Дэшман, среди многих, кто присоединился к его сотрудникам, не нуждались в представлении, рис. 6.



Рис. 6. Здание исследовательской лаборатории GE и Уиллис Р. Уитни за настройкой радиоприемника. 20-е годы XX века.

Fig. 6. Building of the GE Research Laboratory and Willis R. Whitney for tuning the radio. 20s of the twentieth century

В 1946 году, когда Уитни была вручена медаль Института промышленных исследований, Ирвинг Ленгмюр выступил с докладом «Уитни, человек и лидер» [5]. В своем выступлении он рассказал, как он пришел, чтобы присоединиться к персоналу лаборатории. «То, как находили сотрудников для лаборатории, представляет большой интерес. Было обычным делом каждую субботу проводить днем в лаборатории коллоквиум. Приглашенному докладчику, как правило, предлагали провести день в лаборатории, что позволяло сотрудникам лаборатории пообщаться со многими извест-

ными учеными. Также время от времени существовала традиция приглашать в лабораторию молодых людей, которые впоследствии могли бы присоединиться к персоналу. Я преподавал качественный и количественный анализ в Институте Стивенса³ (Stevens Institute of Technology, SIT) в течение трех лет, читал лекции и руководил лабораторными работами. Хотя я отправился в Стивенс с намерением посвятить свою жизнь научным исследованиям, но я не нашел возможности к ним приступить, так как не было для этого времени. Во время собрания Электрохимического общества в Скенектади осенью 1908 года его членам показали лабораторию, а меня попросили руководить одним из предстоящих коллоквиумов. После коллоквиума мне было предложено провести летний отпуск в лаборатории GE.

Для меня эти летние каникулы были прекрасным открытием. В первый день я спросил доктора Уитни, что мне делать. Он даже не подумал об этом и предложил мне провести несколько дней, знакомясь с каждым человеком в лаборатории — разговаривая с каждым и наблюдая за тем, что он делает. Две вещи, которые я увидел, особенно заинтересовали меня: во-первых, методы, используемые для создания хорошего вакуума, которые были намного лучше, чем те, что я видел в Германии или слышал о них в любом университете, и, во-вторых, мне было любопытно узнать о вольфрамовых нитях, которые можно было нагревать свыше 3000 градусов, по сравнению с платиной, которая выдерживала гораздо более низкие температуры.

Здесь была возможность познакомиться с высокотемпературными явлениями. Таким образом, работа, которую я делал в течение трех месяцев отпуска, была в этом направлении. Ни разу на меня не оказывали давления, даже для того, чтобы направить меня по определенному пути. Каждый день доктор Уитни проводил со мной достаточно времени, чтобы выяснить, чем я занимаюсь, и каждый день делал интересные наблюдения и стимулирующие предложения. Обычно он приходил и говорил: Ну что, повеселились сегодня? — Конечно, мне было весело. Это был его дух. Ему было весело говорить со мной, а мне было весело слушать его, но главное нас интересовало то, что мы находили изо дня в день.

Для Уитни приобретение новых знаний было синонимом экспериментов. — Так уж вышло, что я вроде обезьяны, — сказал он однажды. — У меня любопытство, как у обезьяны, и мне хочется чувствовать, обонять и пробовать на вкус то, что возбуждает мое любопытство, а потом разби-

³ Технологический институт Стивенса основан в 1870 году. Является ведущим частным исследовательским университетом, расположенным в Хобокене, штат Нью-Джерси, с видом на Манхэттен. Технологические инновации были отличительной чертой и наследием образовательных и исследовательских программ Стивенса на протяжении 145 лет.

рать на части. Она родилась во мне. Не все такие, но научный исследователь должен быть таким».

5. Философия приглашения сотрудников

Некоторые сотрудники пришли в лабораторию с теми же мысленными оговорками, что и сам Уитни, когда рассматривали переход от академической к промышленной площадке. Интересный комментарий о природе лаборатории, созданной Уитни, и о собственном административном гении Уитни состоит в том, что эти люди вскоре утратили первоначальную нерешительность и начали активно участвовать в уникальном эксперименте.

Уиллис Р. Уитни в значительной степени определил модель и философию современных промышленных исследовательских лабораторий, одно из уникальных достижений XX столетия. Он именно тот человек, который оказался в нужном месте и в нужное время.

В 1900 году Уиллис Уитни пригласил Уильяма Дэвида Кулиджа (William David Coolidge, 23.10.1873—03.02.1975) на работу в лабораторию, которого он знал еще студентом и общался с ним, когда тот стал работать в МИТ, будучи молодым ученым. Это предложение для Кулиджа было не только неожиданным, но и заманчивым. При переходе в GE его зарплата увеличивалась в два раза, в сравнении с той, что он получал в МИТ. В 1905 году предложение было принято, и он стал сотрудником лаборатории.

Успех Уитни в привлечении сотрудников такого калибра, как Кулидж, был, конечно, во многом обусловлен его политикой предоставления им как можно большей свободы. Уитни однажды заметил, после того как в 1909 году Ленгмюра взяли на работу и он провел несколько лет в исследовании того или иного дела, которое привлекло его внимание: «Мне очень весело, но я действительно не знаю, что хорошего это принесет компании Дженерал Электрик».

Интересен путь в лабораторию GE Альберта Халла (Albert Wallace Hull, 19.04.1880—22.01.1966), который в 1909 году получил докторскую степень по физике (Ph.D) в Йельском⁴ университете США. После этого он преподавал физику, в течение пяти лет, в Вустерском политехническом институте (Worcester Polytechnic Institute, штат Массачусетс), где провел исследования по фотоэлектричеству. Результаты этих научных исследований он не решался представить научному сообществу, считая, что нужно с

⁴ Йельский университет (англ. *Yale University*) - частный исследовательский ун-т в городе Нью-Хейвен (англ. *New Haven*). По состоянию на 2011 год университет занимает 11 место в «шанхайском» академическом рейтинге университетов мира и 3 место в рейтинге лучших университетов по версии издания U.S. News & World Report

ними еще поработать. Его супруга считала иначе и в июне 1912 года буквально вытащила его на заседание Американского физического общества, проходившего в Нью-Хейвене. На этом заседании его заметили сотрудники научно-исследовательской лаборатории GE Ирвинг Ленгмюр и Уильям Кулидж. Они познакомились с А. Халлом и даже пообедали с ними. Спустя пару недель последовало приглашение выступить на еженедельном коллоквиуме лаборатории. В результате У. Кулидж пригласил А. Халла поработать в их лаборатории во время летних каникул 1913 года.

После окончания учебного года, в 1914 году, А. Халл вернулся в Скенектади по приглашению директора лаборатории д-ра В. Уитни и был принят в качестве физика-исследователя научно-исследовательской лаборатории GE. Позже, в 1928 году, он стал зам. директора (assistant director) этой лаборатории и проработал здесь вплоть до своей отставки в 1949 году. В этой должности А. Халл получил известность как приверженец коллегиального стиля управления при минимальном вмешательстве в исследовательские работы своих сотрудников.

Работы трех экспериментаторов — А. Халла, И. Ленгмюра и У. Кулиджа впоследствии явились той научной и технологической базой, на которой развивалось радиотехническое отделение General Electric, рис. 7.

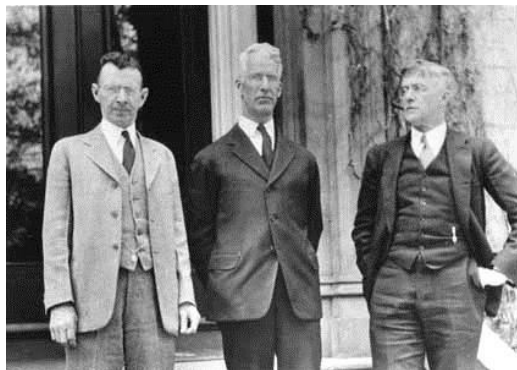


Рис. 7. У. Кулидж, А. Халл и И. Ленгмюр (слева направо).

Fig. 7. W. Coolidge, A. Hull and I. Langmuir (from left to right)

Экономическая депрессия 1929—1932 годов негативно сказалась на здоровье Уитни и привела к его официальной отставке с должности директора исследовательской лаборатории в 1932 году и выходу его на пенсию. Последние четыре года он занимал должность вице-президента, отвечающего за все исследования, проводимые в GE. В знак благодарности Уитни был назначен почетным вице-президентом компании.

Благодаря его деятельности лаборатория GE, изначально находившаяся в маленькой хижине за домом ученого Чарлза Штейнмеца, превратилась в ведущий промышленный центр исследований в Соединенных Штатах. После ухода Уитни заведующим лабораторией стал Уильям Кулидж.

6. Залог успеха лаборатории

Залог успеха лаборатории напрямую связан с привлечением к исследованиям большого количества умов, которые по большей части работали из-за страсти к своей работе. В среде ранней исследовательской лаборатории GE было прекрасное чувство командной работы. Работа за счастье или славу не была отличительной чертой этой лаборатории. В то время как некоторые инженеры, такие как Томас Эдисон и Никола Тесла, бесконечно жаждали славы и внимания, команда в Скенектади работала относительно спокойно. Говорят, что некоторые ученые, такие как Чарльз Штейнмец, создавали инновации в проектах других членов команды и отказывались от вознаграждения [6]. Другим примером, может служить помощь К. Хевитта (C.W. Hewitt), которую он оказал коллегам по лаборатории Честеру Райсу (Chester Williams Rice) и Эдварду Келлогге (Edward Washburn Kellogg) в разработке первого в мире мощного электродинамического громкоговорителя с подвижной катушкой, о которой стало известно только спустя годы, рис.8.

После экспериментов с большим числом различных материалов и конструкций из них, Райс и Келлогг предложили легкую (бумажную) коническую диафрагму, жестко прикрепленную к катушке индуктивности, перемещающейся в магнитном поле. Конструкция электродинамического динамика Rice/Kellogg была лицензирована RCA и использовалась в успешной линейке усилителей типа Radiola, рис. 8.



Рис. 8. Конструкция электродинамического громкоговорителя Честера Райса (по патенту US1707570) и радиола Model 104 с этим громкоговорителем мощностью 1 Вт [7]. 1926 г.

Fig. 8. The design of the Chester Rice electrodynamic loudspeaker (according to the patent US1707570) and Model 104 radiol with this 1 W loudspeaker [7]. 1926

Первый коммерческий усилитель (первая в мире «домашняя стереосистема») с громкоговорителем Райса в 1926 году на рынке стоил 250 долларов, что эквивалентно 3000 долларов в сегодняшних долларах США.

Неконкурентное окружение лаборатории и поисковые исследования продолжались до 1950-х годов, когда С. Гай Суитс⁵ (Chauncey Guy Suits, 03.2.1905—08.14.1991) и другие изменили структуру лаборатории. Однако такого исключительного положения, как при Уитни, лаборатория уже не занимала. Многие исследователи работали в лаборатории на различных по длительности во времени договорах. Некоторые работали всю жизнь, как Эрнст Александерсон, в то время как другие участвовали в краткосрочных проектах, такие как Дэвид Паккард (David Packard) из HP.

7. Исследования по радиоэлектронике

Уитни сыграл ключевую роль в стратегическом переходе от исследований, связанных с электрическим освещением и другими традиционными технологиями, к новым технологиям радиотехники и электроники в 1913 году. Новая инициатива, по сути, началась, когда контроллер Audion или «ion controller» оказался в GERL в начале февраля 1913 года, с надеждой, что Ленгмюр и его коллеги смогут превратить его в более предсказуемый и надежный усилитель. Ленгмюр сразу же начал исследования трехэлектродной лампы при содействии Уильяма С. Уайта (William C. White, 1890—1965). Уайт имел многолетний опыт работы радиолюбителем и провел два года в GERL, будучи зачисленным в бакалавриат в области электротехники в Колумбийском университете. После его окончания в 1912 году он стал штатным сотрудником GERL. Уайт стал высококвалифицированным разработчиком вакуумных ламп и связанных с ними устройств. Позже он охарактеризовал Ленгмюра как «типичного ученого» (typical scientist), который имеет тенденцию терять интерес после того, как явление описано математической моделью. Напротив, Уайт называл себя типичным техником, который получает огромное удовольствие от попыток сделать открытия Ленгмюра полезными и особенно, если можно что-то еще изготовить. Саул Дэшман (Saul Dushman) также приобрел достаточные навыки в проектировании и изготовлении экспериментальных вакуумных ламп.

Другим ведущим членом группы радиоэлектроники Уитни был Альберт В. Халл. Позже Уайт вспоминал творческую среду лаборатории, когда в

⁵ В 1945 году С. Гай Суитс стал вице-президентом и директором по исследованиям в GE, занимал этот пост до 1965 года.

нее вошел Халл. Уайт писал, что Халл, Ленгмюр, Дэшман, стеклодув и несколько рабочих, располагались вместе в одной большой комнате, что позволяло им постоянно обмениваться идеями. При этом он заметил, что такой способ общения давал получение отличных результатов, а также отличный способ обмена информацией и быстрого прогресса в решении проблемы [8].

8. Заключение

История лаборатории GE с момента ее создания и до периода необычайного роста была историей личных достижений Уитни. Он ушел с поста директора, в разгар национальной и личной депрессии.

Уйдя на пенсию, он посвятил себя своим хобби — черепахам, наколечникам стрел и размышлениям о работе ума, о чем он иногда писал в популярных журналах.

Уиллис Уитни был членом бесчисленных научных обществ, в том числе Американского института инженеров-электриков (American Institute of Electrical Engineers), Американского общества инженеров-электрохимиков (American Society of Electrochemical Engineers), Национальной академии наук (National Academy of Sciences), Британского института металлов (British Institute of Metals) и Национального исследовательского совета (National Research Council). Он получил множество научных наград, таких как медаль Уилларда Гиббса (Willard Gibbs Medal) в 1920 году, медаль Перкина (Perkin Medal) в 1921 году и золотую медаль Национального института социальных наук (Gold Medal of the National Institute of Social Sciences) в 1928 году. В 1934 году он был награжден медалью Эдисона (AIEE Edison Medal) за «его вклад в науку об электротехнике, его новаторские изобретения и его вдохновляющее лидерство в исследованиях».

Список литературы

1. Buderer Robert. Engines of tomorrow : How The World's Best Companies Are Using Their Research Labs to Win the Future. Simon & Schuster, 2000. 448 p.
2. General Electric Metallized. Очерки по истории изобретений. Блог Александра Мицкевичуса об изобретениях, изменивших мир. URL: <https://top100invent.blogspot.com/2014/06/general-electric-metallized.html> (10.12.2019).
3. Whitney, Willis Rodney (1887–1958), URL: <https://www.harvardsquarelibrary.org/biographies/willis-rodney-whitney-2/> (07.05.2019).
4. Harvard Square Library. Whitney, Willis Rodney (1887–1958). URL: <https://www.harvardsquarelibrary.org/biographies/willis-rodney-whitney-2/> (07.05.2019).
5. Suits Guy. Willis Rodney Whitney 1868–1958. Biographical Memoir. Washington D. C. National Academy of Sciences, 1960. 19 p.
6. Edison Tech Center. General Electric Research Lab. URL: <https://edisontechcenter.org/GEResearchLab.html> (07.05.2019).

7. Edison Tech Center. The accomplishments and life of engineering pioneer C. W. Rice, 1888–1951. URL: <https://edisontechcenter.org/CWrice.html> (07.05.2019).
8. Brittain James E. Electrical Engineering Hall of Fame Willis R. Whitney // Proceedings of the IEEE, 2007. Vol. 95, No. 12. Pp. 2472–2476.

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.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.