

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА
– ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА:**

Будко П.А. Ученый секретарь ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА
(Председатель редколлегии):**

Кулешов И.А. Заместитель генерального директора по научной работе ПАО «Интелтех». Д.т.н., доцент

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

Катанович А.А. Главный научный сотрудник НИИ ОСИСВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ. Заслуженный работник связи РФ. Заслуженный изобретатель РФ

Кузичкин А.В. Главный научный сотрудник Научно-исследовательского института телевидения Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Курносов В.И. Главный специалист ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный работник связи РФ

Мирошников В.И. Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Половинкин В.Н. Научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Присяжнюк С.П. Генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

Чуднов А.М. Профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Д.т.н., профессор

Яшин А.И. Заместитель генерального конструктора – научный руководитель работ ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Винограденко А.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Габриэлян Д.Д. ФНПЦ «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону). Д.т.н., профессор

Густов А.А. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

Дорогов А.Ю. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

Куприянов А.И. Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Д.т.н., профессор

Легков К.Е. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). К.т.н., доцент

Липатников В.А. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Макаренко С.И. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Минаков В.Ф. Санкт-Петербургский государственный экономический университет (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Михайлов Р.Л. Череповецкий военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (г. Череповец). Д.т.н.

Одоевский С.М. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Пашинцев В.П. Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Путилин А.Н. ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Федоренко В.В. Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

Финько О.А. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (г. Краснодар). Д.т.н., профессор

Цимбал В.А. Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов). Д.т.н., профессор

Семенов С.С. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Саенко И.Б. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

Стародубцев Ю.И. Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор

Титков И.В. Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

**EDITORIAL BOARD CHAIRMAN
– JOURNAL EDITOR-IN-CHIEF:**

Budko P.A. Academic Secretary of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

**JOURNAL DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF
(Editorial Board Chairman):**

Kuleshov I.A. Deputy General Director for Scientific Work of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:

Katanovich A.A. Chief Research Officer of the ISIS Institute of the Navy WUNCC Navy "N.G. Kuznetsov Naval Academy". Doctor of Technical Sciences, professor. Honored Inventor of the Russian Federation

Kuzichkin A.V. Chief Research Officer of the Television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation

Kurnosov V.I. Chief Specialist of PJSC "Inteltech". Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Communications of the Russian Federation

Miroshnikov V.I. General Designer of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Polovinkin V.N. Scientific Head of FSUE Krylovsky State Scientific Center, Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Science of the Russian Federation

Prisyazhnik S.P. Director General of CJSC Institute telecommunications. Doctor of Technical Sciences, professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

Chudnov A.M. Department Professor of the Communications Military Academy named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenniy. Doctor of Technical Sciences, Professor

Yashin A.I. Deputy General Designer – Scientific Supervisor of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Vinogradenko A.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg) Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Gabrielyan D.D. FNPC "Rostov-on-Don Scientific Radio Research Institute"(Rostov-On-Don). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Gustov A.A. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

Dorogov A.Y. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Kupriyanov A.I. Moscow Aviation Institut (National Research Universit) Doctor of Technical Sciences, Professor

Legkov C.E. Military Space Academy of A.F. Mozhaiskiy (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor

Lipatnikov V.A. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Makarenko S.I. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Minakov V.F. St. Petersburg State Economic University (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Mikhailov R.L. Cherepovets Military Order of Zhukov University of Asche Radioelectronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences. Associate Professor.

Odoevsky S.M. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Pashintsev V.P. North Caucasus Federal University (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, Professor

Putilin A.N. PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Fedorenko V.V. North Caucasus Federal University. (Stavropol). Doctor of Technical Sciences, professor

Finko O.A. Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Stemenko (Krasnodar). Doctor of Technical Sciences, Professor

Tsymbal V.A. Branch of the Great Petr RVSNI Military Academy (Serpukhov). Doctor of Technical Sciences, Professor

Semenov S.S. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Saenko I.B. Saint Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Sciences Russian Academy (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

Starodubtsev Y.I. Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor

Titkov I.V. Military Educational and Scientific Center of the Navy "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor

РЕДАКЦИЯ:

Верстка принт-макета: **Мамончикова А.С.**
Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**
Поддержка сетевой версии журнала: **Тюкинеева Л.В.**
Секретарь редакции: **Михайлова Н.В.**

**АДРЕС
РЕДАКЦИИ:**

197342. Россия. г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, дом 8,
Телефон: +7(812) 542-90-54; +7(812) 448-95-97; +7(812) 448-96-84
Факс: +7(812) 542-18-49. E-mail: mce-journal@inteltech.ru.
Официальный сайт: www.inteltech.ru; www.mce-journal.ru



Научно-технический журнал «Техника средств связи» – это рецензируемое научное издание, в котором публикуются результаты научных исследований специалистов в области современных инфокоммуникационных технологий и автоматизированных систем управления, средств связи и информационной безопасности. Журнал является правопреемником издававшихся с 1959 года Министерством промышленности средств связи СССР всесоюзных журналов «Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи» и «Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи». С 1975 года журнал издается под названием «Техника средств связи». Учредитель и издатель журнала: Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Адрес учредителя и издателя журнала: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д.8.

Адрес типографии: 623102, Свердловская область, г. Первоуральск. пр. Ильича д.26А, АО «Первоуральская типография».

Главный редактор журнала-Председатель редакционного совета - П.А. Будко, Ученый секретарь ПАО «Интелтех», Д.т.н., профессор.

Решением ВАК № 222-р от 10.06.2024 научно-технический журнал «Means of communication equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и рекомендован ВАК для публикаций основных результатов по научным специальностям: 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения; 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии; 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций; 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей; 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (по отраслям науки - технические науки).

Выходит 4 раза в год.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Основное содержание издания представляет собой научные статьи и научные обзоры.

Возрастное ограничение 12 +

Журнал зарегистрирован как сетевое и печатное издания в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельства о регистрации средств массовой информации: ПИ № ФС 77 – 80135 и ЭЛ № ФС 77 – 80136 от 31.12.2020 г.

ISSN (print): 2782-2141; ISSN (online): 2782-2133; РИНЦ (eLIBRARY ID: 77074)

Распространяется по подписке. Подписной индекс журнала-79656. Ссылки для оформления интернет-подписки на журнал:

<https://www.akc.ru/itm/means-of-communication-equipment/>; <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/e79656/>

Свободная цена

Тираж: 40 экз.

Подписано в печать 19.06.2025. Дата выхода в свет 23.06.2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М. 2
Создание помех радиосистемам за счет деструктивного воздействия на среду распространения радиосигнала

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Нестеров А. А., Макаренко С. И., Черницкая Т. Е. 9
Количественная оценка вероятности нарушения требований информационной безопасности в модели интероперабельности организационно-технических систем
Рыжиков А. Р. 26
Логическая схема защищенного кодера на базе простых алгоритмов шифрования

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Шаповалов Ф. А. 35
Разработка коллинеарной антенны для стандарта Wi-Fi 5

ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

- Акулов В. С., Угрик Л. Н., Дяченко А. Н. 48
Оценка вероятности трансформации двоичных кодов Хэмминга

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ.

СБОР, ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Буткевич Ю. Р. 56
Анализ шумовых характеристик устройств цифровой обработки и воспроизведения сигналов
Лобеев Д. П., Билятдинов К. З., Гриценко А. А. 65
О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Давыдчик В. В. 76
О развитии подходов к определению основных показателей функционирования систем управления на основе свойства оперативности

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Акулов В. С., Бисярин М. А., Угрик Л. Н., Петров А. Н. 85
Анализ факторов, влияющих на распространение радиоволн СДВ диапазона

CONTENTS

ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING SYSTEMS

- Dmitriev V. G., Kupriyanov A. I., Perunov Yu. M. 2
Interference with radio systems due to destructive effects on the propagation environment of the radio signal

INFORMATION SECURITY ISSUES

- Nesterov A. A., Makarenko S. I., Chernitskaya T. E. 9
Quantitative assessment of the probability of information violation security requirements in the organizational and technical systems interoperability model
Ryzhikov A. R. 26
Logic diagram of a secure encoder based on simple encryption algorithms

COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Shapovalov F. A. 35
Development of a collinear antenna for the Wi-Fi 5 standard

TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING OF SIGNALS

- Akulov V. S., Ugrik L. N., Dyachenko A. N. 48
Estimation of the transformation probability of binary Hamming codes

INFORMATION PROCESSES AND TECHNOLOGIES.

COLLECTION, STORAGE AND PROCESSING OF INFORMATION

- Butkevich Y. R. 56
Analysis of noise characteristics of digital signal processing and reproduction devices
Lobeev D. P., Bilyatdinov K. Z., Gritsenko A. A. 65
The occurrence of the Doppler effect on high-speed highways and a way to compensate for the Doppler effect

CONTROL SYSTEMS

- Davydchik V. V. 76
On the development of approaches to determining the main indicators of the functioning of management systems on the basis of the properties of efficiency

MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

- Akulov V. S., Bisyarin M. A., Ugrik L. N., Petrov A. N. 85
Analysis of factors influencing the spread of the SLE radio waves

Рубрики журнала: Анализ новых технологий и перспектив развития техники средств связи • Системы управления •
• Передача, прием и обработка сигналов • Системы связи и телекоммуникации • Перспективные исследования •
• Вычислительные системы • Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации •
• Моделирование сложных организационно-технических систем • Вопросы обеспечения информационной безопасности •
• Интеллектуальные информационные системы • Робототехнические системы • Электронные и радиотехнические системы •
• Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области разработки средств телекоммуникаций

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.396.966

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-2-8

Создание помех радиосистемам за счет деструктивного воздействия на среду распространения радиосигнала

Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М.

Аннотация: Рассматриваются деструктивные воздействия на ионосферу мощным электромагнитным излучением декаметрового диапазона, создаваемого нагревными стендами, а также возможности использования эффектов, обусловленных результатами такого воздействия (ракурсного рассеивания сигналов на искусственно созданных атмосферных неоднородностях). Для создания информационных каналов сверхдальнего доступа средств радио- и радиотехнической разведки к сигналам радиоэлектронных систем и средств, рассматривается возможность организации радиоэлектронного противодействия работе этих систем и средств. Теоретически показана и экспериментально подтверждена принципиальная возможность сверхдальнего распространения сигналов радиосистем связи и зондирующих сигналов РЛС за счет ракурсного рассеивания на ионосферных неоднородностях, искусственно созданных излучениями нагревных стендов. Оценены энергетические характеристики каналов радиоэлектронной разведки и радиоподавления, использующих эффекты ракурсного рассеивания сигналов подавляемых средств.

Ключевые слова: атмосферные неоднородности, нагревные стенды, радиоэлектронная борьба, ракурсное рассеивание.

Средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ) ведут радио- и радиотехническую разведку (РПТР) радиоэлектронных средств (РЭС) и, создавая помехи, противодействуют работе каналов связи и передачи данных, информационных каналов радиолокационного обнаружения и определения параметров целей, средствам формирования и использования, навигационных полей. Но в современных условиях складываются принципиальные возможности для РЭБ не за счет действия помех, а при посредстве негативного и деструктивного воздействия на свойства среды распространения радиосигналов.

Первые эффекты взаимодействия электромагнитных полей со средой их распространения – холодной замагниченной плазмой верхних слоев атмосферы были обнаружены и в 30-х годах прошлого века. Прежде всего, был обнаружен и теоретически объяснен эффект кроссмодуляции (Люксембургско – Нижегородский эффект) [3], обусловленный взаимодействием электромагнитных волн разных частот на нелинейности ионосферы.

Другие нелинейные эффекты, сопровождающие взаимодействие радиосигналов с плазмой наблюдались в экспериментах с мощным электромагнитным излучением нагревных стендов СУРА, EISCAT и HAARP [2, 3]. Так было обнаружено искусственное вторичное радиоизлучение при воздействии на ионосферу мощным электромагнитным излучением. Наблюдался эффект нелинейного детектирования радиосигналов с амплитудной модуляцией (эффект Г.Г. Гетманцева). Наблюдалось ракурсное рассеивание радиосигналов на искусственно созданных неоднородностях ионосферы. Была обнаружена генерация вторичного излучения ионосферы в диапазоне очень низких и сверхнизких частот.

Из перечисленных эффектов, обусловленных нелинейностями в ионосфере, именно ракурсное рассеивание может быть применено для радиоэлектронной борьбы с информационными каналами систем радиосвязи.

Ракурсное рассеивание наблюдается, когда мощная радиоволна нагревных стенов в декаметровом диапазоне формирует в ионосфере искусственные неоднородности электронной концентрации. Масштабы неоднородностей различны – от долей метра до десятков километров. Неоднородности вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля Земли. При облучении этих неоднородностей возбужденной ионосферы сигналами радиоволн второй радиостанции с несущей частотой, превышающей в 10 и более раз, частоты коротковолнового диапазона рассеянные неоднородностями сигналы попадают в волновод F слоя ионосферы. В этом волноводе сигналы распространяются на тысячи километров, а также отражаются во всех направлениях под углом 90° к магнитному полю.

На рис. 1 представлены полученные в результате моделирования воздействия на ионосферу контуры ракурсного рассеивания нагревного стенда *HAARP* при частоте второй радиостанции 20 МГц и разных высотах h над поверхностью Земли [4].

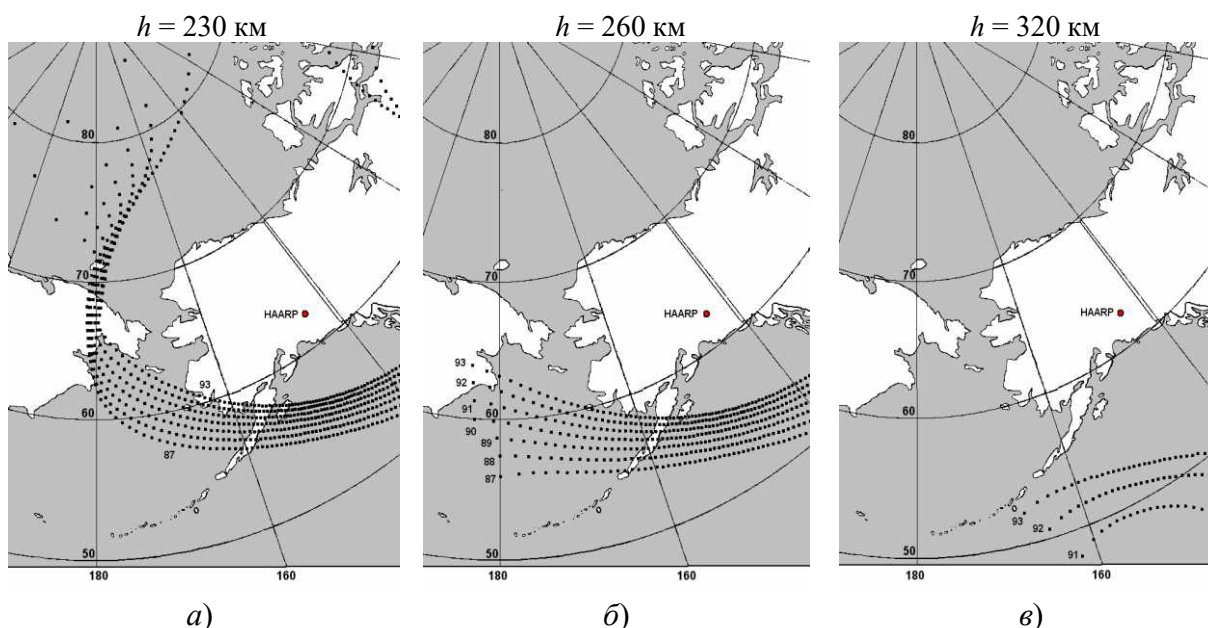


Рис. 1. Контуры ракурсного рассеивания, формируемого нагревным стендом *HAARP*, рассчитанные для ионосферной модели *IRI* (сентябрь, $W-100$).

Возможность сверхдальней радиосвязи с использованием ракурсного рассеивания на дальностях более 7000 км была подтверждена в совместном эксперименте на трассе *HAARP* (США) – СУРА (Ростов-на-Дону, РФ), 2006 г. [5, 6]

На рис. 2 представлена схема трассы сверхдальнего распространения радиоволн в условиях формирования и использования областей ракурсного рассеивания нагревных стенов *HAARP* и СУРА.

Нагревный стенд *HAARP* излучал вертикального вверх на несущей частоте 3,2 МГц сигналы с периодом 10 мин (5 мин излучения, 5 мин пауза). Излучение формировало область мелкомасштабных неоднородностей, которая облучалась сигналами радиолокационной станции (РЛС) некогерентного рассеивания *SuperDARN*, расположенных от стенда *HAARP* на удалении 120 км. Несущая частота зондирующего сигнала РЛС была 12 ... 18 МГц. Сигналы радиолокационной станции *SuperDARN*, отражаясь от мелкомасштабных неоднородностей, распространялись в волноводе F слоя ионосферы до области ракурсного рассеивания, сформированной нагревным стендом СУРА. Рассеянные на этой неоднородности сигналы принимались и обнаруживались приемным устройством в г. Ростове-на-Дону [3].

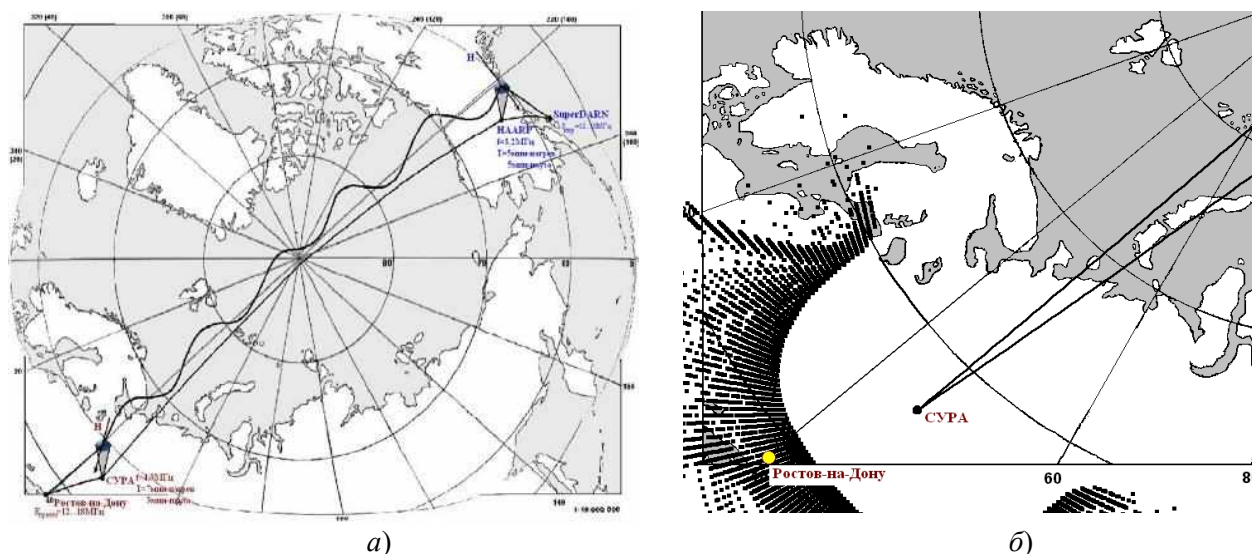


Рис. 2. Схема проведения эксперимента сверхдальнего распространения радиоволн с использованием ракурсного рассеивания:
а) трасса радиоволны и б) ракурсное рассеивание нагревного стенда СУРА

Результаты этого эксперимента по реализации сверхдальней дуплексной радиосвязи с использованием каналов ракурсного рассеивания показали принципиальную возможность для решения задач РЭБ с информационными каналами в УКВ диапазоне длин волн.

На рис. 3 показан вариант схемы формирования дуплексной радиосвязи и области ракурсного рассеяния, обеспечивающий возможность ведения радиоразведки сигналов излучения радиостанций и радиоэлектронное подавление этих радиостанций помехами, сформированными станциями РЭБ.

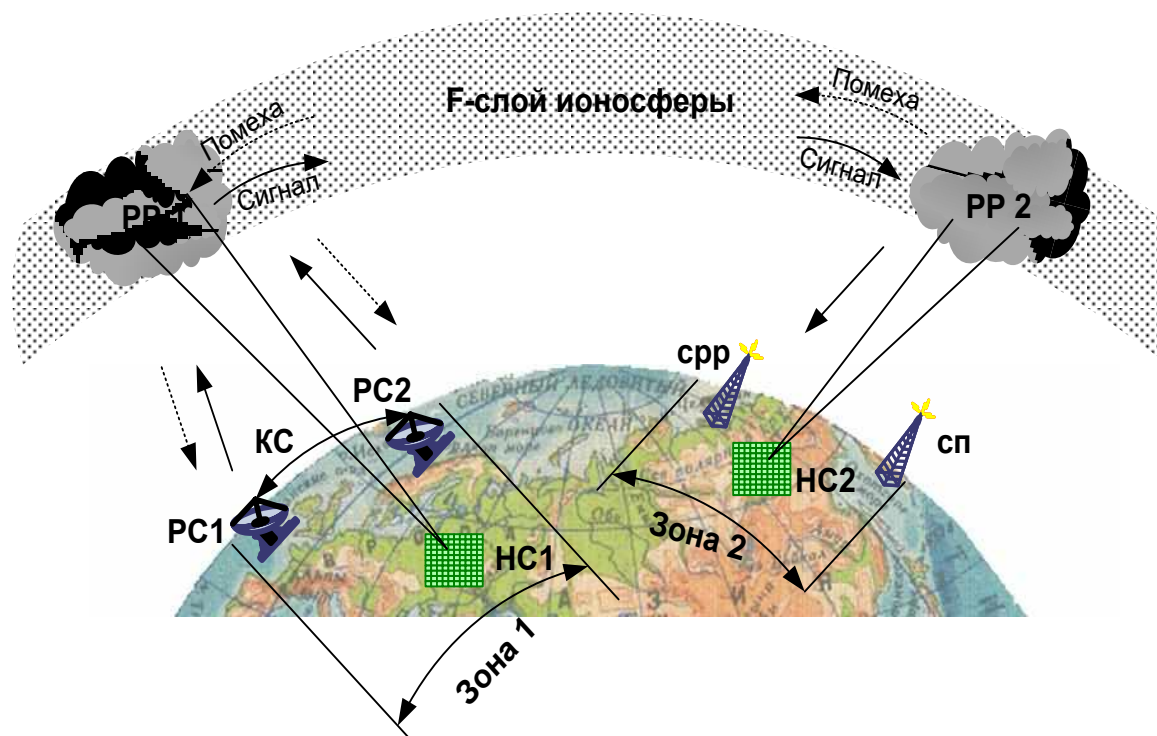


Рис. 3. Схема возможной организации радиоразведки и радиоподавления с применением ракурсного рассеивания в ионосфере

Для решения задач радиоразведки и формирования информационных каналов два нагревных стенда НС1 и НС2 работают как искусственные ионосферные ретрансляторы, размещенные на поверхности Земли. Стенды НС1 и НС2 размещаются таким образом, чтобы сформировать контуры ракурсного рассеяния над требуемыми территориями (зона 1, и зона 2 рис. 1). Для примера показано, что в зоне 1 находятся объекты радиоразведки и контроля, назначенные для подавления радиопомехами, а в зоне 2 – радиосредства, контролируемые состоянием ионосферы, ведущие радиоразведку, формирующие и излучающие помехи для подавления радиосредств, находящихся в зоне 1.

При формировании нагревными стендами областей ракурсного рассеяния (РР1 и РР2) радиосредства, находящиеся в зоне 1 (например, РС1 и РС2) за счет облучения информационными сигналами искусственных мелкомасштабных неоднородностей (область РР1) создают собственные каналы связи. Радиосигналы этих каналов связи попадают в волновод F -слоя ионосферы, по которому распространяются с низкими потерями и достигают области второго ракурсного рассеяния РР2, сформированного нагревным стендом НС2. Отражаясь от области РР2 они достигают поверхности Земли и могут приниматься приемными устройствами станции радиоразведки (СРР) и станции помех (СП). На основании анализа обнаруженных радиосигналов формируются исходные данные для принятия решения о радиоподавлении приоритетных информационных каналов радиосредств, размещенных в зоне 1.

Радиопомехи распространяются по трассам, подобным рассмотренным выше трассам распространения радиоволн. Они облучают области ракурсного рассеяния РР2 и попадают в волновод F -слоя ионосферы, по которому распространяются до области ракурсного рассеяния РР1. Отражаясь от РР1 к поверхности Земли, помехи воздействуют на приемные устройства работающих в этой зоне радиостанций. При соответствующих уровнях помех приемные устройства будут подавлены.

Безусловно, кроме геометрии контура ракурсного рассеяния эффективность передачи радиосигналов через искусственный ионосферный ретранслятор определяется характеристиками передающих и приемных устройств, обеспечивающих организацию и работу этого канала.

Необходимо отметить, что в США для решения подобных задач планировалось создание мобильных нагревных стендов, размещаемых на автомобилях или кораблях. Такие мобильные стенды, доставляемые к нашим границам, могли бы формировать области ракурсного рассеяния над территорией РФ для ведения радиоэлектронной разведки и радиопротиводействия.

Для обеспечения возможности приема сигналов излучения, передающих устройств радиоэлектронных средств зоны 1 мощность сигналов на входе приемника – реальная чувствительность P_p приемника станций радиотехнической разведки СРР зоны 2 – должна составлять [7]:

$$P_p = \frac{P_i G_i G_2 \lambda^2 \sigma_2}{(4\pi)^3 D_1^2 D_2^2} 10^{-0,01k(D_1+D_2)}, \quad (1)$$

где $P_i G_i$ – мощность и коэффициент усиления антенны (энергетический потенциал) в направлении области ракурсного рассеяния i -го передатчика зоны 1; G_2 – коэффициент усиления антенны приемника СРР; σ_2 – эффективная площадь области ракурсного рассеяния РР2; λ – длина волны сигналов радиосвязи; D_1 и D_2 – расстояния от передатчика до рассеивающей области и от рассеивающей области до приемника СРР; k – коэффициент затухания радиоволн на один километр трассы распространения на дальностях D_1 и D_2 .

Возможность подавления приемных устройств радиоэлектронных средств зоны 1 с использованием станций помех (СП) зоны 2 энергетический потенциал $(PG)_{сп}$ станции

помех для подавления сигналов информационных каналов радиосвязи зоны 1 должен составлять:

$$(PG)_{\text{сп}} = \frac{4\pi(P_i G_i)_{\text{PC}} \Delta F_{\text{сп}} D_1^2 D_2^2 Q}{G_{\text{иб}} \Delta F_{\text{PC}} \sigma_1 D_{\text{PC}}^2} 10^{-0,01k(D_1 + D_2)}, \quad (2)$$

где $(P_i G_i)_{\text{PC}}$ – энергетический потенциал радиостанции зоны 1, формирующей канал радиосвязи с радиостанцией, подавление которой возможно сигналами помех СП путем ретрансляции через ракурсное рассеяние РР1; $\Delta F_{\text{сп}}$ – ширина спектра; D_1 и D_2 – дальности от передатчика станции помех СП до рассеивающей области и от рассеивающей области до i -го приемника радиостанции PC_i ; Q – коэффициент подавления i -ой радиостанции PC_i , равный отношению мощности помехи к мощности сигнала в канале радиосвязи; $G_{\text{иб}}$ – коэффициент усиления антенны подавляемой радиостанции в направлении на ракурсное рассеяние – ионосферный ретранслятор РР1; ΔF_{PC} – ширина спектра сигнала в информационных каналах радиостанций PC_i ; σ_1 – эффективная площадь ракурсного рассеяния РР1; D_{PC} – дальности трасс распространения сигналов в информационных каналах радиосвязи в зоне 1, на которые действуют сигналы помех; k – коэффициент затухания радиоволн на один километр трассы распространения.

Эффективная поверхность рассеивания определяется площадью области мелкомасштабной неоднородности в ионосфере, сформированной электромагнитным излучением нагревного стенда в декаметровом диапазоне, определяются, как

$$\sigma = \frac{\phi^2 h^2}{4}, \quad (3)$$

где ϕ – ширина главного лепестка диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки нагревного стенда; h – высота от поверхности Земли области мелкомасштабных неопределенностей в ионосфере.

Как пример, ниже представлены результаты оценки необходимых значений реальной чувствительности станций радиотехнической разведки и энергетического потенциала станций помех при РЭБ каналам УКВ радиосвязи в условиях применения нагревных стендов НААРП и СУРА, формирующих области мелкомасштабных неоднородностей и ракурсного рассеивания.

При средней возможной высоте F слоя ионосферы ~ 260 км и несущей частоте сигналов электромагнитного излучения нагревных воздействия на ионосферу 5 МГц эффективная площадь рассеивания составит $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx 3 \times 10^9 \text{ м}^2$. При возможных значениях дальностей размещения радиостанций станций и средств РЭБ $D_1 = D_2 = D_3 = 300$ км реальная чувствительность станции радио- и радиотехнической разведки должна составить примерно 10^{-10} Вт. Соответственно энергетический потенциал станции при коэффициенте подавления $Q = 5$ должен быть не менее 10^5 Вт.

Полученные оценки значений основных характеристик средств радиоэлектронной борьбы указывают на возможность их практической реализации и, следовательно, на возможность ведения радио- и радиотехнической разведки, а также радиоэлектронного подавления информационных радиоканалов в УКВ диапазоне с использованием искусственных мелкомасштабных образований в ионосфере и ракурсного рассеивания. Создавать такие неоднородности можно вплоть до областей ниже 80 Северной широты [8].

Литература

1. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба в информационных каналах. Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021, 450 с.
2. Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М. Техногенные воздействия на среду распространения сигналов // Техника средств связи. 2023. № 1 (161). С. 2-12. DOI: 10.24412/2782-2141-2023-1-2-12

3. Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М. Радиоэлектронная борьба: воздействие электромагнитным излучением на среду распространения сигнала. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 236с.
4. Понятов А. А., Урядов В. П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн // Препринт № 428, НИРФИ, Н.Новгород, 1996.
5. Artificial Ionospheric Turbulence and Radio Wave Propagation (Sura-HAARP), NIRFI, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, 2006.
6. Фролов В. Л., Бахметьев Н. В., Беликович В. В., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Комраков Г. П., Котик Д. С., Митяков Н. А., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Сергеев Е. Н., Терещенко Е. Д., Толмачева А. В., Урядов В. П., Худокон Б. З. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением. УФН 177 330-340. 2007. PACS: 41.20.Jb, 52.35.Mw, 94.20.-y. DOI: 10/3367/UFNr.0177.200703j.0330. URL: <http://unf.ru/ru/articles/2007/3/j/> (дата обращения 12.05.2025).
7. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – Москва: Вузовская книга, 2018. 190 с.
8. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Земский Ю. А., Перунов Ю. М., Черепенин Ю. А. Особенности развития радиотехнических систем радиоэлектронной борьбы // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 8. С. 3-29.

References

1. Perunov Y. M., Kupriyanov A. I. Radio-electronic warfare in information channels. Moscow, Vologda. Infra-Engineering Publ., 2021, 450 p. (in Russian).
2. Dmitriev V. G., Kupriyanov A. I., Perunov Y. M. Technogenic influences on the signal propagation environment. Means of Communication Equipment. 2023. No. 1 (161). Pp. 2-11 DOI: 10.24412/2782-2141-2023-1-2-12 (in Russian).
3. Dmitriev V. G.; Kupriyanov A. I.; Perunov Yu. M. Radioelectronic Combat: Electromagnetic Radiation Impact on the Signal Propagation Environment. Moscow, Vologda. Infra-Engineering Publ., 2025, 236 p. (in Russian).
4. Poniatov A. A., Uryadov V. P. Computer modeling of ionospheric propagation of short radio waves. Preprint No. 428, NIRFI, Nizhny Novgorod, 1996 (in Russian).
5. Artificial Ionospheric Turbulence and Radio Wave Propagation (Sura-HAARP), NIRFI Publ., 603950 Russia, Nizhny Novgorod, 2006.
6. Frolov V. L., Bakhmet'eva N. V., Belikovich V. V., Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Komrakov G. P., Kotik D. S., Mityakov N. A., Polyakov S. V., Rapoport V. O., Sergeev E. N., Tereshchenko E. D., Tolmacheva A. V., Uradov V. P., Khudukon B. Z. Modification of the Earth's ionosphere by powerful shortwave radio emission. PACS, 41.20.Jb, 52.35.Mw, 94.20. DOI: 10/3367/UFNr.0177.200703j.0330. Available at: <http://unf.ru/ru/articles/2007/3/j/> (accessed 12 May 2025) (in Russian).
7. Perunov Y. M., Kupriyanov A. I. Radio electronic warfare: radio-technical reconnaissance. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2018, 190 p. (in Russian).
8. Bystrov R. P., Dmitriev V. G., Zemskii Yu. A., Perunov Yu. M., Cherepenin V. A. Special features of the development of the radio-technical systems of the radio-electronic struggle. Telecommunications and Radio Engineering. 2012, no. 8, pp. 3-29 (in Russian).

Статья поступила 11 мая 2025 г.

Информация об авторах

Дмитриев Владимир Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института динамики геосфер РАН. Область научных интересов: радиоэлектронная борьба.

Адрес: 119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1, e-mail: gejspheres@idg.chph.ru

Куприянов Александр Ильич – доктор технических наук, профессор, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Область научных интересов: радиоэлектронная борьба.

Адрес: 125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: aik125167@mail.ru

Перунов Юрий Митрофанович – доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор средств радиоэлектронной борьбы, главный научный сотрудник Института динамики геосфер РАН. Область научных интересов: радиоэлектронная борьба.

Адрес: 119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1, e-mail: gejspheres@idg.chph.ru.

Interference with radio systems due to destructive effects on the propagation environment of the radio signal

V. G. Dmitriev, A. I. Kuprijanov, J.M. Perunov

Annotation. *Destructive effects on the ionosphere by powerful electromagnetic radiation of the decameter range created by heating stands are considered, as well as the possibilities of using the effects caused by the results of such effects (foreshortening of signals on artificially created atmospheric inhomogeneities). For creation of information channels for ultra-long-range access of radio and radio-technical reconnaissance means to the signals of radio-electronic systems and means, the possibility of organizing radio-electronic countermeasures is considered. Theoretically shown and experimentally confirmed the principal possibility of ultra-long-range propagation of signals of radio communication and sounding systems due to foreshortened scattering on ionospheric inhomogeneities artificially created by radiations of heating stands. The energy characteristics of electronic reconnaissance and radio suppression channels using the effects of foreshortened scattering of signals of suppressed means are estimated.*

Keywords: *atmospheric inhomogeneities, heating stands, electronic warfare, foreshortened scattering.*

Information about Authors

Dmitriev Vladimir Grigorevich – Doctor of Technical sciences. The leading scientific employee of Institute of dynamics of geospheres of the Russian Academy of Sciences. Research interests: electronic warfare.

Address: 119334, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 38, the case 1, E-mail: gejspheres@idg.chph.ru.

Kuprijanov Alexander Ilich – Doctor of Technical sciences, the professor. The professor of the Moscow aviation institute (National research university). Research interests: electronic warfare. Tel.: +7-910-469-09-55

Address: 125993, Russia, Moscow, Volokolamsk highway, 4, E-mail: aik@mai.ru.

Perunov Jury Mitrofanovich – Doctor of Technical sciences, the professor. The general designer of means of radio-electronic struggle, Chief Researcher, Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences. Research interests: electronic warfare.

Address: 119334, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 38, the case 1, E-mail: gejspheres@idg.chph.ru

Для цитирования:

Дмитриев В. Г., Куприянов А. И., Перунов Ю. М. Создание помех радиосистемам за счет деструктивного воздействия на среду распространения радиосигнала // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 2-8. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-2-8.

For citation:

Dmitriev V. G., Kuprijanov A. I., Perunov Yu. M. Interference with radio systems due to destructive effects on the propagation environment of the radio signal Means of communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 2-8 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-2-8.

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 004.057

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-9-25

Количественная оценка вероятности нарушения требований информационной безопасности в модели интероперабельности организационно-технических систем

Нестеров А. А., Макаренко С. И., Черницкая Т. Е.

Аннотация. Постановка задачи: в современных условиях при интеграции организационно-технических систем возрастает актуальность обеспечения интероперабельности в таких системах. Существует необходимость повышения качества интероперабельности на техническом уровне при взаимодействии организационно-технических систем, однако сегодня отсутствует достаточно проработанный научно-методический аппарат количественной оценки параметров информационной безопасности при взаимодействии организационно-технических систем. **Целью работы** является разработка элементов научно-методического аппарата количественной оценки параметров информационной безопасности и повышения интероперабельности при взаимодействии организационно-технических систем. **Используемые методы:** в работе рассмотрены аспекты и параметры, составляющие содержание технического уровня интероперабельности, проводится анализ исследований, связанных с вопросами технической интероперабельности информационных систем в части параметров информационной безопасности. Проведен обзор работ по тематике интероперабельности, рассмотрен ряд работ, выполненных в области параметров информационной безопасности, как одного из аспектов технической интероперабельности. Количественная оценка параметров интероперабельности при взаимодействии организационно-технических систем в работе производится вероятностным методом, на основании теории надежности. **Результат работы** заключается в том, что предложена методика количественной оценки вероятности нарушения требований информационной безопасности при информационно-технических воздействиях на информационное взаимодействие систем. **Новизна:** состоит в том, что впервые предложены элементы научно-методического аппарата для оценки влияния параметров информационной безопасности, как одного из важнейших аспектов технического уровня интероперабельности организационно-технических систем. **Практическая значимость:** представлены методические рекомендации по минимизации рисков нарушения интероперабельности с учетом требований по информационной безопасности. Представляется актуальным использовать элементы предложенной методики в оценке уровня технической интероперабельности по другим параметрам, в том числе по параметрам требований по качеству обслуживания.

Ключевые слова: интероперабельность, организационно-техническая система, параметры информационной безопасности, технический уровень интероперабельности.

Введение

В настоящее время актуальным вопросом развития различных автоматизированных систем (АС) и информационных систем (ИС) является их взаимодействие и сопряжение между собой. Взаимодействие и сопряжение различных ИС и АС актуализирует вопросы обеспечения интероперабельности таких систем. Интероперабельность – способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена.

Значимый вклад в вопросы обеспечения интероперабельности в Российской Федерации внесли исследования ученых научной школы, возглавляемой сотрудником Института радиотехники и электроники (ИРЭ) им. В.А. Котельникова Российской академии наук (РАН) профессором А.Я. Олейниковым. В ходе этих исследований получены значимые частные результаты в области интероперабельности для ИС самого широкого класса и назначения – в здравоохранении [1-2], в электронной коммерции [3],

в образовательном процессе [4], в научных исследованиях [5], в облачных вычислениях [6], в промышленности [7], а также в области обеспечения обороноспособности нашей страны [8-11]. Различные аспекты проблемы интероперабельности исследуются специалистами в других областях, например, в области здравоохранения – В.А. Дрогозом [12-14]. В настоящее время исследования интероперабельности представителями научной школы А.Я. Олейникова продолжаются, и среди значимых результатов можно выделить работы [15-22]. В этой связи следует отметить и работу [23], в которой представлена расширенная описательная модель интероперабельности.

Международным индустриальным консорциумом *NCOIC (Network-Centric Operations Industry Consortium)* в 2004 году была разработана модель оценки интероперабельности систем, возможностей, действий, программ и организаций – *SCOPE-модель (Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises model for interoperability assessment)* [24]. *SCOPE-модель* предназначена для качественно-количественной оценки различных аспектов интероперабельности анализируемой системы в соответствии с определенным набором параметров. В результате приложения *SCOPE-модели* к конкретной организационно-технической системе (ОТС) появляется возможность оценить качество реализации отдельных аспектов интероперабельности, а также сформировать предложения и предпринять мероприятия организационного или технического характера, направленные на повышение степени интероперабельности. В *SCOPE-модели* выделяются 4 группы параметров интероперабельности, каждая из которых влияет на свойство интероперабельности ОТС:

- 1) внутренние параметры системы (*capability/domain-independent scope*);
- 2) внешние параметры системы (*capability/domain-dependent scope*);
- 3) параметры сетевого взаимодействия (*net-readiness*);
- 4) технико-экономические параметры (*technical/economic feasibility*).

В группу внутренних параметров интероперабельности входят частные внутренние параметры системы, такие, как тип и размер системы, семантические параметры интероперабельности системы, параметры жизненного цикла системы и другие, влияющие на её уровень интероперабельности. В свою очередь, в группу внешних параметров системы входят, в частности, такие параметры, как внешняя среда и другие системы, которые влияют на данную систему в части ее интероперабельности. Таким образом, можно выделить внутренние и внешние аспекты обеспечения интероперабельности. Тогда взаимодействие с внешней средой, в том числе деструктивное влияние этой среды на взаимодействующие системы, будет относиться к внешним аспектам обеспечения интероперабельности.

К одному из актуальных внешних аспектов обеспечения интероперабельности относится обеспечение информационной безопасности (ИБ) взаимодействующих систем в условиях внешних информационно-технических воздействий (ИТВ) злоумышленников. Как уже было показано, формализация различных аспектов интероперабельности приведена в работах [10-22], однако в этих работах аспекты ИБ применительно к интероперабельности не представлены. Аспекты ИБ в контексте интероперабельности рассмотрены в работах [25-27], однако в этих работах отсутствует их формализация. В работе [23] показано, что параметры ИБ являются одним из аспектов технического уровня интероперабельности, однако научно-методического аппарата для оценки влияния этих параметров на интероперабельность не представлено. Одним из ведущих специалистов, который ввел и стал активно использовать понятие риска ИБ, является А.Г. Остапенко. В своих работах [28-29] данный автор увязывает понятие «ущерба», «шанса» и «риска» (в контексте защищенности системы), в них в достаточной степени проработана оценка рисков ИБ применительно к системам различного типа, однако, вопросы ИБ применительно к интероперабельности не рассмотрены.

Среди исследований, в которых рассматриваются аспекты количественной оценки показателей интероперабельности необходимо отметить работу [30], где авторами при разработке метода количественной оценки показателей интероперабельности был использован аппарат на основе модели нечетких множеств. В работах [31-32] при решении задач оценки интероперабельности на техническом уровне использован метод численной оценки, базирующийся на основах теории информации. В работе [33] авторами было введено понятие «мотивация к интероперабельности» и проведено моделирование структурной интероперабельности на основе анализа знаков связей с использованием аппарата теории множеств. В рассмотренных работах авторы не рассматривали вопросы оценки отдельных аспектов и параметров интероперабельности на техническом уровне.

В связи с этим целью работы является разработка модели оценки аспектов ИБ в контексте обеспечения интероперабельности. За основу модели взяты работы [23, 26], которые развиты применительно к оценке аспектов ИБ в контексте обеспечения интероперабельности.

Вопросы обеспечения интероперабельности

В соответствии с отечественной эталонной моделью интероперабельности¹ (рис. 1) взаимодействие ИС формализуется на трех иерархических уровнях интероперабельности: техническом, семантическом, организационном.

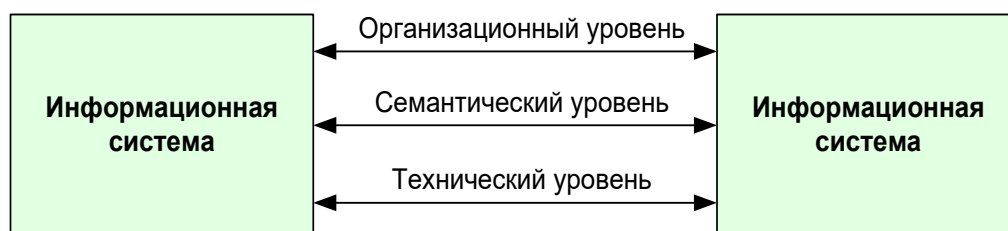


Рис. 1. Отечественная эталонная модель интероперабельности

Технический уровень интероперабельности – уровень интероперабельности, на котором формализуются процессы информационного взаимодействия между техническими системами, техническими средствами, аппаратными и программными комплексами с учетом особенностей реализации их интерфейсов и протоколов обмена информацией, а также форм и форматов представления информации [21]. Аспекты и параметры, составляющие содержание технического уровня интероперабельности, представлены на рис. 2.

Таким образом, одним из аспектов технического уровня интероперабельности являются параметры информационной безопасности.

В [23] показано, что уровень готовности объектов и систем к взаимодействию зависит от набора параметров готовности объектов и систем к взаимодействию между собой, а также определены и описаны уровни этой готовности, однако при этом научно-методического аппарата для оценки такой готовности автором не предлагалось. В дальнейшем, мы будем говорить о параметрах информационной безопасности, понимая под этим данное в [23] определение: «информационная безопасность – это состояние, при котором обеспечивается конфиденциальность, целостность и доступность информации».

¹ ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.



Рис. 2. Аспекты и параметры, составляющие содержание технического уровня интероперабельности

Аспекты обеспечения информационной безопасности

В [23] были рассмотрены параметры ИБ применительно к различным процессам, объектам и этапам жизненного цикла данных, для которых требуется обеспечение информационной безопасности, а также показателям информационной безопасности, рис. 3.

В теории информационной безопасности рассматриваются вопросы обеспечения целостности, достоверности и конфиденциальности в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов – ИТВ. При этом под конфиденциальностью, целостностью и доступностью информации будем понимать следующее:

- конфиденциальность – обеспечение доступа к информации только авторизованным пользователям;
- целостность – обеспечение достоверности и полноты информации и методов ее обработки;
- доступность – обеспечение доступа к информации и связанным с ней активам авторизованных пользователей по мере необходимости².

Информационно-техническое воздействие – негативный фактор, представляющий собой воздействие либо на информационный ресурс, либо на информационную систему или на средства получения, передачи, обработки, хранения и воспроизведения информации в ее составе с целью вызвать заданные структурные и/или функциональные изменения. Классификация информационно-технических воздействий представлена на рис. 4 по информации из работы [34].

² ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005. Информационная технология. Практические правила управления информационной безопасностью. – М.: Стандартинформ, 2006. – 62 с

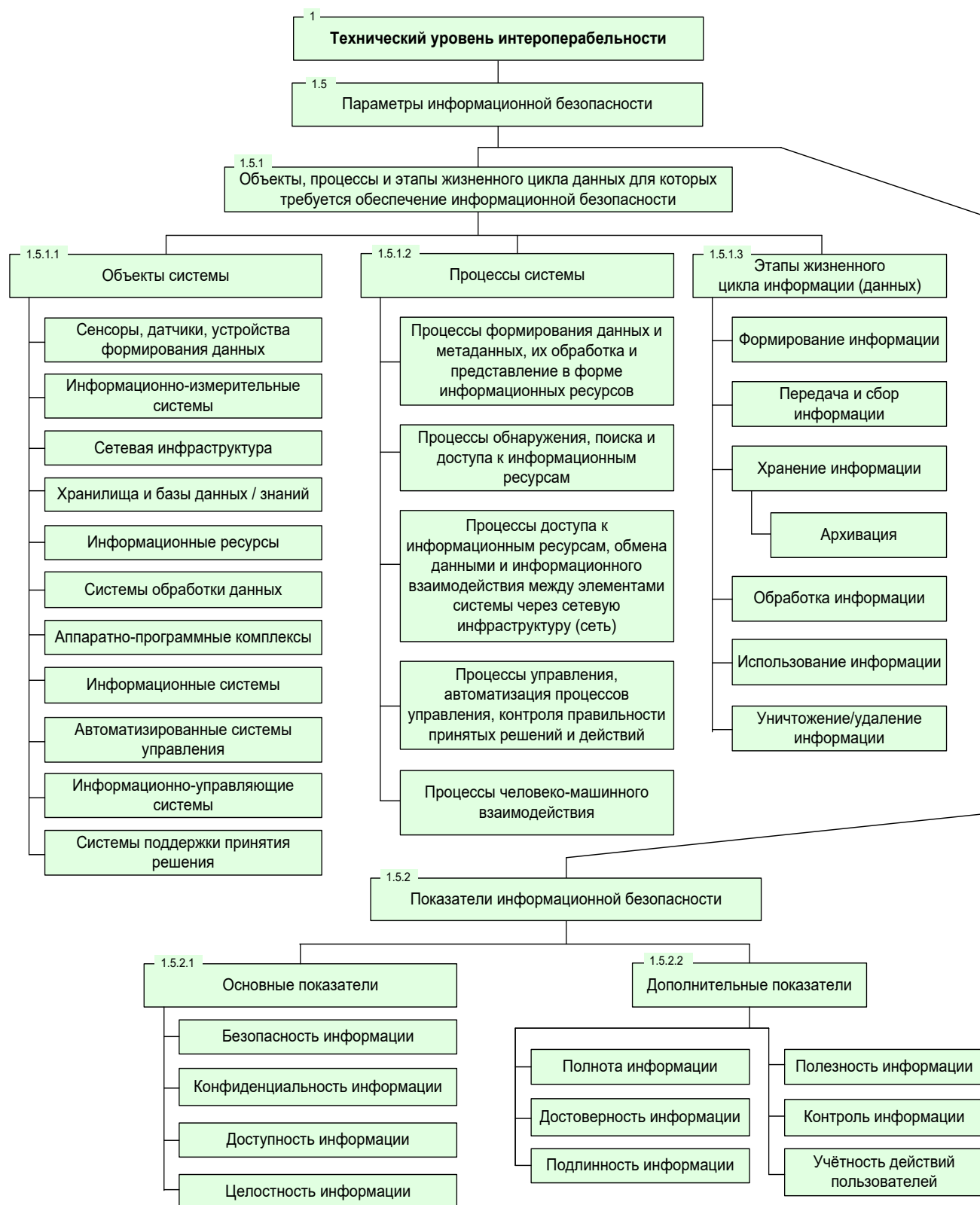


Рис. 3. Основные параметры информационной безопасности

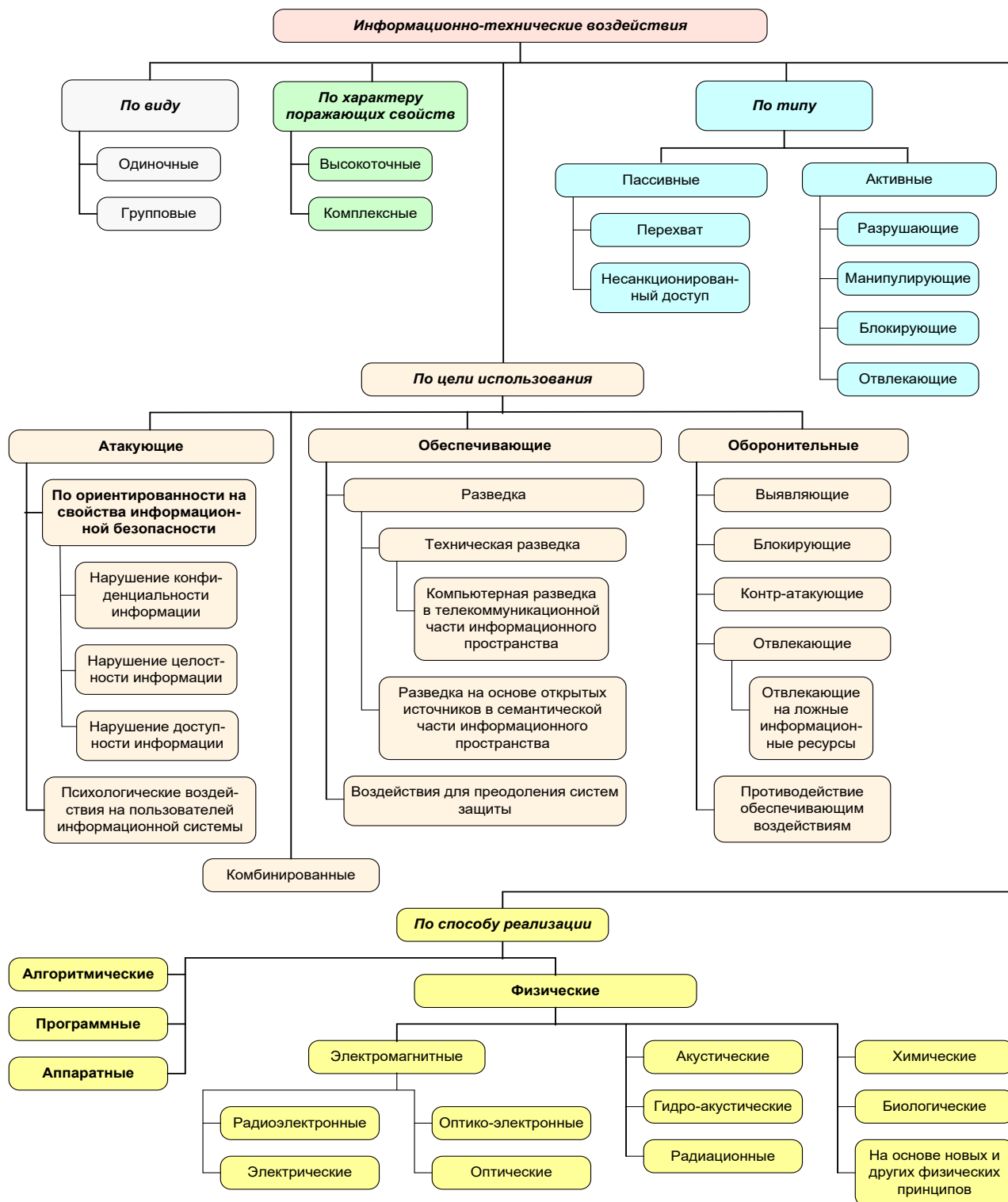


Рис. 4. Классификация информационно-технических воздействий [34]

Оценка рисков нарушения интероперабельности с учетом нарушения требований по информационной безопасности

Одним из ведущих специалистов, который ввел и стал, активно использовать понятие риска информационной безопасности является А.Г. Остапенко. В своих работах

[28, 29] данный автор увязывает понятие «ущерба», «шанса» и «риска» в контексте защищенности системы. Применим подход А.Г. Остапенко к оценке рисков нарушения интероперабельности.

Введем случайную переменную x ($x \in [u_{\max}, v_{\max}]$) которая может принимать для рассматриваемой системы как позитивный, так и негативный характер.

Польза, которая в контексте рассмотрения интероперабельности определяется показателем обеспечения интероперабельности между ее элементами, равна:

$$x = v,$$

а «ущерб» интероперабельности, который можно трактовать как возникновение некоторого барьера информационному объекту (ИО), в том числе и обусловленного наличием ИТВ, определяется показателем

$$x = u.$$

При этом величины v и u могут принимать различные значения в диапазонах $v \in [0, v_{\max}]$ и $u \in [0, u_{\max}]$, причем $v_{\max} \neq u_{\max}$.

Иллюстрация такой случайной величины приведена на рис. 5.

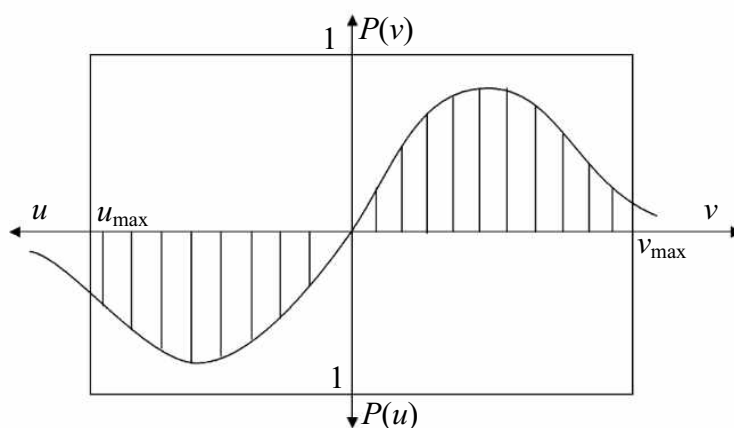


Рис. 5. Иллюстрация случайной величины «польза/ущерб»

Если принять допущение о том, что v и u являются дискретными величинами, то возможно в вероятностном смысле формализовать показатель «шанса обеспечения интероперабельности»:

$$C = v_i P_v(v_i),$$

где v_i – конкретное значение показателя интероперабельности, а $P_v(v_i)$ – вероятность того, что этот показатель интероперабельности примет значение v_i .

Вероятностный вид формализации показателя «риска наличия барьера интероперабельности» примет вид:

$$R = u_i \cdot P_u(u_i), \quad (1)$$

где u_i – конкретное значение показателя, характеризующего барьеры интероперабельности (так называемого «ущерба интероперабельности»), а $P_u(u_i)$ – вероятность того, что этот показатель примет значение u_i .

В случае если v и u является непрерывными величинами, а их вероятности имеют функции распределения F_v и F_u соответственно, то показатели «шанса обеспечения интероперабельности» и «риска ущерба интероперабельности» примут вид:

$$C(y) = \int_y^0 F_v(v) dv; \quad (2)$$

$$R(x) = \int_x^0 F_u(u) du. \quad (3)$$

Таким образом, пространство оценки параметра обеспечения интероперабельности в некоторой системе можно представить так, как это показано на рис. 6.

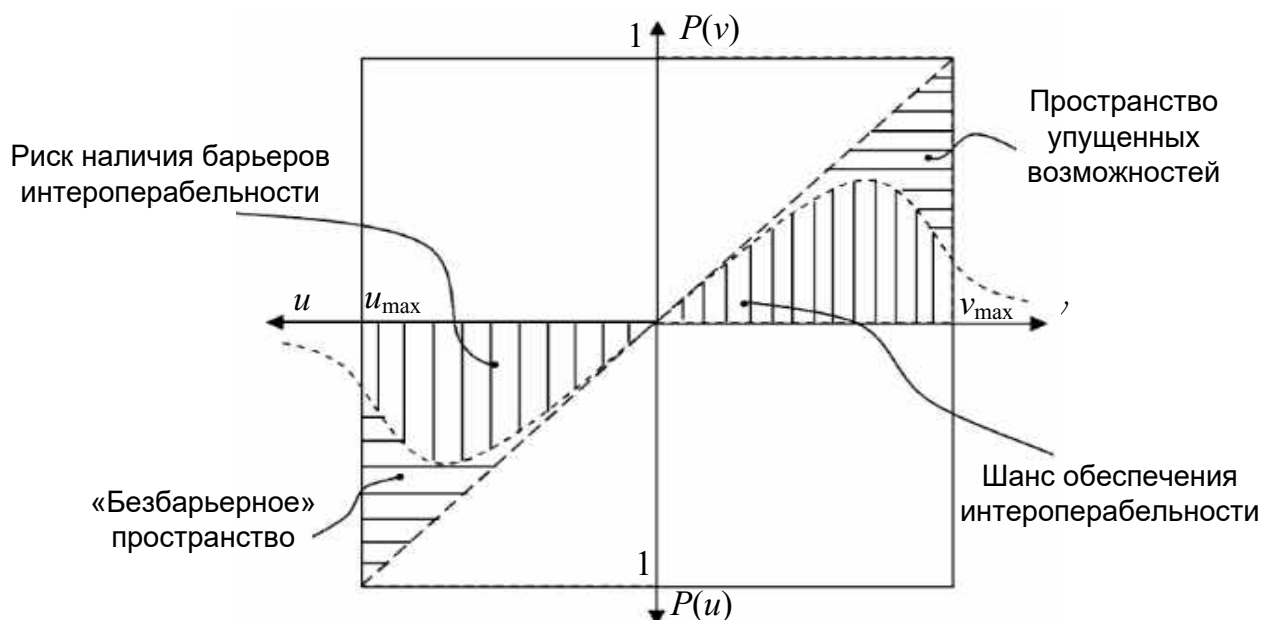


Рис. 6. Пространство оценки параметра обеспечения интероперабельности

Для оценки показателя ущерба интероперабельности в выражениях (1) – (3) необходимо знать вероятности $P_u(u_i)$ или функцию ее распределения F_u . Более того, сам показатель ущерба u в общем случае может иметь вероятностную природу.

В контексте оценки влияния рисков нарушения интероперабельности с учетом свойств информационной безопасности введем допущение о следующей физической интерпретации параметров u и $P_u(u_i)$:

- $P_u(u)$ – вероятность того, что относительно рассматриваемой системы (объекта, информационного направления взаимодействия) произошло нарушение требований информационной безопасности;
- u – абстрактный показатель, характеризующий возникновение барьера интероперабельности, выраженного в физическом или вероятностном эквиваленте «ущерба ИО», возникающего в системе в результате того, что требования ИБ были нарушены с вероятностью $P_u(u)$.

При такой интерпретации первичным показателем является вероятность нарушения требований информационной безопасности P_u . Именно от P_u зависит как оценка ущерба u , так и оценка риска наличия барьеров интероперабельности R . При этом при $P_u \rightarrow 0 \Rightarrow u \rightarrow 0$, а при $P_u \rightarrow 1 \Rightarrow u \rightarrow u_{\max}$ (рис. 7). Таким образом, для определения показателя барьера интероперабельности u и риска R требуется определить вероятность нарушения требований информационной безопасности P_u .

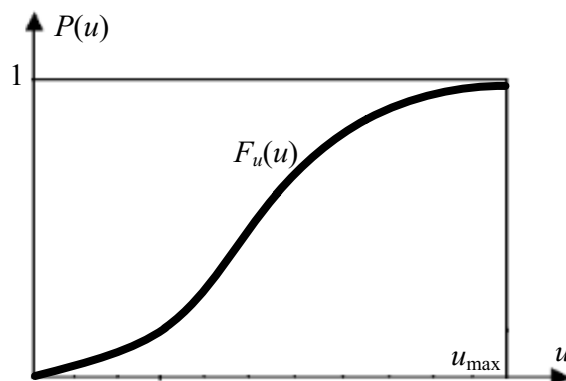


Рис. 7. Вероятность нарушения требований информационной безопасности P_u

Методика оценки вероятности нарушения требований информационной безопасности

Для развития и формализации параметров ИБ отечественной модели интероперабельности предлагается выделить три ключевых свойства:

- конфиденциальность,
- целостность,
- доступность.

Будем рассматривать свойство ИБ как систему, состоящую из трех последовательно включенных вышеуказанных свойств. В данной модели принимается, что недостижение заданного уровня обеспечения для хотя бы одного из трех свойств информационной безопасности приводит к пропорциональному снижению общего уровня защищенности системы.

Таким образом, простейшая модель информационной безопасности состоит из трех последовательно включенных составляющих и представлена на рис. 8:

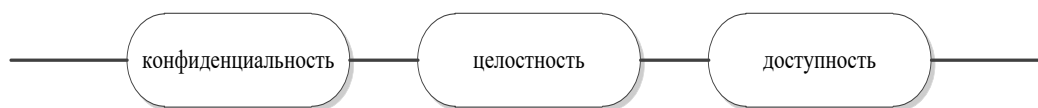


Рис. 8. Простейшая модель информационной безопасности

Количественную оценку перечисленных параметров в отечественной модели интероперабельности предлагается производить вероятностным методом, на основании методов теории надежности. Введем обозначения параметров для количественной оценки свойств ИБ в отечественной модели интероперабельности:

- P_u – вероятность того, что по отношению к информационному взаимодействию между системами произошло нарушение требований ИБ;
- $P_{ИБ}$ – вероятность обеспечения заданного уровня ИБ информационного взаимодействия;
- $P_{НК}$ – вероятность нарушения свойства конфиденциальности информационного взаимодействия;
- $P_{НЦ}$ – вероятность нарушения свойства целостности информационного взаимодействия;
- $P_{НД}$ – вероятность нарушения свойства доступности информационного взаимодействия.

Описание ИТВ на свойства ИБ приведено на рис. 9.



Рис. 9. Описание информационно-технических воздействий на параметры информационной безопасности

Исходя из этого, вычислить вероятность обеспечения требуемого уровня ИБ при информационном взаимодействии двух и более систем между собой можно следующим образом:

$$P_{ИБ} = (1 - P_{НК}) \cdot (1 - P_{НЦ}) \cdot (1 - P_{НД}),$$

тогда

$$P_{и} = 1 - P_{ИБ} = 1 - (1 - P_{НК}) \cdot (1 - P_{НЦ}) \cdot (1 - P_{НД}). \quad (5)$$

Как ранее было отмечено, возможны различные ИТВ как на взаимодействующие системы, так и на информационные взаимодействия между ними. Вероятности их успешной реализации можно описать следующим образом:

- $P_{НК}$ – вероятность нарушения свойства конфиденциальности информационного взаимодействия вследствие реализации M_K числа ИТВ на свойство конфиденциальности;
- $P_{НЦ}$ – вероятность нарушения свойства целостности информационного взаимодействия вследствие реализации $M_{Ц}$ числа ИТВ на свойство целостности;
- $P_{НД}$ – вероятность нарушения свойства доступности информационного взаимодействия вследствие реализации M_D числа ИТВ на свойство доступности.

Тогда вероятности нарушения свойств конфиденциальности, целостности и доступности информационного взаимодействия можно представить как:

$$\begin{aligned} P_{НК} &= 1 - \prod_{j=1}^{M_K} (1 - P_{НК_j}), \\ P_{НЦ} &= 1 - \prod_{j=1}^{M_{Ц}} (1 - P_{НЦ_j}), \\ P_{НД} &= 1 - \prod_{j=1}^{M_D} (1 - P_{НД_j}). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, вероятность сохранения требуемого уровня ИБ информационного взаимодействия:

$$P_{ИБ} = (1 - (1 - \prod_{j=1}^{M_k} (1 - P_{НК_j}))) \cdot (1 - (1 - \prod_{j=1}^{M_n} (1 - P_{НЦ_j}))) \cdot (1 - (1 - \prod_{j=1}^{M_d} (1 - P_{НД_j}))),$$

или

$$P_{ИБ} = \prod_{j=1}^{M_k} (1 - P_{НК_j}) \cdot \prod_{j=1}^{M_n} (1 - P_{НЦ_j}) \cdot \prod_{j=1}^{M_d} (1 - P_{НД_j}) \quad (7)$$

А вероятность того, что относительно рассматриваемого взаимодействия систем произошло нарушение требований ИБ:

$$P_u = 1 - P_{ИБ} = 1 - \prod_{j=1}^{M_k} (1 - P_{НК_j}) \cdot \prod_{j=1}^{M_n} (1 - P_{НЦ_j}) \cdot \prod_{j=1}^{M_d} (1 - P_{НД_j}) \quad (8)$$

Моделирование

Проведем моделирование и расчет вероятности обеспечения заданного уровня информационной безопасности информационного взаимодействия $P_{ИБ}$ в зависимости от вероятности нарушения свойства конфиденциальности $P_{НК}$ и вероятности нарушения свойства целостности $P_{НЦ}$, при фиксированных величинах вероятности нарушения свойства доступности $P_{НД}$. Графики зависимости $P_{ИБ}$ от $P_{НК}$ и $P_{НЦ}$ при $P_{НД} = 0,3$ и $P_{НД} = 0,5$ приведены на рис. 10.

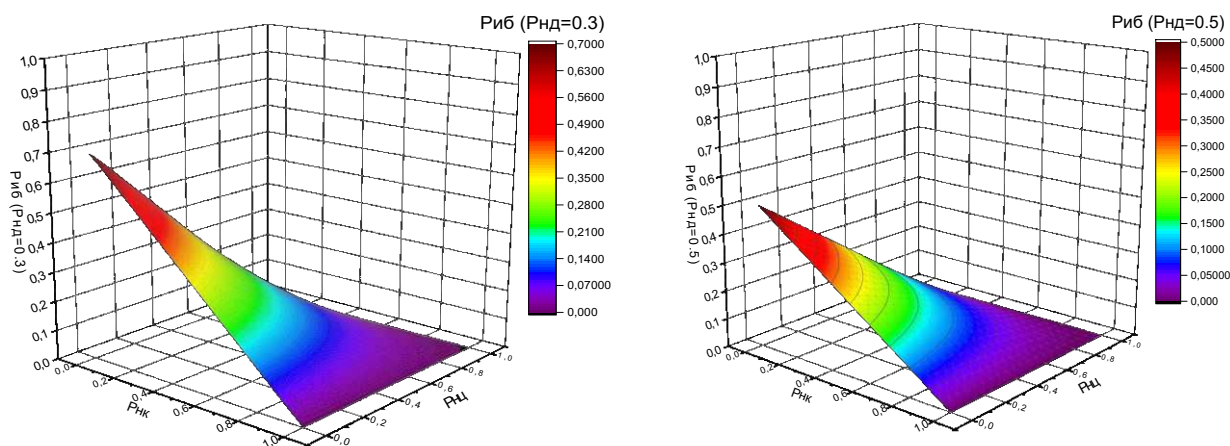


Рис. 10. Графики зависимости $P_{ИБ}$ от $P_{НК}$, $P_{НЦ}$ при различных значениях $P_{НД}$

Методические рекомендации по минимизации рисков нарушения интероперабельности ОТС с учетом требований по информационной безопасности

С учетом вышесказанного, проводя теоретическое обобщение проведенного анализа можно сформировать следующие методические рекомендации по минимизации рисков нарушения интероперабельности систем с учетом требований по информационной безопасности.

- 1) При взаимодействии систем необходимо минимизировать вероятность нарушения конфиденциальности. Это может достигаться внедрением в состав систем более криптоустойчивых средств шифрования, надежной шифровальной аппаратуры связи (ШАС), использованием методов стеганографии, использования системы электронной цифровой подписи (ЭЦП) для удостоверения подлинности пользователей, внедрением ролевой модели разграничения прав и обеспечения ИБ.

- 2) При взаимодействии систем необходимо минимизировать вероятность нарушения целостности. Это может достигаться внедрением в состав систем более имитоустойчивых протоколов передачи и обработки информации, способов помехоустойчивого кодирования информации, использование методов многократной передачи, использовании резервных информационных направлений для дублирования путей информационного взаимодействия.
- 3) При взаимодействии систем необходимо минимизировать вероятность нарушения доступности. Это может достигаться внедрением в состав систем сетевых экранов, предотвращающих ИТВ типа «сетевые атаки», системы обнаружения и предотвращения воздействий, созданием системы резервирования и аварийного восстановления информационных ресурсов, созданием подсистемы ложных информационных ресурсов, отвлекающих на себя злоумышленников.
- 4) Создаваемые подсистемы обеспечения требований информационной безопасности в различных системах должны быть интегрированы между собой и обеспечивать функционирование информационного обмена в условиях массированных совместных ИТВ.

Выводы

В работе представлена методика количественной оценки вероятности нарушения требований информационной безопасности при ИТВ на информационное взаимодействие систем. В сравнении с известными работами [30-33], посвященными формализации различных аспектов интероперабельности представленная в статье методика обладает следующими отличительными признаками научной новизны: в исследовании рассмотрен не технический уровень интероперабельности в целом, а его отдельный аспект – параметр информационной безопасности, а для его количественной оценки в работе использованы методы теории вероятности и теории надежности. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для количественной оценки других аспектов и параметров технической интероперабельности.

Литература

1. Гончаров Н. Г., Гулиев Я. И., Гуляев Ю. В., Кавинская Ю. М., Каменщиков А. А., Олейников А. Я., Хаткевич М. И. Вопросы создания единого информационного пространства в системе здравоохранения РАН // Информационные технологии и вычислительные системы. 2006. № 4. С. 83-95.
2. Анциперов В. Е., Каменщиков А. А., Кочуков А., Никитов Д. С., Олейников А. Я. Функциональная стандартизация при создании медицинских информационных систем // Врач и информационные технологии. 2006. № 4. С. 15-18.
3. Олейников А. Я., Разинкин Е. И. Профиль интероперабельности в области электронной коммерции // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 74-79.
4. Олейников А. Я., Меркулова А. В. К вопросу о построении интегрированной корпоративной информационной среды вуза // Журнал радиоэлектроники. 2005. № 5. С. 4. – URL: <http://jre.cplire.ru/iso/nov05/2/text.html> (дата обращения: 03.03.2023).
5. Батоврин В. К., Васютович В. В., Журавлев Е. Е., Олейников А. Я., Петров А. Б., Соколов С. А., Теряев Е. Д. Построение профиля информационных, вычислительных и телекоммуникационных ресурсов для обеспечения фундаментальных исследований // Журнал радиоэлектроники. 2001. № 11. С. 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/koi/dec01/8/text.html> (дата обращения: 03.03.2023).
6. Журавлев Е. Е., Иванов С. В., Каменщиков А. А., Олейников А. Я., Разинкин Е. И., Рубан К. А. Интероперабельность в облачных вычислениях // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 9. С. 14.
7. Олейников А. Я., Егоров Г. А., Журавлев Е. Е., Королев А. С., Кочуков А. Н., Широбокова Т. Д. Применение технологии открытых систем для создания интегрированных

информационных систем промышленных предприятий // Радиопромышленность. 2006. № 2. С. 90-107.

8. Башлыкова А. А., Каменщиков А. А., Олейников А. Я. О подходах к разработке профилей интероперабельности в военной области // Информационные технологии и вычислительные системы. 2017. № 4. С. 112-121.

9. Каменщиков А. А., Олейников А. Я., Чусов И. И., Широбокова Т. Д. Проблема интероперабельности в информационных системах военного назначения // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 16.

10. Башлыкова А. А., Каменщиков А. А., Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности как средства бесшовной интеграции функциональных подсистем в составе перспективных автоматизированных систем военного назначения // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 18.

11. Быстров Р. П., Корниенко В. Н., Олейников А. Я. Интероперабельность, информационное противоборство и радиоэлектронная борьба // Успехи современной радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 15-34.

12. Дроговоз В. А. Совершенствование оценки показателей интероперабельности сложных систем при помощи сценарного моделирования // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.). Том 5. – Воронеж: ВГУ, 2023. – С. 361-369.

13. Дроговоз В. А. Обеспечение интероперабельности электронного здравоохранения в условиях цифровой трансформации экономики России // Сборник трудов XII Международной научной конференции «ИТ-Стандарт 2023». – М.: Проспект, 2023. – С. 89-97.

14. Дроговоз В. А. Концептуальные аспекты обеспечения интероперабельности электронного здравоохранения в условиях цифровой трансформации экономики России // ИТ-стандарт. 2023. № 2. С. 51-61.

15. Олейников А. Я., Растягаев Д. В., Фомин И. А. Основные положения концепции обеспечения интероперабельности сетцентрических информационно-управляющих систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 3. С. 122–131. DOI: 10.25586/RNU.V9I87.20.03.P.122

16. Олейников А. Я. Актуальное состояние проблемы интероперабельности // ИТ-Стандарт. 2020. № 2(23). С. 37–42.

17. Козлов С. В. Процессные аспекты интероперабельности интегрированных систем управления // ИТ-Стандарт. 2019. № 1 (18). С. 25–30.

18. Башлыкова А. А., Зацаринный А. А., Каменщиков А. А., Козлов С. В., Олейников А. Я., Чусов И. И. Интероперабельность как научно-методическая и нормативная основа бесшовной интеграции информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28. № 4. С. 61–72. DOI:10.14357/08696527180407

19. Башлыкова А. А., Гаджикулиев Т. А., Олейников А. Я. Решение проблемы интероперабельности в проектах «умного города» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15. № 3. С. 767–774. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.767-774

20. Макаренко С. И. Интероперабельность человеко-машинных интерфейсов. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 185 с.

21. Макаренко С. И., Нестеров А. А. Структурно-функциональная модель интероперабельности организационно-технических систем // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 65-74. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74.

22. Нестеров А. А. Нормативно-правовая база для обеспечения интероперабельности организационно-технических систем // Сборник трудов XII Международной научной конференции «ИТ-Стандарт 2023». – М.: Проспект, 2023. – С. 113-120.

23. Макаренко С. И. Интероперабельность организационно-технических систем. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 313 с.

24. Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0. NCOIC, 2008. 154 p.

25. Черницкая Т. Е., Макаренко С. И., Растягаев Д. В. Аспекты информационной безопасности в рамках оценки интероперабельности сетцентрических информационно-управляющих систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 4. С. 113-121.

26. Макаренко С. И., Олейников А. Я., Черницкая Т. Е. Модели интероперабельности информационных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 215-245. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10408
27. Олейников А. Я. Проблема интероперабельности в платформе Industry 4.0. и смежных областях // IX Международная конференция «ИТ-Стандарт 2019», 2019.
28. Остапенко А. Г. Функция возможности в оценке рисков, шансов и эффективности систем // Информация и безопасность. 2010. Т. 13. № 1. С. 17-20.
29. Остапенко А. Г. Инновационные шансы и риски: эвентологическое развитие теории информации // Информация и безопасность. 2012. Т. 15. № 3. С. 313-320.
30. Батоврин В. К., Королев А. С. Способ количественной оценки интероперабельности // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 91-96.
31. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г., Дукельский К. В. Метод численной оценки технической интероперабельности // Кибернетика и программирование. 2017. № 3. С. 23-38.
32. Волков В. Ф., Хайдаров Р. Р., Пономарев А. С. Методика оценивания интероперабельности сложных систем с распределенными структурами на техническом уровне эталонной модели // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды XXV Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 04-07 апреля 2022 года. Том 3. – Москва: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2022. – С. 231-237.
33. Розенберг И. Н., Дулин С. К., Дулина Н. Г. Моделирование структуры интероперабельности средствами структурной согласованности // Информатика и ее применения. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 57-65.
34. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Научные технологии, 2017. – 546 с.

References

1. Goncharov N. G., Guliyev Y. I., Gulyayev Y. V., Kavinskaya Y. M., Kamenshchikov A. A., Oleynikov A. Y., Khatkevich M. I. *Voprosy sozdaniya yedinogo informatsionnogo prostranstva v sisteme zdavookhraneniya RAN* [Issues of creating a single information space in the healthcare system of the Russian Academy of Sciences]. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy*. 2006. No. 4. Pp. 83-95 (in Russian).
2. Antsiperov V. Y., Kamenshchikov A. A., Kochukov A., Nikitov D. S., Oleynikov A. Y. *Funktsional'naya standartizatsiya pri sozdanii meditsinskikh informatsionnykh sistem* [Functional standardization in the creation of medical information systems]. *Vrach i informatsionnyye tekhnologii*. 2006. No. 4. Pp. 15-18 (in Russian).
3. Oleynikov A. Y., Razinkin Y. I. *Profil' interoperabel'nosti v oblasti elektronnoy kommertsii* [Interoperability profile in the field of electronic commerce]. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy*. 2013. No. 4. Pp. 74-79 (in Russian).
4. Oleynikov A. Y., Merkulova A. V. *K voprosu o postroyenii integrirovannoy korporativnoy informatsionnoy sredy vuza* [On the issue of building an integrated corporate information environment for a university]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2005. No. 5. P. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/nov05/2/text.html> (accessed: 03.03.2023). (in Russian).
5. Batovrin V. K., Vasyutovich V. V., Zhuravlev Y. Y., Oleynikov A. Y., Petrov A. B., Sokolov S. A., Teryayev Y. D. *Postroyeniye profilya informatsionnykh, vychislitel'nykh i telekommunikatsionnykh resursov dlya obespecheniya fundamental'nykh issledovaniy* [Building a profile of information, computing and telecommunication resources to support fundamental research]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2001. No. 11. p. 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/koi/dec01/8/text.html> (accessed: 03.03.2023) (in Russian).
6. Zhuravlev Y. Y., Ivanov S. V., Kamenshchikov A. A., Oleynikov A. Y., Razinkin Y. I., Ruban K. A. *Interoperabel'nost' v oblachnykh vychisleniyakh* [Interoperability in cloud computing]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2013. No. 9. Pp. 14 (in Russian).
7. Oleynikov A. Y., Yegorov G. A., Zhuravlev Y. Y., Korolev A. S., Kochukov A. N., Shirobokova T. D. *Primeneniye tekhnologii otkrytykh sistem dlya sozdaniya integrirovannykh informatsionnykh sistem promyshlennykh predpriyatiy* [Application of open systems technology to create integrated information systems of industrial enterprises]. *Radiopromyshlennost'*. 2006. No. 2. Pp. 90-107 (in Russian).

8. Bashlykova A. A., Kamenshchikov A. A., Oleynikov A. Y. *O podkhodakh k razrabotke profiley interoperabel'nosti v voyennoy oblasti // Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy* [Approaches to the development of interoperability profiles in the military field]. 2017. No. 4. Pp. 112-121 (in Russian).
9. Kamenshchikov A. A., Oleynikov A. Y., Chusov I. I., Shirobokova T. D. *Problema interoperabel'nosti v informatsionnykh sistemakh voyennogo naznacheniya* [The problem of interoperability in military information systems]. Zhurnal radioelektroniki. 2016. No. 11. Pp. 16 (in Russian).
10. Bashlykova A. A., Kamenshchikov A. A., Oleynikov A. Y. *Obespecheniye interoperabel'nosti kak sredstva besshovnoy integratsii funktsional'nykh podsystem v sostave perspektivnykh avtomatizirovannykh sistem voyennogo naznacheniya* [Ensuring interoperability as a means of seamless integration of functional subsystems in promising automated military systems]. Zhurnal radioelektroniki. 2018. No. 9. Pp. 18 (in Russian).
11. Bystrov R. P., Korniyenko V. N., Oleynikov A. Y. *Interoperabel'nost', informatsionnoye protivoborstvo i radioelektronnaya bor'ba* [Interoperability, information warfare and electronic warfare]. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2018. No. 5. Pp. 15-34 (in Russian).
12. Drogozov V. A. *Sovershenstvovaniye otsenki pokazateley interoperabel'nosti slozhnykh sistem pri pomoshchi stsennarnogo modelirovaniya* [Improving the assessment of interoperability indicators of complex systems using scenario modeling]. Sbornik trudov XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'» (Voronezh, 18–20.04.2023). Vol. 5. Voronezh. VGU, 2023. Pp. 361-369 (in Russian).
13. Drogozov V. A. *Obespecheniye interoperabel'nosti elektronnoy zdavookhraneniya v usloviyakh tsifrovoy transformatsii ekonomiki Rossii* [Ensuring Interoperability of Electronic Healthcare in the Context of Digital Transformation of the Russian Economy]. Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «IT-Standart 2023». Moscow. Prospekt Publ., 2023. Pp. 89-97. (In Russian).
14. Drogozov V. A. *Kontseptual'nyye aspekty obespecheniya interoperabel'nosti elektronnoy zdavookhraneniya v usloviyakh tsifrovoy transformatsii ekonomiki Rossii* [Conceptual Aspects of Ensuring Interoperability of Electronic Healthcare in the Context of Digital Transformation of the Russian Economy]. IT-standart. 2023. No. 2. Pp. 51-61 (in Russian).
15. Oleynikov A. Y., Rastyagayev D. V., Fomin I. A. *Osnovnyye polozheniya kontseptsii obespecheniya interoperabel'nosti setentsentricheskikh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Basic Provisions of the Concept of Ensuring Interoperability of Network-Centric Information Management Systems]. Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnyye sistemy: modeli, analiz i upravleniye. 2020. No. 3. Pp. 122-131. DOI:10.25586/RNU.V9187.20.03 (in Russian).
16. Oleynikov A. Y. *Aktual'noye sostoyaniye problemy interoperabel'nosti* [Current state of the interoperability problem]. IT-Standart. 2020. No. 2(23). Pp. 37-42 (in Russian).
17. Kozlov S. V. *Protsessnyye aspekty interoperabel'nosti integrirovannykh sistem upravleniya* [Process aspects of interoperability of integrated management systems]. IT-Standart. 2019. No. 1 (18). Pp. 25-30 (in Russian).
18. Bashlykova A. A., Zatsarinnyy A. A., Kamenshchikov A. A., Kozlov S. V., Oleynikov A. Y., Chusov I.I. *Interoperabel'nost' kak nauchno-metodicheskaya i normativnaya osnova besshovnoy integratsii informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem* [Interoperability as a scientific, methodological and regulatory basis for seamless integration of information and telecommunication systems]. Sistemy i sredstva informatiki. 2018. Vol. 28. No. 4. Pp. 61-72. DOI: 10.14357/08696527180407 (in Russian).
19. Bashlykova A. A., Gadzhikuliyeve T. A., Oleynikov A. Y. *Resheniye problemy interoperabel'nosti v proyektakh «umnogo goroda»* [Solving the Problem of Interoperability in Smart City Projects]. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye. 2019. Vol. 15. No. 3. Pp. 767-774. DOI:10.25559/SITITO.15.201903.767-774 (in Russian).
20. Makarenko S. I. *Interoperabel'nost' cheloveko-mashinnykh interfeysov* [Interoperability of Human-Machine Interfaces]. Sankt-Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii, 2023. 185 p. (in Russian).
21. Makarenko S. I. *Strukturno-funktsional'naya model' interoperabel'nosti organizatsionno-tekhnicheskikh sistem* [Structural and functional model of interoperability of organizational and technical systems]. Proceedings of Telecommunication Universities. 2023. Vol. 9, № 4. Pp. 65-74. DOI 10.31854/1813-324X-2023-9-4-65-74 (in Russian).
22. Nesterov A. A. *Normativno-pravovaya baza dlya obespecheniya interoperabel'nosti organizatsionno-tekhnicheskikh sistem* [Regulatory framework for ensuring interoperability of organizational

and technical systems]. Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «IT-Standart 2023». Moscow. Prospekt Publ., 2023. Pp. 113-120 (in Russian).

23. Makarenko S. I. *Interoperabel'nost' organizatsionno-tehnicheskikh sistem* [Interoperability of organizational and technical systems]. Sankt-Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii, 2024. 313 p. (in Russian).

24. Systems, Capabilities, Operations, Programs, and Enterprises (SCOPE) Model for Interoperability Assessment. Version 1.0. NCOIC, 2008. 154 p.

25. Chernitskaya T. Y., Makarenko S. I., Rastyagayev D. V. *Aspekty informatsionnoy bezopasnosti v ramkakh otsenki interoperabel'nosti setetsentricheskikh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Aspects of information security in the framework of assessing the interoperability of network-centric information and control systems]. Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnyye sistemy: modeli, analiz i upravleniye. 2020. No. 4. Pp. 113-121 (in Russian).

26. Makarenko S. I., Oleynikov A. Y., Chernitskaya T. Y. *Modeli interoperabel'nosti informatsionnykh sistem* [Information systems interoperability models]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2019. No. 4. p. 215-245. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10408 (in Russian).

27. Oleynikov A. Y. *Problema interoperabel'nosti v platfome Industry 4.0 i smezhnykh oblastyakh*. [The problem of interoperability in the Industry 4.0 platform and related areas]. IX Mezhdunarodnaya konferentsiya "IT-Standart 2019", 2019 (in Russian).

28. Ostapenko A. G. *Funktsiya vozmozhnosti v otsenke riskov, shansov i effektivnosti sistem* [Function of possibility in assessing risks, chances and efficiency of systems]. Informatsiya i bezopasnost'. 2010. Vol. 13. No. 1. Pp. 17-20 (in Russian).

29. Ostapenko A. G. *Innovatsionnyye shansy i riski: eventologicheskoye razvitiye teorii informatsii* [Innovative chances and risks: eventological development of information theory]. Informatsiya i bezopasnost'. 2012. Vol. 15. No. 3. Pp. 313-320 (in Russian).

30. Batovrin V. K., Korolev A. S. *Sposob kolichestvennoy otsenki interoperabel'nosti*. [Method of quantitative assessment of interoperability]. Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy. 2009. No. 5. Pp. 91-96 (in Russian).

31. Grishentsev A. Yu., Korobeynikov A. G., Dukel'skiy K. V. *Metod chislennoy otsenki tekhnicheskoy interoperabel'nosti* [Method of numerical assessment of technical interoperability]. Kibernetika i programirovaniye. 2017. No. 3. Pp. 23-38 (in Russian).

32. Volkov V. F., Khaydarov R. P., Ponomarev A. S. *Metodika otsenivaniya interoperabel'nosti slozhnykh sistem s raspredelennymi strukturami na tekhnicheskoy urovne etalonnogo modeli*. [Methodology for assessing the interoperability of complex systems with distributed structures at the technical level of the reference model]. Aktual'nyye problemy zashchity i bezopasnosti: trudy XXV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 04–07 aprelya 2022 goda. T. 3. Moscow. Rossiyskaya akademiya raketnykh i artilleriyskikh nauk, 2022. Pp. 231-237 (in Russian).

33. Rozenberg I. N., Dulin S. K., Dulina N. G. *Modelirovaniye struktury interoperabel'nosti sredstvami strukturnoy soglasovannosti*. [Modeling the structure of interoperability by means of structural consistency]. Informatika i yeye primeneniya. 2023. T. 17. No. 1. Pp. 57-65 (in Russian).

34. Makarenko S. I. *Informatsionnoye protivoborstvo i radioelektronnaya bor'ba v setetsentricheskikh voynakh nachala XXI veka* [Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars of the early 21st century]. St. Petersburg. Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

Статья поступила 29 марта 2025 г.

Информация об авторах

Нестеров Алексей Альбертович – директор единого офиса научно-исследовательских работ. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: интероперабельность организационно-технических систем. Тел.: +7 921 935 15 31. E-mail: aanesterov@etu.ru

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: системы связи, радиотехнические системы, информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Черницкая Татьяна Евгеньевна – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: информационная безопасность, интероперабельность организационно-технических систем. E-mail: drukarsu@mail.ru
Адрес: 197022, Санкт-Петербург, город Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

Quantitative assessment of the probability of information violation security requirements in the organizational and technical systems interoperability model

A. A. Nesterov, S. I. Makarenko, T. E. Chernitskaya

Annotation. Problem statement: in modern conditions, when integrating organizational and technical systems (OTS), the relevance of ensuring interoperability in such systems increases. There is a need to improve the quality of interoperability at the technical level during the interaction of OTS, but today there is no sufficiently developed scientific and methodological apparatus for quantitative assessment of information security (IS) parameters during the interaction of OTS. **Purpose:** is to develop elements of the scientific and methodological apparatus for quantitative assessment of information security parameters and improving interoperability during the interaction of OTS. **Methods:** the paper considers the aspects and parameters that make up the content of the technical level of interoperability, analyzes studies related to the issues of technical interoperability of information systems in terms of IS parameters. A review of works on the topic of interoperability is conducted, a number of works performed in the field of IS parameters as one of the aspects of technical interoperability are considered. Quantitative assessment of interoperability parameters during the interaction of OTS in the work is carried out using a probabilistic method, based on reliability theory. **The result** of the work is that a methodology for assessing the probability of violation of information security requirements during information technology impacts on the systems under consideration is proposed. **Novelty:** consists in the fact that for the first time elements of a scientific and methodological apparatus for assessing the influence of information security parameters, as one of the aspects of the technical level of interoperability, on the interoperability of the OTS are proposed. **Practical relevance:** methodological recommendations are presented for minimizing the risks of interoperability violation taking into account information security requirements. It seems relevant to use elements of the proposed methodology in assessing the level of technical interoperability by other parameters, including by the parameters of service quality requirements.

Keywords: interoperability, technical level of interoperability, organizational and technical system, information security parameters.

Information about authors

Nesterov Aleksey Albertovich – Acting Director of the United Research Office. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Research interests: interoperability of organizational and technical systems. Tel. +7 921 935 15 31. E-mail: aanesterov@etu.ru

Makarenko Sergey Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Research interests: communication systems, radio engineering systems, information warfare. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Chernitskaya Tatiana Evgenyevna – Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: information security, interoperability of information systems. E-mail: drukarsu@mail.ru
Address: 197022, Saint Petersburg, Prof. Popov street, 5.

Для цитирования: Нестеров А. А. Макаренко С. И. Черницкая Т.Е. Количественная оценка вероятности нарушения требований информационной безопасности в модели интероперабельности организационно-технических систем // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С.9-25. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-9-25.

For citation: Nesterov A. A., Makarenko S. I. Chernitskaya T. E. Quantitative assessment of the probability of information violation security requirements in the organizational and technical systems interoperability model. Means of communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 9-25. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-9-25 (in Russian).

УДК 519.726

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-26-34

Логическая схема защищенного кодера на базе простых алгоритмов шифрования

Рыжиков А. Р.

Аннотация: В современных условиях оснащение систем передачи данных характеризуется большим количеством радиоэлектронных элементов для обеспечения навигации, радиосвязи, защиты от столкновений легкомоторных средств и т. д. В настоящее время любая подобная система передает критически важную информацию лишь с использованием слабых средств защиты информации. В некоторых случаях критическая информация в подобных системах передается в открытом виде, без использования средств защиты. В некоторых случаях используются массивные криптошлюзы, представляющие из себя отдельные модули, обеспечивающие достаточную криптостойкость информации при передаче по каналу связи, но требующие отдельной развязки на плате и потребляющие достаточно большие токи (200 мА и более). При отсутствии защиты передаваемых данных легко реализуется атака вида "Человек посередине", в результате чего критически важные данные могут быть искажены, либо использованы против клиента информационной системы. Вопросы безопасности в этом случае требуют нового подхода к кодированию при создании сессии между различными независимыми устройствами. **Целью работы** является построение системы на базе распространенных универсальных и много используемых алгоритмов, способных улучшить защиту передаваемой информации, не замедляя скорость передачи информации с конечного датчика и позволяющую реализовать необходимую защиту в рамках одного микроконтроллера. **Результат работы** заключается в построении логической схемы взаимодействия двух равнозначных клиентов при осуществлении операции кодирования и сравнение устойчивости результата кодирования к атаке линейного взлома. **Практическая значимость** работы заключается в том, что построенная логическая схема позволяет начать переход к физической принципиальной схеме для построения конечного устройства.

Ключевые слова: защищенное кодирование, кодер, линейный криптоанализ, человек посередине.

Введение

В ходе проектирования информационных систем для мобильных устройств и микроконтроллеров требуется установить оптимальное соотношение между вычислительной мощностью системы и её потреблением энергии. Рост числа активных модулей или применение высокопроизводительных компонентов приводит к увеличению энергозатрат, что в свою очередь снижает время автономной работы устройства. В то же время, передача критически важной информации через незащищённый канал связи значительно увеличивает риск успешного осуществления атаки типа «человек посередине».

Высокие стандарты в области защиты информации, а также физические ограничения, такие как автономность и скорость функционирования, требуют развития современных встраиваемых систем в нескольких ключевых направлениях. Одним из основных подходов является программная реализация модулей взаимодействия, основанных на логических структурах [1]. В таких системах компоненты могут быть реализованы как программно (с использованием одного микроконтроллера), так и аппаратно (через взаимодействие нескольких микроконтроллеров). Логические структуры повышают вычислительную эффективность за счет четкой организации обмена информацией. Для оптимального баланса между безопасностью и производительностью используются алгоритмы с минимальными требованиями к ресурсам. Это увеличивает скорость работы системы при сохранении уровня защиты. Повышение безопасности достигается за счет использования устаревших шифровальных алгоритмов, которые, несмотря на низкую стойкость, усложняют анализ данных и снижают вероятность несанкционированного доступа.

Для оценки устойчивости методов кодирования и шифрования необходим формальный анализ их криптографических характеристик. Одним из эффективных подходов является анализ линейных аппроксимаций, который играет ключевую роль в оценке стойкости шифров и защищенных кодов против атак. Среди наиболее распространенных методов анализа можно выделить линейный криптоанализ [2], исследующий вероятность линейных зависимостей между входными и выходными битами системы. При разработке систем передачи данных важно учитывать энергоэффективность и безопасность. Программные и аппаратные решения на основе логических структур повышают производительность, а оптимизированные алгоритмы шифрования снижают риски декодирования информации. Однако линейный анализ может выявить зависимости в кодах, делая их уязвимыми. Злоумышленник может перехватывать сигналы и анализировать коды, пытаясь найти соответствие между закодированными данными и исходным символом. Эффективность такого анализа зависит от объема данных, ресурсов и времени. Задача защиты заключается в создании кодов, которые невозможно или крайне сложно декодировать в приемлемые сроки. В данной работе предлагается способ усиления защищенности передаваемых данных методом кодирования и сравнивается временная устойчивость к взлому по сравнению с существующими системами.

Метод оценки возможности раскодирования шифротекста за допустимое время

В криптографическом анализе важно оценивать вероятность успешного взлома шифротекста в разумные сроки. Одним из способов такой оценки является анализ временной сложности атак, основанных на линейных зависимостях. Рассмотрим случай, когда входные текстовые данные представляют собой n -битное слово X , а выходные данные – m -битное слово Y . В таком случае линейная аппроксимация выражается следующим уравнением [3]:

$$\bigoplus_{i \in I_{in}} x_i \oplus \bigoplus_{j \in I_{out}} y_j = 0, \quad (1)$$

где I_{in} и I_{out} — множества индексов входных и выходных битов соответственно, а $\oplus$ обозначает побитовую операцию сложения по модулю два (XOR). Вероятность выполнения данного уравнения [4, 5]:

$$P_{in,out} = \Pr \left[\bigoplus_{i \in I_{in}} X_i = \bigoplus_{j \in I_{out}} Y_j \right]. \quad (2)$$

Ключевой характеристикой линейной аппроксимации является вероятность выполнения уравнения (2), которая выражается уравнением (3) [3]

$$P_{in,out} = \Pr \left[\bigoplus_{i \in I_{in}} X_i = \bigoplus_{j \in I_{out}} Y_j = 0 \right]. \quad (3)$$

При случайном распределении битов вероятность выполнения данного уравнения стремится к 0,5. Однако в реальных системах криптографических преобразований могут существовать отклонения от этого значения, что может указывать на предсказуемость отдельных битов выхода относительно битов входа [3, 6]. Отклонение от равномерного распределения определяется [5] с помощью уравнения (4):

$$t_{in,out} = P_{in,out} - 0,5. \quad (4)$$

Если $t_{in,out}$ значительно отличается от нуля, это свидетельствует о наличии корреляции между входными и выходными битами, что может быть использовано для атаки на систему. Напротив, если значение $t_{in,out}$ мало, то система обладает высокой устойчивостью к линейному анализу.

Для анализа линейной устойчивости системы требуется построение системы алгоритма кодирования и сравнение его результатов. Конечная логическая схема кодера представлена на рис. 1.

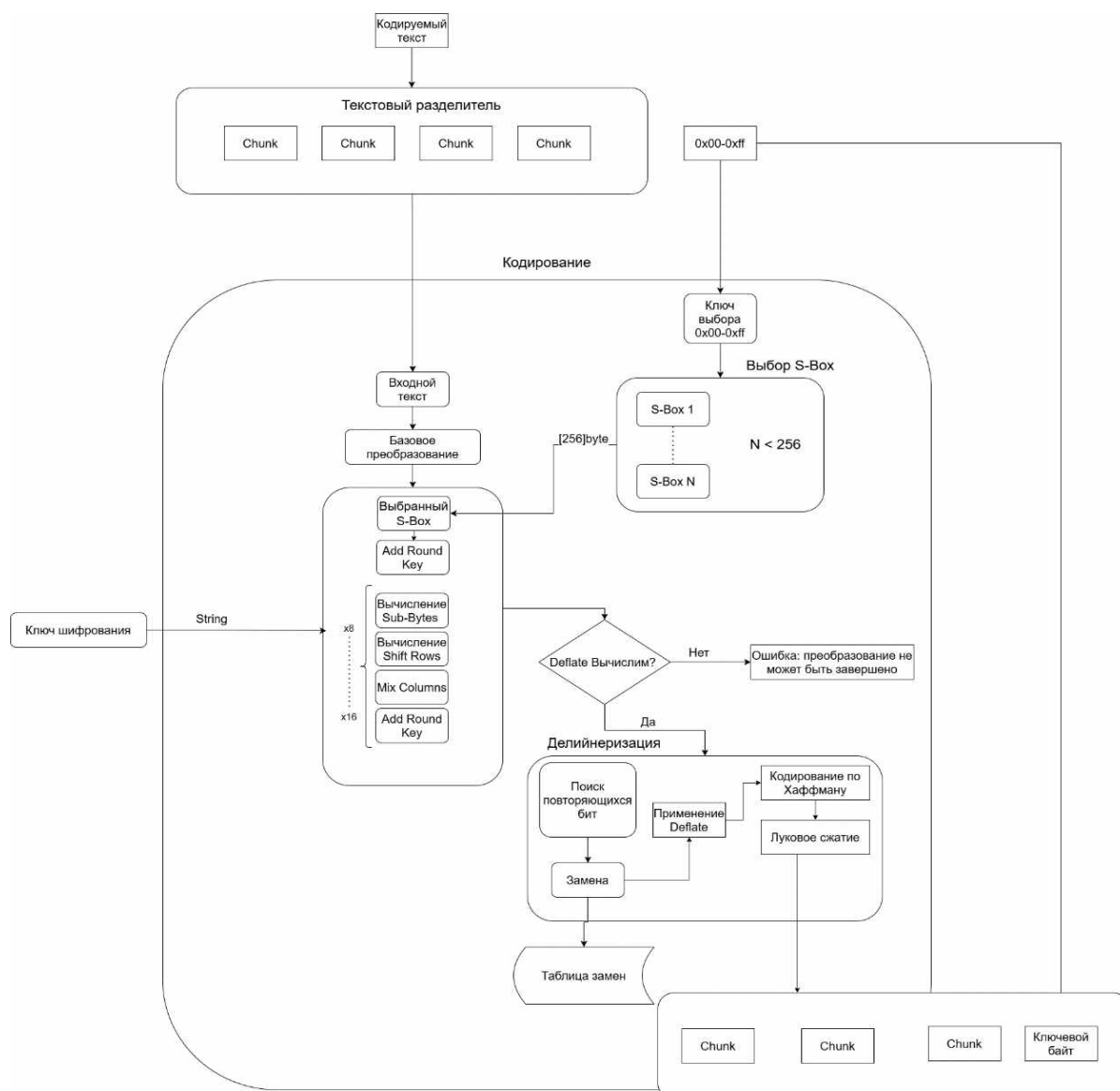


Рис. 1. Логическая схема кодера

Аргументы в пользу выбора модели и использованных алгоритмов

Как видно из рис. 2, при равномерном распределении входных данных вероятность угадывания символов одинакова. Однако *LZ*-преобразование, заменяющее повторяющиеся фрагменты, увеличивает частоту некоторых последовательностей в выходных данных, что повышает вероятность их угадывания, особенно для 11-го символа *ASCII*. Функция *Deflate* выполняет обратное преобразование блоками по 16 бит, но из-за особенностей закодированного представления символов 48 и 49 их обработка становится менее эффективной. При выборе модели и алгоритмов для криптографической системы важно учитывать безопасность, эффективность и совместимость с встроенными системами. Настройка *S-Box* минимизирует уязвимость к дифференциальным и линейным атакам [7, 8]. Многоуровневые методы защиты, такие как *deflate* и кодирование по Хаффману, создают дополнительные барьеры безопасности [5]. Модульная структура системы повышает устойчивость к атакам на основе анализа различий в выходной информации [9]. Алгоритм *AES* является высокопроизводительным стандартом блочного шифрования, подходящим для устройств с ограниченными ресурсами [9]. Операция *deflate* сокращает объем данных и снижает нагрузку на каналы связи, что важно для систем с ограниченной

пропускной способностью [10]. Гибкость этой системы обеспечивается возможностью конфигурирования *S-Box* и использования различных методов сжатия. Это позволяет адаптировать криптографическую защиту к конкретным требованиям, что имеет особое значение в многоуровневых и распределенных системах. Использование метода Хаффмана для сжатия данных перед их шифрованием повышает универсальность системы и ее совместимость с различными типами поступающей информации.

Защита от возможных атак обеспечивается за счет сложной модульной структуры системы. Многоэтапный характер преобразования данных, включая сжатие, шифрование и расшифровку текста, значительно усложняет любую попытку взлома, даже если один из этапов будет скомпрометирован. Использование *AES* с тщательно подобранным *S-Box* и дополнительными методами преобразования данных обеспечивает полуустойчивость системы к атакам дифференциального криптоанализа [9].

Современные стандарты совместимости достигаются за счет использования *AES*, который является международно признанным стандартом шифрования [11]. Алгоритмы сжатия и кодирования данных, такие как кодирование Хаффмана, соответствуют международным стандартам и широко используются для сокращения объема данных, что имеет решающее значение для эффективной передачи информации в современных сетях [12]. Энергоэффективность системы достигается за счет использования алгоритмов *AES* и методов сжатия, что снижает энергопотребление и продлевает срок службы устройств с ограниченными ресурсами. Важным аспектом криптографического анализа является оценка устойчивости шифров через вероятности линейных аппроксимаций. Вероятности были рассчитаны после каждого этапа шифрования, используя первые 25 абзацев текста "*Lorem Ipsum*". Результаты на рис. 2 показывают: оранжевый цвет — вероятность угадывания символа при шифровании *AES*, синий — после замены повторяющихся символов, серый — после применения *deflate*-преобразования. Это демонстрирует влияние различных преобразований на уязвимость к атакам линейной аппроксимации

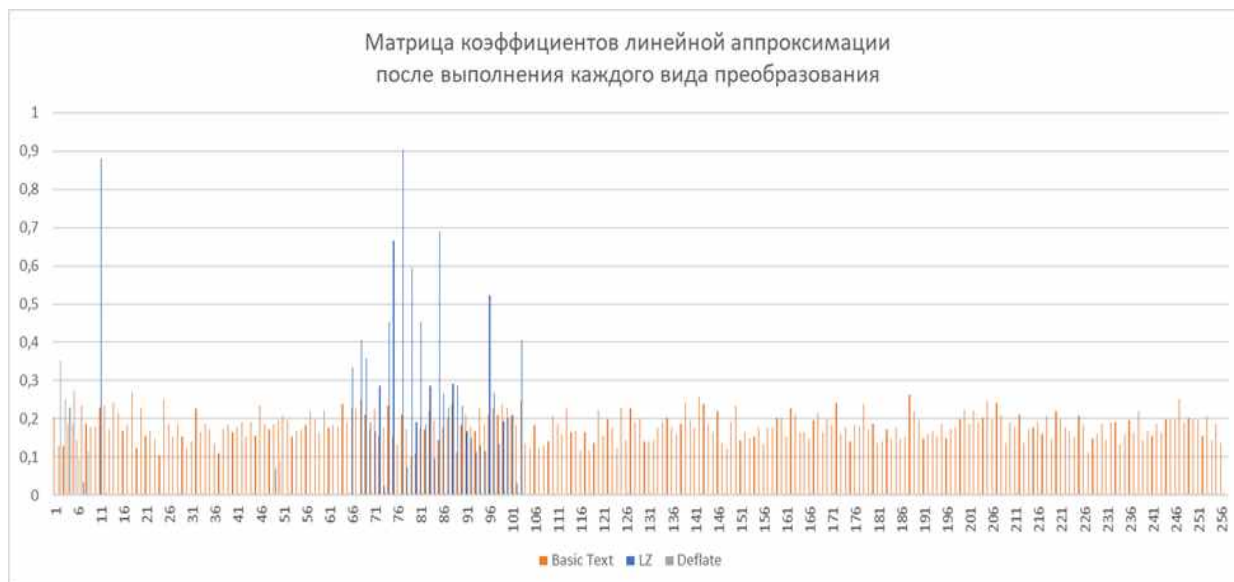


Рис. 2. Посимвольное распределение вероятностей элементов *ASCII*

Как видно из рис. 2, при равномерном распределении входных данных вероятность угадывания символов одинакова. Однако *LZ*-преобразование, заменяющее повторяющиеся фрагменты, увеличивает частоту некоторых последовательностей в выходных данных, что повышает вероятность их угадывания, особенно для 11-го символа *ASCII*. Функция *Deflate* выполняет обратное преобразование блоками по 16 бит, но из-за особенностей закодированного представления символов 48 и 49 их обработка становится менее эффективной.

Анализ времени взлома для получившейся модели на базе алгоритма AES-128

В криптографическом анализе важно оценивать вероятность успешного взлома шифротекста в разумные сроки. Для этого рассчитывается количество необходимых пар (X, Y) и время, затрачиваемое на сбор данных и их анализ. Для расчета времени взлома используем следующие формулы [2], с учетом сложность каждого этапа системы:

$$1) \text{ Количество необходимых пар: } N \approx \frac{1}{T_{in,out}^2};$$

$$2) \text{ Время сбора данных: } T_{data} = \frac{N \cdot L}{R},$$

где L — длина блока данных, R — скорость передачи данных;

$$3) \text{ Время анализа данных: } T_{analysis_total} = N \cdot T_{analysis},$$

где $T_{analysis}$ — время анализа одной пары;

$$4) \text{ Общее время взлома: } T_{total} = T_{data} + T_{analysis_total} + T_{Deflate},$$

где $T_{Deflate}$ — время, затраченное на разбор сложности алгоритма;

$$5) \text{ AES-128: Сложность } 2^8 = 256;$$

6) LZ-преобразование: сложность $2^{2\log(n)}$, где n — длина строки. В данном примере использовались, первые пять абзацев текста *Lorem Ipsum* с общей длиной текстовой строки $n = 15037$. Сложность составляет:

$$2^{2\log(15037)} = 2^{2 \cdot \log_{10}(15037)/\log_{10}(2)} = 2^{2 \cdot 13.88} = 2^{27.76} \approx 2.49 \cdot 10^8;$$

7) Deflate: Сложность 2^{8n} , где n — длина строки. Для $n = 15037$ выражение представляет $2^{8 \times 15037} = 2^{120296}$;

8) Кодирование Хаффмана: Сложность $O(n \log(n))$, где n — длина строки для $n = 15037$:

$$O(15037 \cdot \log(15037)) = O(15037 \cdot 13.88) = O(208700);$$

9) Количество таблиц замен: $2^8 = 256$ возможных комбинаций.

Общая сложность системы складывается из сложностей всех этапов. Учитывая независимость этапов, их сложности перемножаются:

$$T_{complexity} = 2^8 * 2^2 \log(n) * 2^8 n * O(n \log n).$$

$$\text{Упростим выражение: } T_{complexity} = 2^{(8+2 \cdot \log(n)+8 \cdot n)} * O(n \cdot \log(n)).$$

$$\text{Общая сложность при } n = 15037: O(15037 \cdot \log(15037)) = O(208700).$$

Случай 1: только AES

$$1) \text{ Количество необходимых пар: } N^{AES} = \frac{1}{T_{in,out}^{AES^2}} = \frac{1}{0.1813^2} \approx 30.5;$$

$$2) \text{ Время сбора данных: } T_{data}^{AES} = \frac{N^{AES} \cdot L}{R} = \frac{30.5 \cdot 4096}{2 \cdot 10^6} \approx 0.0625 \text{ с};$$

$$3) \text{ Время анализа данных: } T_{analysis_total}^{AES} = N^{AES} \cdot T_{analysis} = 30.5 \cdot 6.7 \cdot 10^{-8} \approx 2.04 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$4) \text{ Общее время взлома: } T_{total}^{AES} = T_{data}^{AES} + T_{analysis_total}^{AES} \approx 0.0625 + 2.04 \cdot 10^{-6} \approx 0.0625 \text{ с}.$$

Случай 2: AES + замена бит

$$1) \text{ Количество необходимых пар: } N^{AES+замена} = \frac{1}{T_{in,out}^{AES+замена^2}} = \frac{1}{0.04^2} = 625;$$

$$2) \text{ Время сбора данных: } T_{data}^{AES+замена} = \frac{N^{AES+замена} \cdot L}{R} = \frac{625 \cdot 4096}{2 \cdot 10^6} \approx 1.28 \text{ с};$$

3) Время анализа данных:

$$T_{analysis_total}^{AES+замена} = N^{AES+замена} \cdot T_{analysis} = 625 \cdot 6.7 \cdot 10^{-8} \approx 4.19 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

4) Общее время взлома:

$$T_{total}^{AES+замена} = T_{data}^{AES+замена} + T_{analysis_total}^{AES+замена} \approx 1.28 + 4.19 \cdot 10^{-5} \approx 1.28 \text{ с.}$$

Случай 3: AES + замена бит + Deflate

1) Количество необходимых пар:

$$N^{AES+замена+Deflate} = \frac{1}{T_{in,out}^{AES+замена+Deflate}^2} = \frac{1}{0.0106^2} \approx 8867$$

2) Время сбора данных:

$$T_{data}^{AES+замена+Deflate} = \frac{N^{AES+замена+Deflate} \cdot L}{R} = \frac{8867 \cdot 4096}{2 \cdot 10^6} \approx 18.13 \text{ с};$$

3) Время анализа данных:

$$T_{analysis_total}^{AES+Deflate} = N^{AES+Deflate} \cdot T_{analysis} = 8867 \cdot 6.7 \cdot 10^{-8} \approx 0.000594 \text{ с};$$

4) Общее время взлома:

$$T_{total}^{AES+замена+Deflate} = T_{data}^{AES+замена+Deflate} + T_{analysis_total}^{AES+замена+Deflate} \approx 18.13 + 0.000594 \approx 18.13 \text{ с.}$$

Примечание: Добавление Deflate увеличивает сложность до 2^{120296} , что делает взлом практически невозможным, поскольку $T_{total}^{AES+Deflate} + T_{Deflate} - > \infty$.

Случай 4: AES + замена бит + Deflate + Хаффман

1) Количество необходимых пар:

$$N^{AES+Deflate+Huffman} = \frac{1}{T_{in,out}^{AES+Deflate+Huffman}^2} = \frac{1}{0.00807^2} \approx 15385$$

2)Время сбора данных:

$$T_{data}^{AES+Deflate+Huffman} = \frac{N^{AES+Deflate+Huffman} \cdot L}{R} = \frac{15385 \cdot 4096}{2 \cdot 10^6} \approx 31.54 \text{ с};$$

3)Время анализа данных:

$$T_{analysis_total}^{AES+Deflate+Huffman} = N^{AES+Deflate+Huffman} \cdot T_{analysis} = 15385 \cdot 6.7 \cdot 10^{-8} \approx 0.00103 \text{ с};$$

4)Общее время взлома:

$$T_{total}^{AES+Deflate+Huffman} = T_{data}^{AES+Deflate+Huffman} + T_{analysis_total}^{AES+Deflate+Huffman} \approx 31.54 + 0.00103 \approx 31.54 \text{ с.}$$

Примечание: Общая сложность системы с Deflate достигает 2^{120296} , что делает линейный взлом практически невозможным, поскольку $T_{total}^{AES+Deflate+Huffman} + T_{Deflate} - > \infty$ с учетом невысокой вычислительной сложности кодирования данного алгоритма.

Результаты расчета

Результаты расчета времени взлома для различных случаев представлены в таблице:

Таблица 1 — Результаты расчета времени взлома для различных моделей

Модель	$T_{in,out}$	N	T_{data} (с)	T_{total} (с)
<i>AES</i>	0.1813	30.5	0.0625	0.0625
<i>AES</i> + замена бит	0.04	625	1.28	1.28
<i>AES</i> + замена бит + Deflate	0.0106	8867	$\approx \infty$	$\approx \infty$
<i>AES</i> + замена бит + Deflate + Хаффман	0.00807	15385	$\approx \infty$	$\approx \infty$

Вывод

Анализ результатов показывает, что добавление каждого дополнительного этапа преобразования (сжатие *LZ*, *Deflate*, кодирование Хаффмана) существенно увеличивает временную сложность взлома шифротекста. Это связано с тем, что каждый последующий этап вносит дополнительные нелинейные преобразования, которые усложняют структуру данных для потенциального злоумышленника.

- 1) Для базового *AES* время взлома составляет всего 0,0625 секунды.
- 2) Для *AES* с заменой бит время увеличивается до 1,28 секунд.
- 3) Для *AES* с заменой бит и *Deflate* время возрастает до ∞ .
- 4) Для полной модели (*AES* + замена бит + *Deflate* + Хаффман) время взлома достигает ∞ .

Таким образом, каждое последующее преобразование приводит к значительному росту временной сложности атаки, что подтверждает эффективность предложенного подхода. Кроме того, использование 256 возможных таблиц замен значительно повышает энтропию системы и делает её более устойчивой к различным типам атак. Данное решение обеспечивает высокий уровень защиты данных за счет комбинированного применения методов шифрования и сжатия. Стоит отметить, что расчетное время соединения в данной системе составляет 30 мс, а при использовании длинных строк сообщения при $n > 100$ — текст становится невозможным к декодированию. Построенная логическая схема успешно модифицирует шифротекст нелинейными преобразованиями, усложняя криптоанализ.

К преимуществам системы можно отнести простоту используемых алгоритмов, эффективность *deflate*-преобразования, модульную структуру и высокую степень защиты данных при передаче. Однако существуют ограничения: необходимость использования микропроцессорной техники, ограничение длины текста из-за алгоритма Хаффмана, различная степень защищенности одного *S-Box* для разных человеческих языков и невозможность компенсации символов 48 и 49 *ASCII*. Система показывает высокую надежность, но требует дальнейшей оптимизации для устранения ограничений.

Литература

1. Федченко В. А. О линейном и разностном криптоанализе AES-подобных алгоритмов шифрования // Математические вопросы криптографии. 2020. Т. 11, № 3. С. 101-120. DOI: 10.4213/mvk334. – URL: <https://doi.org/10.4213/mvk334>. (дата обращения: 11.02.2025).
2. Matsui M. Linear Cryptanalysis Method for DES Cipher // Advances in Cryptology — EUROCRYPT'93. Т. 765. Springer, 1993. С. 386-397. (Lecture Notes in Computer Science). – DOI:10.1007/3-540-48285-7_33. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-48285-7_33.
3. Щербаченко А. А. Подход к оценке стойкости блочных шифров к линейному криптоанализу с использованием квантовых алгоритмов // Материалы конференции РусКрипто'2023. 2023. – URL: https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2023/files/02_sherbachenko.pdf (дата обращения: 11.02.2025).
4. Biham E., Shamir A. Differential Cryptanalysis of the Data Encryption Standard. Springer, 1993. DOI:10.1007/978-1-4615-2694-0. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-2694-0> (дата обращения: 11.02.2025).
5. Кугураков В. С., Кирпичников А. П., Сушевский Д. Г. Особенности численной реализации алгоритмов поточного и блочного шифрования // Информационная безопасность. 2015. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-chislennoy-realizatsii-algoritmov-potochnogo-i-blochnogoshifrovaniya/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).
6. Shamir A. On the Security of DES // Advances in Cryptology – CRYPTO'85. Т. 218. Springer, 1985. С. 280-281. (Lecture Notes in Computer Science). DOI: 10.1007/3-540-39799-X_21. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-39799-X_21. (дата обращения: 11.02.2025).
7. Разработка гибридной схемы шифрования на основе ECC и AES / В. Чжэн, Л. Цзяси [и др.] // КиберЛенинка. 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-gibridnoy-shemy-shifrovaniya-na-osnove-ecc-i-aes/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).

8. Манылов Е. А. Шифр NSUPresent: устойчивость к линейному и дифференциальному криптоанализу // Кибернетика и программирование. 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shifr-nsupresent-ustoychivostk-lineynomu-i-differentsialnomu-kriptoanalizam/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).
9. Анализ уязвимостей беспроводных каналов передачи информации / К. Н. Канатъев [и др.] // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-uyazvimostey-besprovodnyh-kanalov-peredachi-informatsii/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).
10. Иванов А. Б., Петров В. С. Применение нечеткой логики при проектировании локальных сетей с криптографической защитой информации // Информационные технологии и системы безопасности. 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nechetkoy-logiki-pri-proektirovaniilokalnyh-setey-s-kriptograficheskoy-zaschitoy-informatsii/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).
11. National Institute of Standards and Technology. Advanced Encryption Standard (AES). FIPS Publication / NIST. 2001. № 197. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf> (дата обращения: 11.02.2025).
12. Иванов Б., Петров В. С. Применение нечеткой логики при проектировании локальных сетей с криптографической защитой информации // Информационные технологии и системы безопасности. 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nechetkoy-logiki-pri-proektirovaniilokalnyh-setey-s-kriptograficheskoy-zaschitoy-informatsii/viewer> (дата обращения: 11.02.2025).

Reference

1. Fedchenko V. A. *O linejnom i raznostnom kriptoanalize AESpodobnykh algoritmov shifrovaniya* [On linear and differential cryptanalysis of AES-like encryption algorithms]. *Mathematical Issues of Cryptography*, 2020. No. 11 (3). Pp. 101-120. DOI: 10.4213/mvk334 (in Russian).
2. Matsui M. Linear Cryptanalysis Method for DES Cipher. *Advances in Cryptology — EUROCRYPT'93*, vol. 765, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 1993, pp. 386-397. DOI: 10.1007/3540482857_33.
3. Shcherbachenko A. A. *Podkhod k otsenke stojkosti blochnykh shifrov k linejnomu kriptoanalizu s ispol'zovaniem kvantovykh algoritmov (slajd 3)* [An approach to assessing the resistance of block ciphers to linear cryptanalysis using quantum algorithms (slide 3)]. *Proceedings of the RusCrypto'2023 Conference*. 2023 (in Russian).
4. Biham E., Shamir A. *Differential Cryptanalysis of the Data Encryption Standard*. Springer. 1993. DOI: 10.1007/9781461526940.
5. Kugurakov V. S., Kirpichnikov A. P., Sushevsky D. G. *Osobennosti chislennoy realizacii algoritmov potochnogo i blochnogo shifrovaniya* [Features of numerical implementation of stream and block cipher algorithms]. *Information Security*. 2015 (in Russian).
6. Shamir A. On the Security of DES. *Advances in Cryptology — CRYPTO'85*, vol. 218, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 1985, pp. 280-281. DOI: 10.1007/354039799X_21.
7. Zheng W., Jiaxi L., Li [et al.] *Razrabotka gibridnoj skhemy shifrovaniya na osnove ECC i AES* [Development of a hybrid encryption scheme based on ECC and AES]. *CyberLeninka Scientific Journal*. 2023 (in Russian).
8. Manylov E. A. *Shifr NSUPresent: ustoichivost' k linejnomu i differencial'nomu kriptoanalizam* [The NSUPresent cipher: resistance to linear and differential cryptanalysis]. *Cybernetics and Programming*. 2023 (in Russian).
9. Kanatyev K. N. et al. *Analiz uiazvimostej besprovodnykh kanalov peredachi informacii* [Analysis of vulnerabilities of wireless communication channels]. *Information Technology and Telecommunications*. 2022 (in Russian).
10. Ivanov B., Petrov V. S. *Primenenie nechetkoj logiki pri projektirovanii lokal'nykh setej s kriptograficheskoy zashchitoj informacii* [Application of fuzzy logic in the design of local networks with cryptographic information protection]. *Information Technologies and Security Systems*. 2018 (in Russian).
11. National Institute of Standards and Technology (NIST). *Advanced Encryption Standard (AES)*. FIPS Publication 197. 2001.

12.Ivanov A. B., Petrov V. S. *Primenenie nechetkoj logiki pri proektirovanii lokal'nykh setej s kriptograficheskoy zashchitoj informacii* [Application of fuzzy logic in the design of local networks with cryptographic information protection]. *Information Technologies and Security Systems*. 2023 (in Russian).

Статья поступила 17 марта 2025 г.

Информация об авторе

Рыжиков Алексей Романович – Аспирант Ярославльского государственного университета им. П.Г. Демидова. Область научных интересов: технические методы обеспечения безопасности в каналах передачи информации, Security Engineering. Программно-аппаратные комплексы сетевого взаимодействия. Тел.: +7 910 664 59 96, E-mail: allesharr@gmail.com.

Адрес: 150003, Россия, г. Ярославль, ул. Советская д. 14.

Logic diagram of a secure encoder based on simple encryption algorithms

A. R. Ryzhikov

Annotation. *In modern conditions, the equipment of data transmission systems is characterized by a large number of radio-electronic components used for navigation, radio communication, collision avoidance for light-engine vehicles, etc. Currently, any such system transmits critically important information using only weak dataprotection mechanisms. In some cases, critical information in these systems is transmitted in plain text without anyprotection measures. In other cases, bulky crypto-modules are used, which are separate units ensuring sufficientcryptographic strength during data transmission over a communication channel but require additional board spaceand consume relatively high currents (200 mA or more). In the absence of protection for transmitted data, a "Man-in-the-Middle" attack can be easily implemented, resulting in critical data being either distorted or used againstthe client of the information system. Security issues in this context require a new approach to encoding whenestablishing a session between various independent devices. Objective of the work: to design a system based on widely used universal algorithms capable of enhancingthe protection of transmitted information without slowing down the data transfer speed from the end sensor andallowing the necessary protection to be implemented within a single microcontroller.Result involves constructing a logical interaction scheme between two equivalent clients during the encoding operation and comparing the stability of the encoding result to a linear cryptanalysis attack. Practical significance is an example of logical scheme which allows the transition to a physical schematic diagram for building the final device.*

Keywords: *secure coding, coder, linear cryptanalysis, man in the middle.*

Information about the author

Ryzhikov Aleksey Romanovich – Postgraduate Student of State Demidov Univesity. Research interests: technical methods for ensuring security in information transmission channels, Security Engineering. Hardware-software network interaction systems. Tel: +7 (910)-664-59-96, E-mail: allesharr@gmail.com. Address: 150003, Russia, Yaroslavl, Sovetskaya street, bild. 14.

Для цитирования:

Рыжиков А.Р. Логическая схема защищенного кодера на базе простых алгоритмов шифрования// Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 26-34. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-26-34

For citation:

Ryzhikov A. R. Logic diagram of a secure encoder based on simple encryption algorithms. Means of communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 26-34 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-26-34

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-35-47

Разработка коллинеарной антенны для стандарта Wi-Fi 5

Шаповалов Ф. А.

Аннотация. В работе произведено численное моделирование антенно-фидерных устройств, предназначенных для работы в стандарте Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac). Полученные результаты свидетельствуют о неспособности антенн обеспечить приём и передачу данных в широкополосных каналах на больших расстояниях. В связи с тем, что большинство беспилотных аппаратов, точек доступа и маршрутизаторов работают в данном частотном диапазоне, актуальна задача обеспечения максимальной дальности связи с наземными, морскими или воздушными пунктами управления. **Целью работы** является разработка антенны, имеющей коэффициент стоячей волны по напряжению не более двух во всём диапазоне стандарта Wi-Fi 5, а также обладающей всенаправленной диаграммой направленности в азимутальной плоскости. Необходимо добиться максимально возможного коэффициента усиления, при соблюдении массогабаритных ограничений подвижных объектов. **К результатам работы** следует отнести создание модели коллинеарной антенны, которая представляет собой диэлектрическую подложку с размещёнными по обе её стороны излучателями, каждый из которых состоит из пяти последовательно соединённых микрополосковых линий прямоугольных патчей. Последние имеют симметричные прорезы, обеспечивающие согласование импеданса антенны. В результате оптимизации конструкции в программе «CST Studio Suite» удалось добиться значений коэффициента стоячей волны по напряжению не более 1,6 во всей полосе, а максимальное усиление антенны 8,06 дБи. При этом длина антенны составляет 180 мм, что позволяет конкурировать с аналогами. **Практическая значимость:** разработанная антенна обеспечивает увеличение дальности связи, при габаритах схожих с конкурентами. Это предоставляет возможность интегрировать ее в уже существующие комплексы связи, повышая эффективность их работы.

Ключевые слова: диаграмма направленности, коллинеарная антенна, коэффициент усиления, маршрутизаторы, подвижные объекты малого класса, численное моделирование, Wi-Fi 5.

Введение

В настоящее время стандарт Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) получил широкое применение в различных системах и комплексах. Благодаря высокой скорости передачи данных, возможности одновременного подключения большого числа абонентов, а также поддержки мультипоточковой технологии MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output), значительно повышается эффективность как маршрутизаторов личного пользования, так и приёмо-передающих устройств специального назначения.

Важную роль в вопросе качественной связи играют антенные устройства. На подвижных объектах малого класса и устройствах требующих равноудаленное покрытие относительно источника радиоизлучения, как правило, применяются дипольные, штыревые и коллинеарные антенны (рис. 1 – 3). Первые два вида антенн обладают меньшими размерами, но не способны работать на больших расстояниях. Характеристики последних варьируются и по значениям коэффициента усиления (КУ) и по массогабаритным параметрам. С ростом числа излучающих элементов, а соответственно и размеров, сужается полоса рабочих частот, из-за чего предлагаемые на рынке антенно-фидерных устройств коллинеарные антенны либо не полностью перекрывают диапазон стандарта Wi-Fi 5 по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) ниже 2, либо имеют значения КУ не превышающие 5 – 6 дБи.

Поэтому в АО «НИИ «Нептун» было принято решение выполнить инициативную разработку коллинеарной антенны для обеспечения дальней связи подвижных объектов с наземными, морскими или воздушными пунктами управления. В результате моделирования удалось добиться согласования антенны во всём диапазоне с КСВ не более 1,6 и максимальным усилением 8,06 дБи.



Рис. 1. Дипольная антенна



Рис. 2. Антенна типа «штырь»

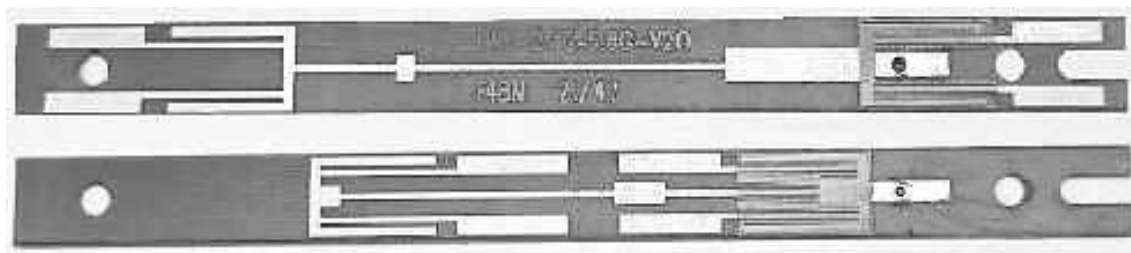
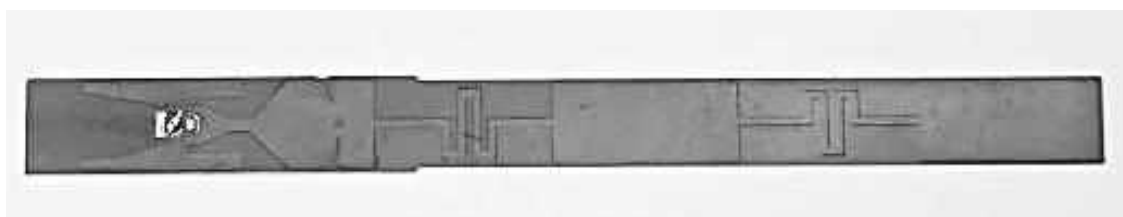


Рис. 3. Коллинеарная антенна

Патентный поиск

Поскольку наибольшим усилением обладают коллинеарные антенны, был произведен поиск и сравнение существующих конфигураций антенн данного типа.

Коллинеарная антенна [1], представленная на рис. 4 имеет всенаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с коэффициентом усиления 4,75 – 6,88 дБи в полосе частот 5,1 – 5,8 ГГц.

Рис. 4. Коллинеарная антенна с *H*-образным противовесом

Антенна используется не только в маршрутизаторах, но и широко применяется на беспилотных наземных и летательных аппаратах. *H*-образный противовес и плавное расширение первого излучающего элемента обеспечивают широкую полосу согласования [2]. Симметрично расположенные индуктивности между излучающими элементами обеспечивают равномерное и синфазное распределение тока по всей антенне, которое формирует максимум излучения в направлении горизонта. Было произведено моделирование антенны в программе «CST Studio Suite» (рис. 5).

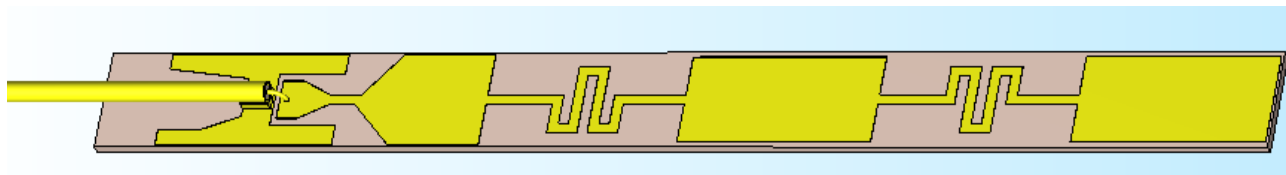


Рис. 5. Модель коллинеарной антенны [1] в программе «CST Studio Suite»

На рис. 6 представлена зависимость КСВ от частоты, а на рис. 7 и рис. 8 содержится график КУ в азимутальной и вертикальной плоскости соответственно.

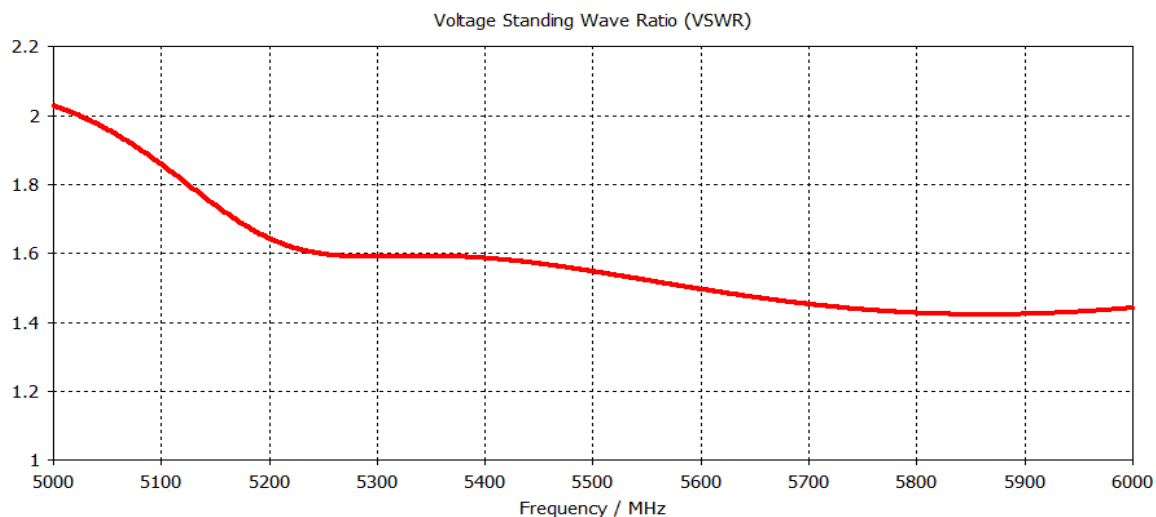


Рис. 6. Рассчитанный КСВ коллинеарной антенны [1] в диапазоне 5 – 6 ГГц

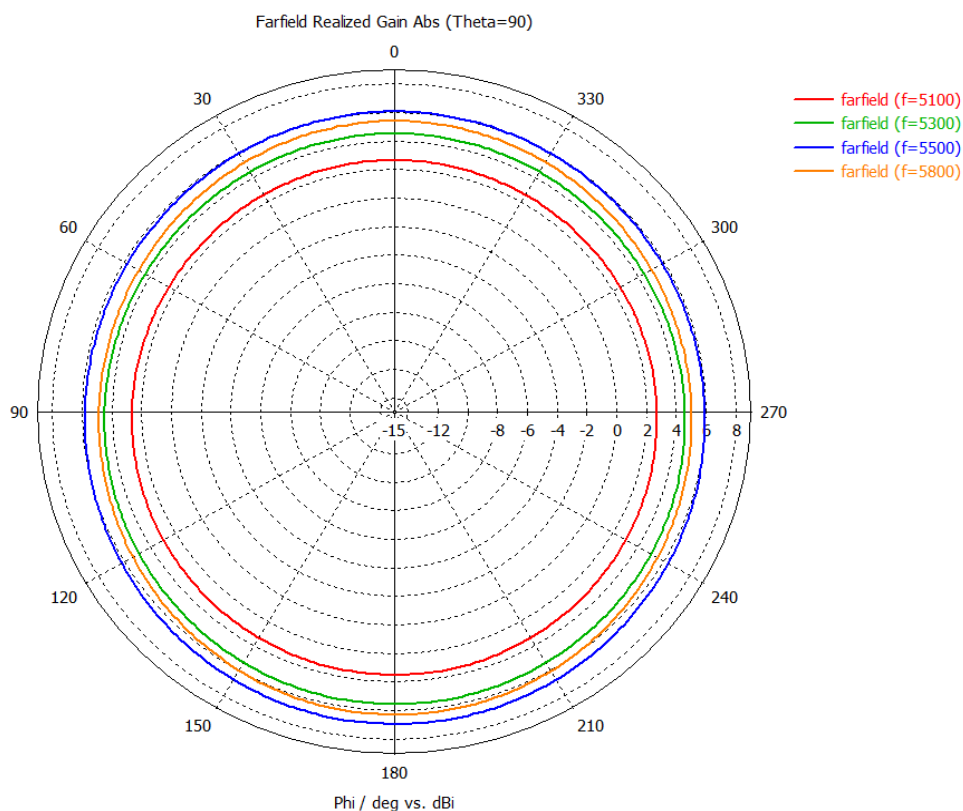


Рис. 7. Рассчитанный коэффициент усиления коллинеарной антенны [1] в азимутальной плоскости

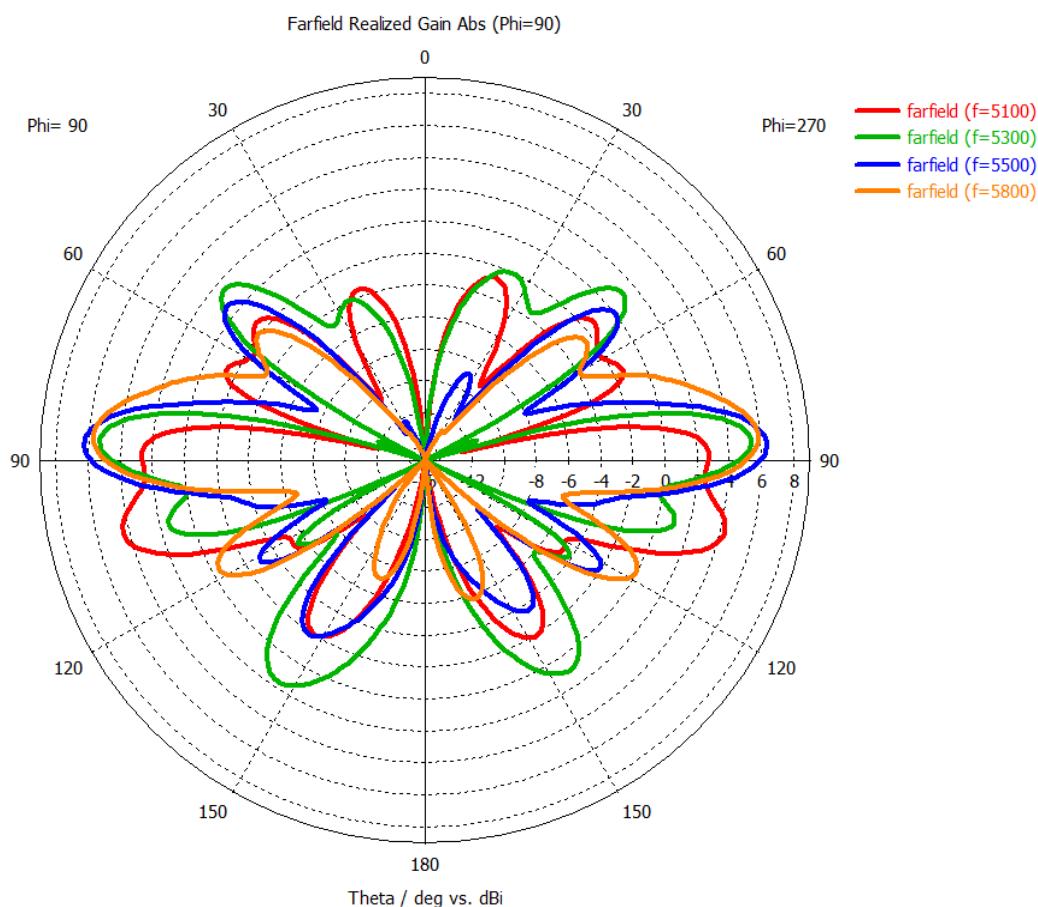


Рис. 8. Рассчитанный коэффициент усиления коллинеарной антенны [1] в вертикальной плоскости

Антенна [3], аналогичная изображенной на рис. 4, была разработана компанией *Guangzhou Solution Telecommunication Technology Co.* и продемонстрирована на рис. 9. Данная антенна также предназначена для использования в беспроводных сетях стандарта *Wi-Fi 5*.



Рис. 9. Коллинеарная антенна [3]

На рис. 10 представлена зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты. Из графика видно, что значение КСВ не превышает 2 в диапазоне от 4,8 до 6,9 ГГц. Для данного типа антенн удалось добиться широкой полосы рабочих частот, но при этом стоит обратить внимание на изображение рассчитанного КУ в объемном представлении (рис. 11). Главный лепесток диаграммы направлен под углом 35 – 45 град. относительно горизонта, что не позволяет использовать антенну на подвижных объектах на дальние расстояния.

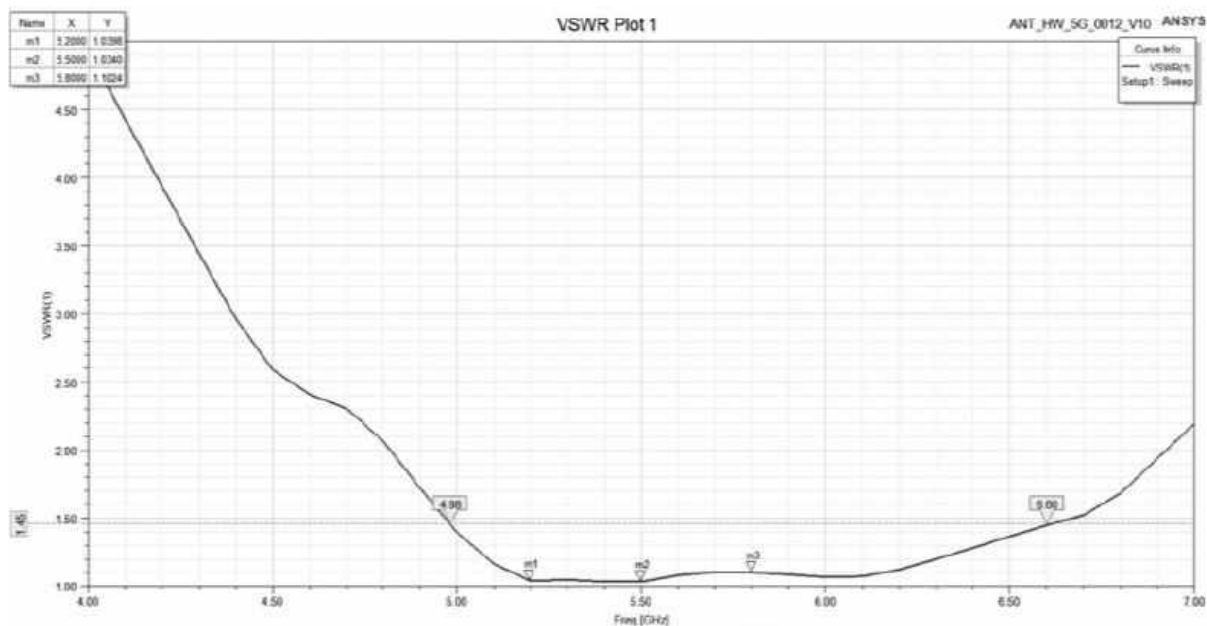


Рис. 10. График коэффициента стоячей волны по напряжению коллинеарной антенны [3]

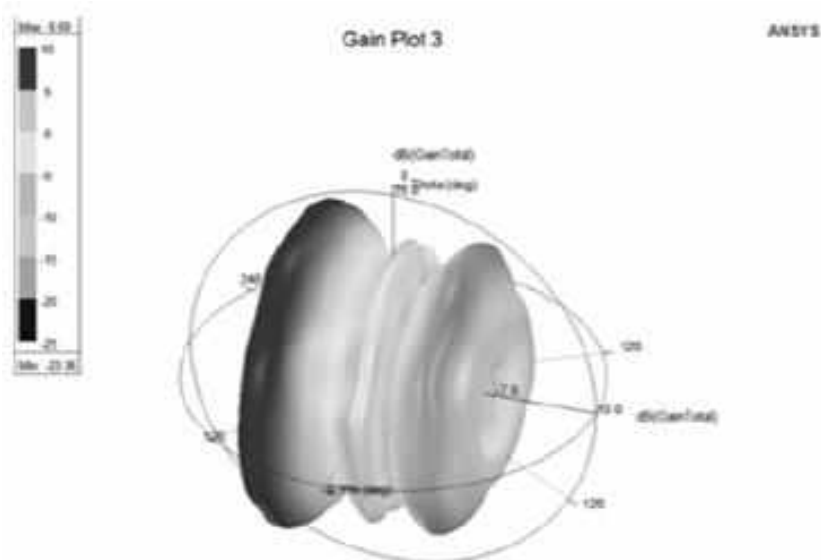


Рис. 11. Объемное представление коэффициента усиления коллинеарной антенны [3]

Антенна, используемая в маршрутизаторах фирмы «Keenetic» (рис. 12), является также коллинеарной антенной, но представляет собой, в отличие от ранее упомянутых антенн, структуру из полуволновых излучателей.

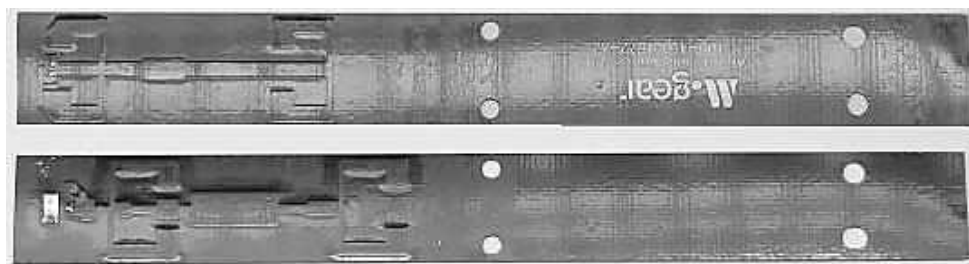


Рис. 12. Коллинеарная антенна фирмы «Keenetic»

Данный вид антенн широко применяется производителями сетевого оборудования [4]. Для уточнения характеристик антенны было выполнено моделирование в программе «CST Studio Suite» (рис. 13). На рис. 14 представлена зависимость КСВ от частоты, а на рис. 15 и рис. 16 содержится график КУ в азимутальной и вертикальной плоскости соответственно. Антенна значительно перекрывает требуемый диапазон 5,1 – 5,8 ГГц по уровню согласования с фидером, но на большинстве частот усиление вдоль линии горизонта варьируется в пределах от 3 до минус 1 дБи. При этом диаграмма направленности в горизонтальной плоскости имеет симметричные провалы на 1 – 2 дБи, перпендикулярные длинной плоскости антенны.

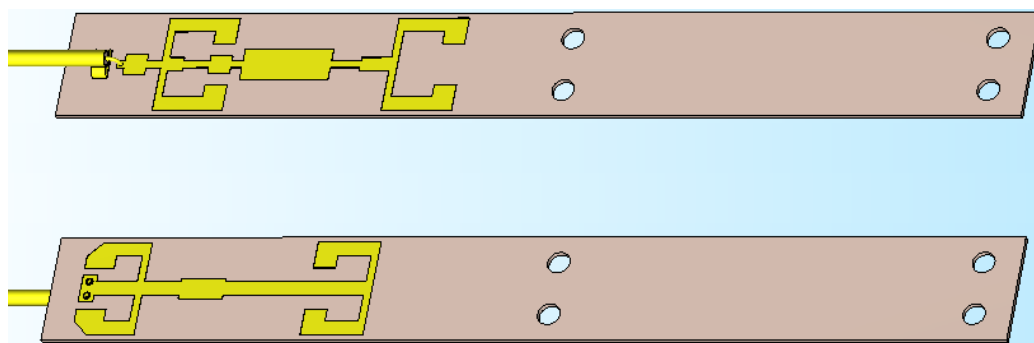


Рис. 13. Коллинеарная антенна фирмы «Keenetic»

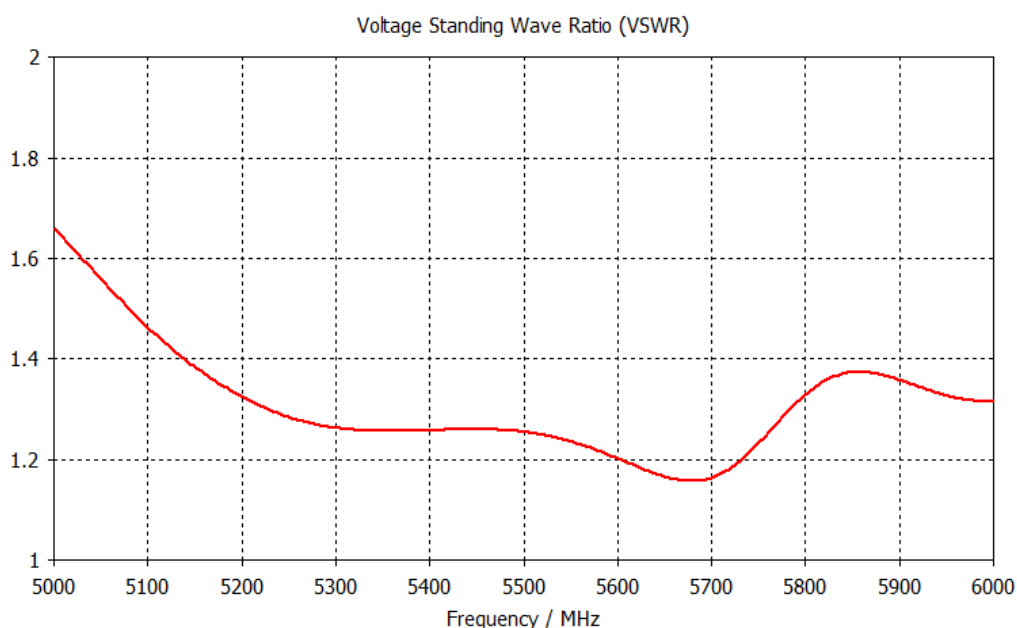


Рис. 14. Рассчитанный коэффициент стоячей волны по напряжению коллинеарной антенны фирмы «Keenetic» в диапазоне 5 – 6 ГГц

Рассмотренные выше антенны имеют ряд недостатков. Во-первых, коэффициент усиления у этих антенн не имеет достаточной величины во всей полосе рабочих частот диапазона *Wi-Fi* 5. Во-вторых, наблюдаются искажения диаграмм направленности, что приводит к снижению эффективности использования антенн. В момент бурного развития беспилотных систем наземного, морского и воздушного назначения, а также с повсеместным использованием стандарта *Wi-Fi* 5 требуются антенны со стабильными характеристиками во всей полосе рабочих частот, чтобы обеспечивать устойчивую связь на больших расстояниях.

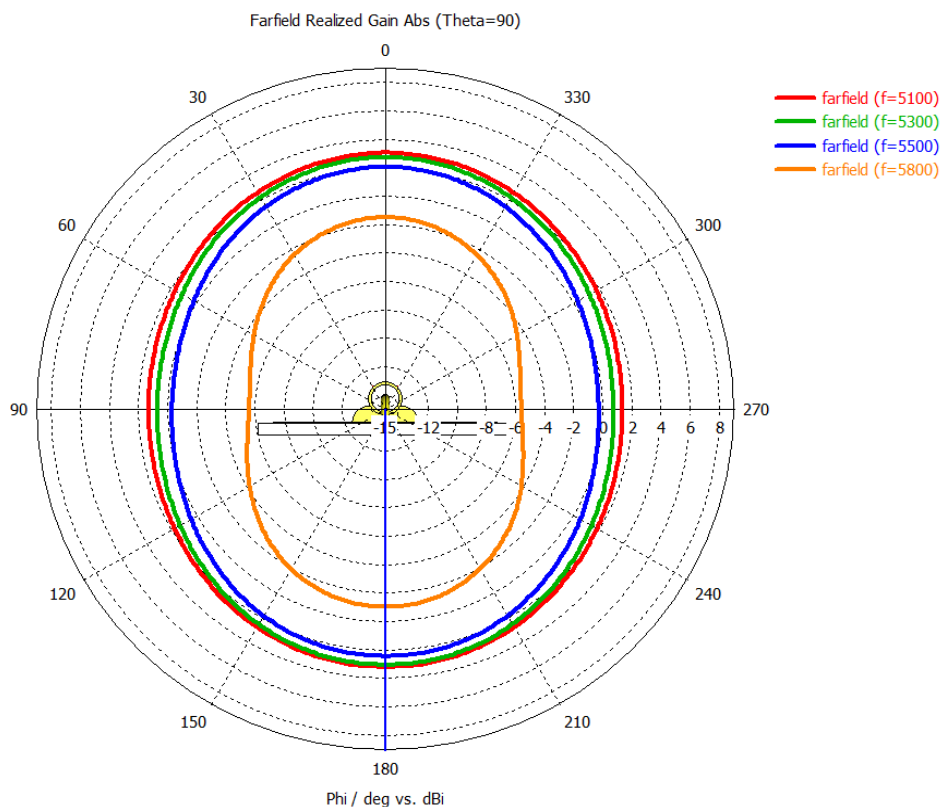


Рис. 15. Рассчитанный коэффициент усиления антенны фирмы «Keenetic» в азимутальной плоскости

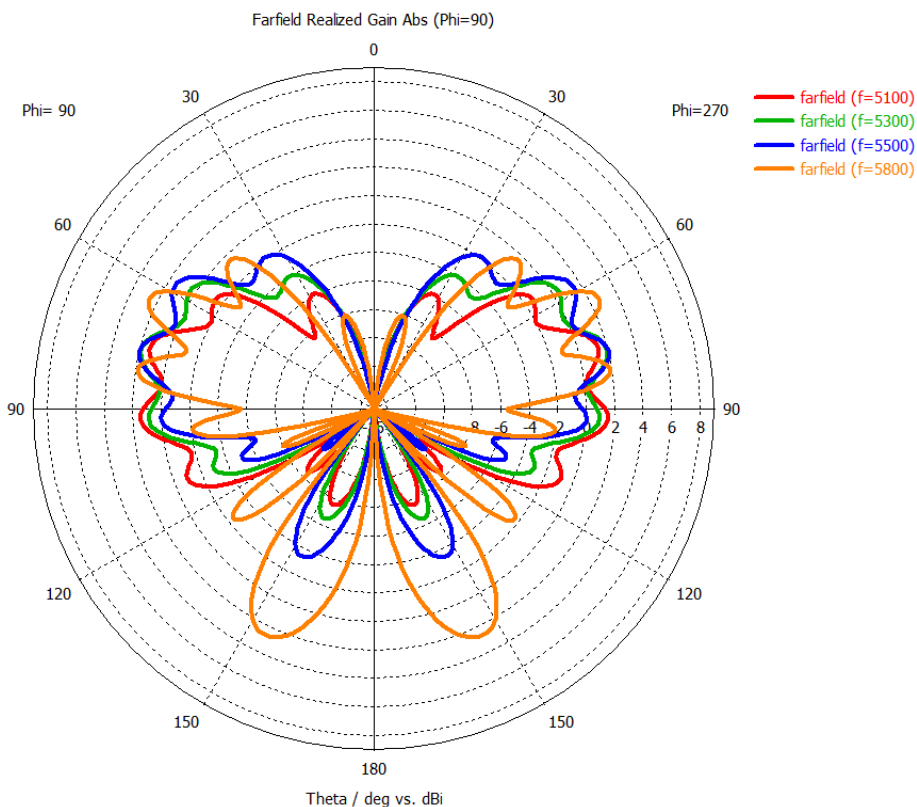


Рис. 16. Рассчитанный коэффициент усиления антенны фирмы «Keenetic» в вертикальной плоскости

Выбор конструкции проектируемой антенны

На основе рассмотренных антенн и патентов был выполнен анализ и сделан выбор конструкции для дальнейшего расчёта и проектирования. За основу для выбора конструкции проектируемой антенны была взята коллинеарная антенна, описанная в [5], поскольку она имеет стабильную диаграмму направленности, обладает достаточно широкой полосой рабочих частот (15 %) и проста по своему устройству.

На рис. 17 показано устройство заявленной в [5] полезной модели. Антенна включает диэлектрическую плату (1), по обе стороны которой расположены излучатели, представляющие собой пять патчей, с согласующими прорезями (2), последовательно соединенных микрополосковыми линиями (3). Важной конструктивной особенностью антенны является то, что патчи одного излучателя находятся напротив микрополосковых линий другого излучателя. Один конец коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом припаивается с короткой стороны платы так, что жила кабеля имеет контакт с микрополосковой линией расположенной сверху, а оплетка кабеля припаивается к патчу, расположенному на обратной стороне. Другой конец коаксиального кабеля припаивается к разъему N-типа (4) закрепленному внутри фланца (5).

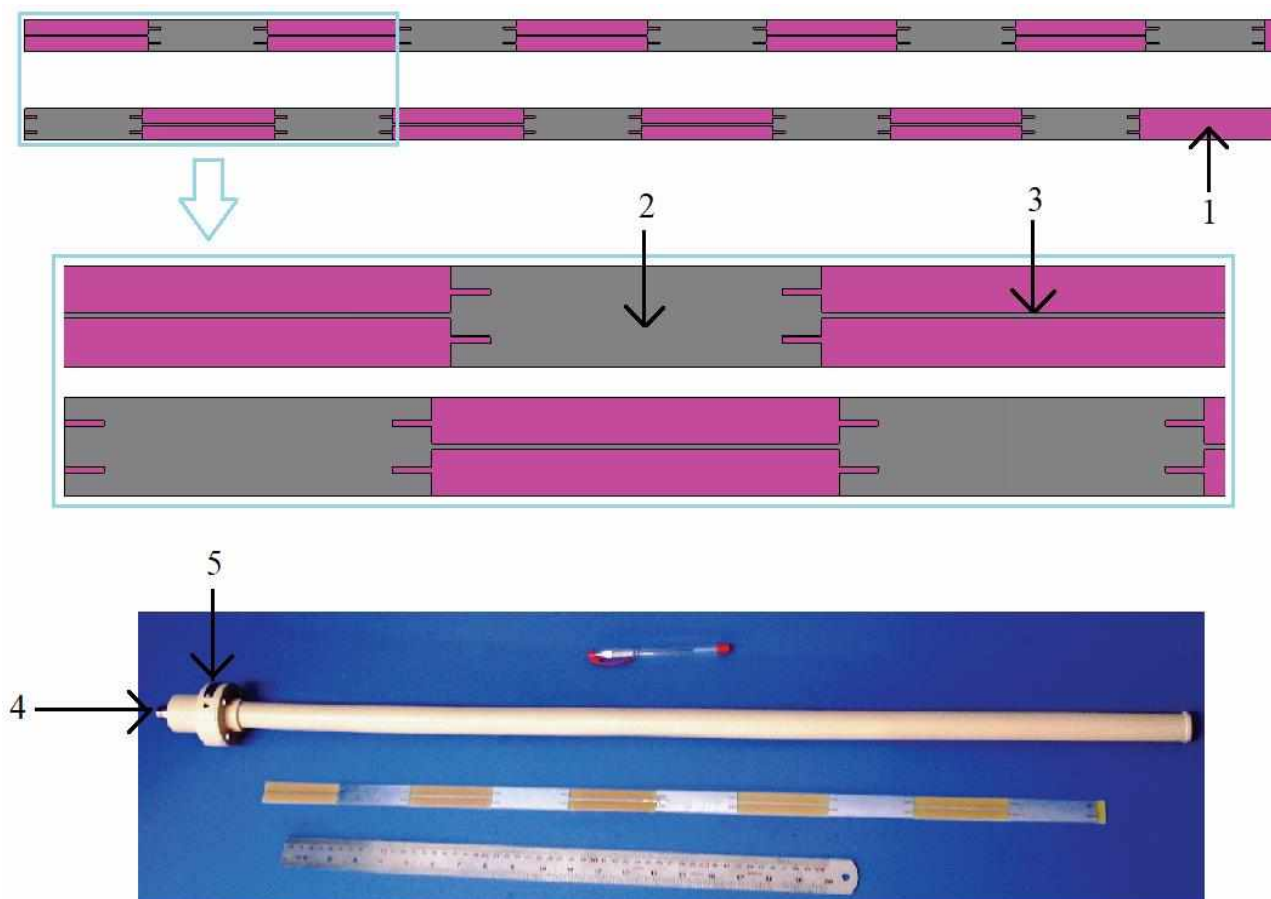


Рис. 17. Топология и внешний вид антенны-прототипа

Результаты измерений показаны на рис. 18 и рис. 19. Антенна [5] имеет КСВ не более двух в диапазоне частот от 1 до 1,15 ГГц, КУ находится в пределах 4,5 – 6 дБ, а диаграмма направленности имеет стабильные всенаправленные характеристики, что делает целесообразным основанием выбор данного прототипа для разработки антенны стандарта *Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac)*.

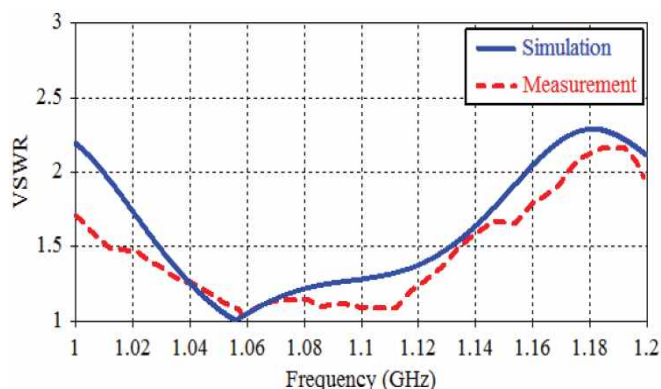


Рис. 18. График коэффициента стоячей волны по напряжению антенны-прототипа

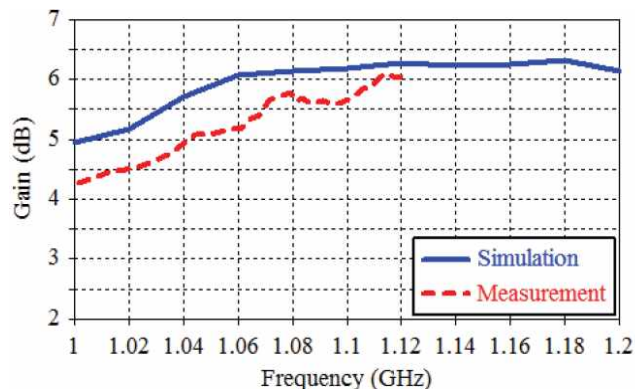


Рис. 19. Коэффициент усиления антенны-прототипа

Результаты численного моделирования в программе «CST Studio Suite» в целях выбора и оптимизации конструкции проектируемой антенны

На рис. 20 показана модель разработанной антенны в программе «CST Studio Suite». Она представляет собой, также как и прототип, диэлектрическую плату с излучателями по обе ее стороны. В табл. 1 представлены основные размеры прототипа и разработанной антенны.

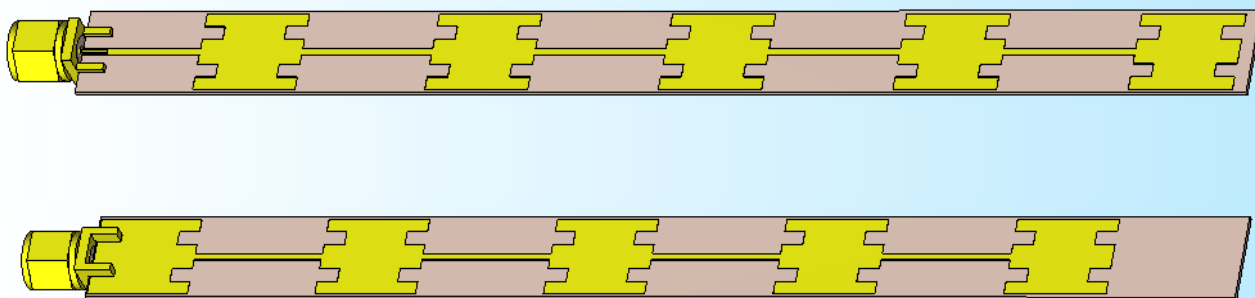


Рис. 20. График коэффициента стоячей волны по напряжению антенны-прототипа

Таблица 1 – Основные размеры прототипа и разработанной антенны

Параметр	Разработанная антенна	Прототип
Длина платы, мм	180	775
Ширина платы, мм	12,5	20
Высота платы, мм	0,762	1,5
Длина патча, мм	15	73
Ширина патча, мм	11,5	19
Длина прорези, мм	3	7,83
Ширина прорези, мм	2	1,15
Длина микрополосковой линии, мм	19	81,12
Ширина микрополосковой линии, мм	1	1,15

Длина патчей, как и расстояния между ними приблизительно равны четверти длины волны. При этом длина микрополосковых линий всегда больше длины патчей, что необходимо для равномерного и синфазного распределения тока по всей антенне. Также меньшая длина излучающего элемента обусловлена его шириной – чем шире патч, тем

меньше длина. На размеры прорезей влияет множество факторов: материал подложки, центральная частота, ширина микрополосковой линии. Ширина и глубина согласующей прорези была подобрана путем численного моделирования в программе «*CST Studio Suite*».

В [5] в качестве материала подложки использовался стеклотекстолит *FR-4*. Разработанная полезная модель спроектирована на высокочастотном углеводородном керамическом материале *Rogers RO4350B*. Выбор обусловлен характеристиками материала – он более устойчив к воздействию пониженной и повышенной температуры, обладает меньшим тангенсом угла диэлектрических потерь и имеет меньший разброс значения диэлектрической проницаемости ϵ_r . С повышением рабочей частоты даже незначительные отклонения параметров материала диэлектрической подложки оказывают существенное влияние на параметры антенны. Учитывая тот факт, что антенна является резонансной и узкополосной, нецелесообразно использование стеклотекстолита *FR-4*.

Также отличием от прототипа является то, что высокочастотный разъём подключается непосредственно на плату. Это привело и к изменению геометрии патча (рис. 21), к которому припаивается разъём – были убраны согласующие прорези. Отсутствие кабеля, соединяющего антенну и разъём, позволяет подключить антенну непосредственно к выходу приёмно-передающего устройства, обеспечивая минимальные потери полезного сигнала в тракте.

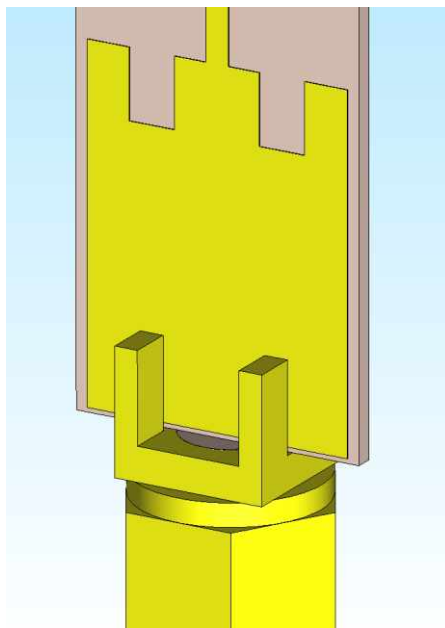


Рис. 21. Изменение в топологии разработанной антенны

На рис. 22 представлена зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты в диапазоне от 5 до 6 ГГц. Как видно из графика, значение КСВ не более 1,65 в требуемой полосе 5,1 – 5,8 ГГц.

На рис. 23 и рис. 24 содержится график коэффициента усиления в азимутальной и вертикальной плоскости соответственно. В результате моделирования удалось добиться максимальных значений КУ (7,99 – 8,06 дБи) в полосе 5,1 – 5,45 ГГц. Далее, с ростом частоты наблюдается уменьшение усиления антенны. Полагаясь на то, что в приёмно-передающих устройствах, работающих в этом стандарте, выбор канала передачи данных происходит, как правило, автоматически, пиковое значение усиления было смещено на нижние частоты стандарта *Wi-Fi 5*. Это связано с тем, что разница длин волн на границах диапазона отличается на 7 мм (13 %), следовательно, дальность связи будет незначительно больше при выбранной конфигурации.

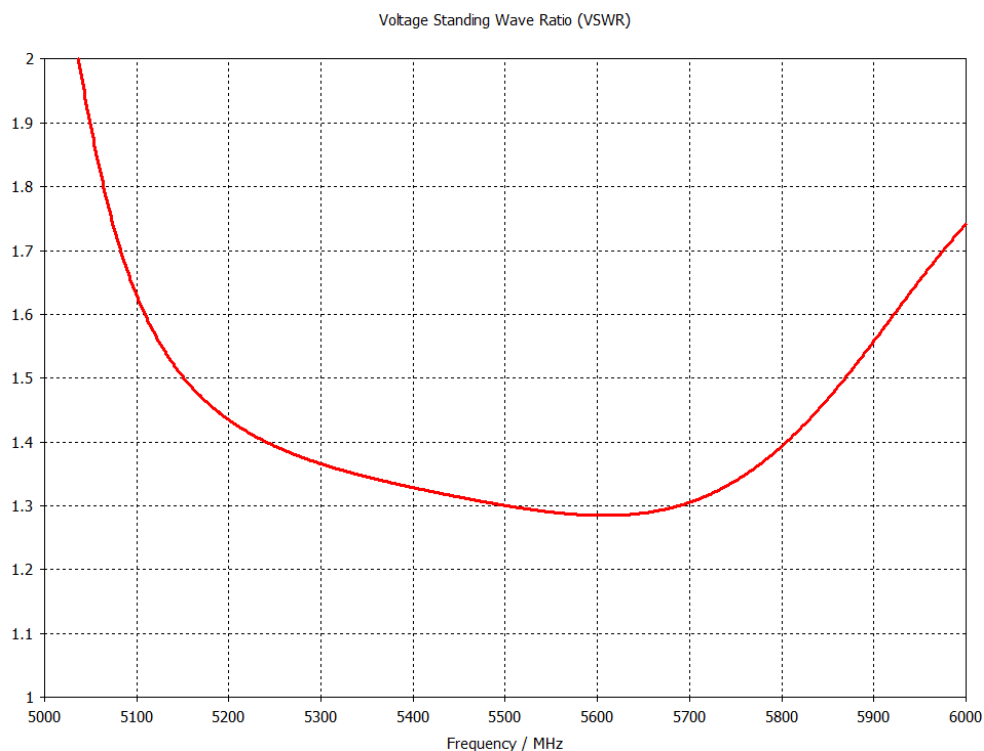


Рис. 22. График коэффициента стоячей волны по напряжению разработанной антенны

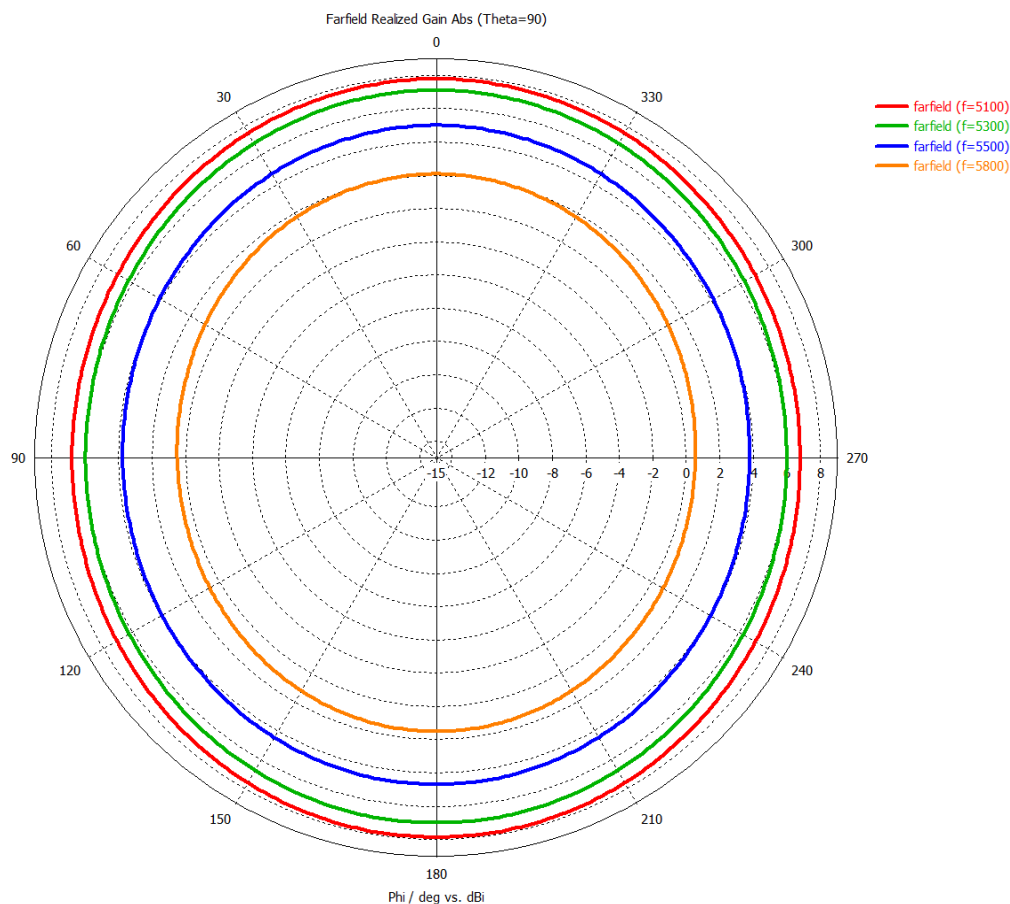


Рис. 23. Рассчитанный коэффициент усиления разработанной антенны в азимутальной плоскости

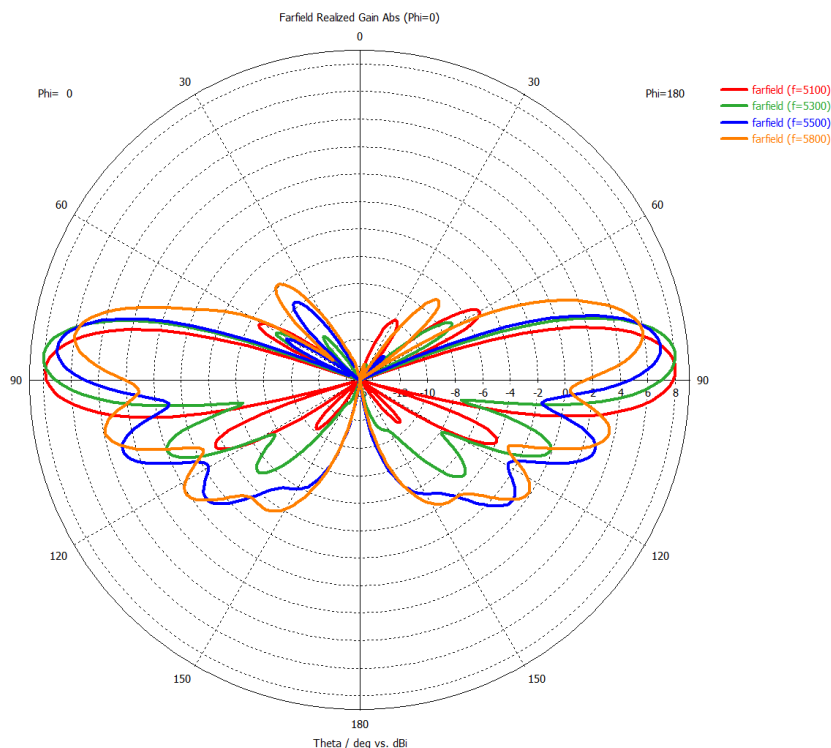


Рис. 24. Рассчитанный коэффициент усиления разработанной антенны в вертикальной плоскости

Заключение

Разработанная коллинеарная антенна для стандарта *Wi-Fi* 5 имеет тактико-технические характеристики и надёжностные показатели, позволяющие обеспечить требования для эксплуатации на подвижных объектах различных классов, а также в маршрутизаторах и мобильных точках доступа. Антенна обеспечивает всенаправленный приём-передачу цифровых данных в широкополосном *Wi-Fi* канале с наземными, морскими или воздушными пунктами управления.

Постановка разработанной антенны на серийное производство повысит эффективность существующих комплексов связи. Небольшие массогабаритные параметры позволяют использовать антенну даже в составе небольших устройств, обеспечивая наилучшую дальность связи.

Литература

1. Патент на полезную модель № CN217562824U (Китай). Всенаправленная антенна Wi-Fi с высоким коэффициентом усиления // Лю Цзюнь. Шэньчжэнь Кэсиньхуачэн коммуникационные технологии, Лтд. – Опубликовано: 11.10.2022. – H01Q 21/00.
2. Патент на полезную модель № CN211295385U (Китай). Антенное излучающее устройство и антенна // Ян Цзюньюй, Ло Вэньхао. Чэнду Ляньчжоу Интернэшнл Текнолоджи, Лтд. – Опубликовано: 18.08.2020. – H01Q 1/48 (2006.01).
3. Патент на полезную модель № CN114256613A (Китай). Излучатель и всенаправленная антенна 5G с высоким коэффициентом усиления, используемые для двухчастотного ячеистого маршрутизатора // Сюй Янь, Май Юнш. Гуанчжоу Солюшн Телекоммуникационные Технологии, Лтд. – Опубликовано: 29.03.2022. – H01Q 1/38 (2006.01).
4. Патент на полезную модель № WO2023134429A1 (Китай). Конструкция антенны и антенная система // Ян Цзюньюй. Чэнду Ляньчжоу Интернэшнл Текнолоджи, Лтд. – Опубликовано: 20.07.2023. – H01Q 1/24 (2006.01).
5. Давуд З., Ахмади А. Всенаправленная печатная коллинеарная микрополосковая антенная решетка // Научные письма о прогрессе в области электромагнетизма. 2018. № 75. С. 33-38.

References

1. Utility Model Patent No. CN217562824U (China). Omnidirectional Wi-Fi antenna with high gain. Liu Jun. Shenzhen Kexinhuacheng Communication Technology Co., Ltd. Published: 11.10.2022. H01Q 21/00.
2. Utility Model Patent No. CN211295385U (China). Antenna emitting device and antenna. Yang Junyu, Luo Wenhao. Chengdu Lianzhou International Technology, Ltd. – Published: 08.18.2020. H01Q 1/48 (2006.01).
3. Utility Model Patent No. CN114256613A (China). An emitter and a high-gain omnidirectional 5G antenna used for a dual-frequency mesh router. Xu Yan, Mai Yunsh. Guangzhou Solution Telecommunication Technologies, Ltd. Published: 03.29.2022. H01Q 1/38 (2006.01).
4. Utility Model Patent No. WO2023134429A1 (China). Antenna design and antenna system. Yang Junyu. Chengdu Lianzhou International Technology, Ltd. Published: 07.20.2023. H01Q 1/24 (2006.01).
5. Davud Z., Ahmadi A. Omnidirectional printed collinear microstrip antenna array. Scientific letters on progress in the field of electromagnetism. 2018. No. 75. Pp. 33-38.

Статья поступила 15 февраля 2025 г.

Информация об авторе

Шаповалов Фёдор Александрович – Инженер 2 категории. АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: синтез антенно-фидерных устройств. Тел.: +7(812)327 49 96 доб. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru. Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 7-я линия В.О., д. 80, к. 1, лит. А.

Development of a collinear antenna for the Wi-Fi 5 standard

F. A. Shapovalov

Annotation. Numerical simulation of antenna-feeder devices designed to operate in the Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) standard has been performed. The results obtained indicate the inability of the antennas to provide reception and transmission of data in broadband channels over long distances. Due to the fact that most unmanned vehicles, access points and routers operate in this frequency range, the task of ensuring maximum communication range with land, sea or air control points is urgent. **The aim** of the work is to develop an antenna with a maximum of two SWR in the entire range of the Wi-Fi 5 standard, as well as having an omnidirectional directional pattern in the azimuthal plane. It is necessary to achieve the maximum possible gain factor, while observing the mass and standard limitations of moving objects. **The results** of the work include the creation of a model of a collinear antenna, which is a dielectric substrate with radiators placed on both sides of it, each of which consists of five rectangular patches connected in series by microstrip lines. The latter have symmetrical slots that ensure the matching of the antenna impedance. As a result of design optimization in the «CST Studio Suite», it was possible to achieve SWR values of no more than 1,6 in the entire band, and the maximum antenna gain was 8,06 dBi. At the same time, the antenna length is 180 mm, which makes it possible to compete with analogues. **Practical significance:** the developed antenna provides an increase in communication range, with dimensions similar to competitors. This makes it possible to integrate it into existing communication systems, increasing their efficiency.

Keywords: radiation pattern, collinear antenna, gain, routers, small class mobile, objects, numerical simulation, Wi-Fi 5.

Information about the author

Shapovalov Fedor Aleksandrovich – Engineer of the 2nd category of JSC “Research Institute “Neptune”. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru.
Address: 199178, Russia, Saint-Petersburg, 7th line of Vasilyevsky Island, house 80, bild. 1, let. A.

Для цитирования: Шаповалов Ф. А. Разработка коллинеарной антенны для стандарта Wi-Fi 5 // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 35-47. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-35-47

For citation: Shapovalov F. A. Development of a collinear antenna for the Wi-Fi 5 standard Means of Communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 35-47. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-35-47. (in Russian).

ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.391

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-48-55

Оценка вероятности трансформации двоичных кодов Хэмминга

Акулов В. С., Угрик Л. Н., Дяченко А. Н.

Аннотация. Постановка задачи: В настоящее время существует множество линейных блочных кодов, применяемых при построении каскадных кодовых конструкций, обладающих высокой способностью обнаружения и исправления ошибок. Однако, в решениях, требующих минимизации вычислительной сложности, низкого энергопотребления и высокой скорости работы актуальным всё ещё остаётся кодирование с использованием кодов Хэмминга. Для достижения оптимальных характеристик каскадных кодовых конструкций необходимо точно оценивать параметры отдельных компонентов. **Целью работы** является оценка точности вычисления вероятности трансформации для классических и модифицированных кодов Хэмминга, при различных методах расчёта весового спектра кода. Элементом **новизны** работы является одновременное рассмотрение классического кода Хэмминга, а также укороченного и расширенного кодов построенных на его основе. Оценка влияния модификаций кода на вероятность трансформации информации (вероятность ошибки декодирования) **Результат:** с помощью разработанной компьютерной программы, рассчитаны значения вероятности трансформации при разных методах расчёта спектра весов кода, как для классических кодов Хэмминга, так и для его укороченных модификаций, а также расширенных кодов, с дополнением кодового слова до чётности. Получены данные, по которым проведён сравнительный анализ точности приближенного метода расчёта весового спектра кодовых слов и метода расчёта путём полного перебора множества кодовых слов. Дана оценка влияния методов расчёта на получаемое значение вероятности трансформации. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы разработчиками для оптимизации выбора кодов в проектируемых системах, в том числе имеющих ограничения на ресурсы.

Ключевые слова: вероятность трансформации, весовой спектр кода, двоичный симметричный канал, код Хэмминга, расширенный код Хэмминга, укороченный код Хэмминга

При построении каскадных кодовых конструкций в каналах с двоичной манипуляцией в качестве внутреннего кода часто используется код Хэмминга, исправляющий одиночные ошибки, который является оптимальным для двоичного симметричного канала. Для определения параметров каскадного кода необходимо с достаточной точностью вычислить вероятности правильного приема, трансформации и стирания кодового слова внутреннего кода. Расчет вероятности правильного приема кодового слова сложности не представляет. Расчет вероятности трансформации предполагает использование весового спектра кода, который может быть вычислен как путем построения кодового множества, так и по приближенному соотношению, рекомендуемому в [1]. Использование последнего неизбежно вносит ошибку в рассчитываемое значение. Проведём сравнительную оценку полученных вероятностей трансформации кодового слова для этих методов определения весового спектра кода. При этом ограничимся наиболее часто используемыми кодами длиной до 31 бита.

В соответствии с [2] для любого значения n (n – кодовая длина) существует код Хэмминга, исправляющий все одиночные ошибки. Длина кода Хэмминга определяется соотношением $n = 2^m - 1$, где m – число проверочных элементов, $m = n - k$, k – информационная длина кода. Минимальное расстояние $d = 3$. Для получения меньших кодовых длин строятся укороченные коды. Добавление к коду еще одного проверочного символа, реализующего проверку на общую четность, позволяет получить расширенный код

Хэмминга с $d = 4$ и $n = 2^m$. Укороченные и расширенные коды Хэмминга также являются оптимальными для двоичного симметричного канала.

Вероятность правильного приема кода Хэмминга в двоичном симметричном канале с вероятностью ошибки p будет равна

$$P_{\text{пр}} = (1-p)^n + n \cdot p \cdot (1-p)^{n-1}. \quad (1)$$

Тогда вероятность трансформации в соответствии с [3] имеет вид

$$P_{\text{тр}} = \sum_{h=[d/2]+1}^n p^h (1-p)^{n-h} \cdot \sum_{s=0}^1 \sum_{l=d}^n A_l N(l, h; s), \quad (2)$$

где A_l – число кодовых слов веса l , $N(l, h; s)$ – число конфигураций ошибок веса h , находящихся на расстоянии s от конкретного кодового слова веса l , определяемое формулой

$$N(l, h; s) = \sum_{\substack{j \geq 0, k \geq 0 \\ j+k=s \\ l+k-j=h}} \binom{n-l}{k} \binom{l}{j}. \quad (3)$$

В соотношении (3) $(n-l)$ – количество нулевых символов в кодовом слове веса l ; k из них заменяем единицами и одновременно j единиц заменяем нулями. В результате получаем конфигурацию ошибок веса $k+l-j$, которая находится на расстоянии $j+k$ от рассматриваемого кодового слова.

Для проведения дальнейших вычислений необходимо вычислить весовой спектр кода. Используем матричное представление линейного блочного кода [2].

Проверочная матрица H кода Хэмминга имеет размерность $m \times n$ и содержит в столбцах все двоичные последовательности длины m . Приведем матрицу H_k каноническому виду $H = [-P^T I_m]$, где I_m – единичная матрица размерности $m \times m$. В двоичном случае $-P = P$. Тогда порождающая матрица $G = [I_k P]$, где I_k – единичная матрица размерности $k \times k$ [4].

Для иллюстрации приведем численный пример.

Пусть $m = 3$. Тогда $n = 2^3 - 1 = 7$,

$$H = \begin{bmatrix} 0001111 \\ 0110011 \\ 1010101 \end{bmatrix} \rightarrow H_k = \begin{bmatrix} 0111 & 100 \\ 1011 & 010 \\ 1101 & 001 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 011 \\ 101 \\ 110 \\ 111 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1000 & 011 \\ 0100 & 101 \\ 0010 & 110 \\ 0001 & 111 \end{bmatrix}.$$

Информационное множество кода является без избыточным и представляется матрицей M размерности $2^k \times k$. Произведение $M^T G$ порождает кодовое множество. Для построения укороченного кода следует ограничиться первыми $2^k - s$ строками матрицы M , где s – количество исключаемых информационных бит. Для построения расширенного кода к каждому кодовому слову добавить проверку на общую четность.

Для построения весового спектра кода в цикле по числу кодовых комбинаций вычисляется очередное кодовое слово, определяется его вес и полученное значение учитывается в массиве весового спектра.

В [1] показано, что для многих кодов весовой спектр хорошо аппроксимируется биномиальным распределением

$$A_l \approx 2^{k-n} \binom{n}{l}, \text{ для } l \geq d. \quad (4)$$

При длине последовательности n , l ненулевых знаков могут располагаться $\binom{n}{l}$ способами во множестве размером 2^n , и размер кодового множества составляет 2^k .

Рассмотрим, насколько применима предложенная аппроксимация для достаточно коротких кодов Хэмминга.

Для этого проведем сравнение весовых спектров кодов Хэмминга, рассчитанных по построенному кодовому множеству и вычисленных по соотношению (4). Одновременно проведем расчет вероятности трансформации для обоих значений весового спектра и оценим относительную разность результатов в процентах. За базовую величину примем спектр, фактически вычисленный по построенному кодовому множеству. Сравнение проведем для классического, укороченного и расширенного кодов при $m = 3, 4$ и 5 .

Результаты расчета для классического кода приведены на рис. 1 – 3.

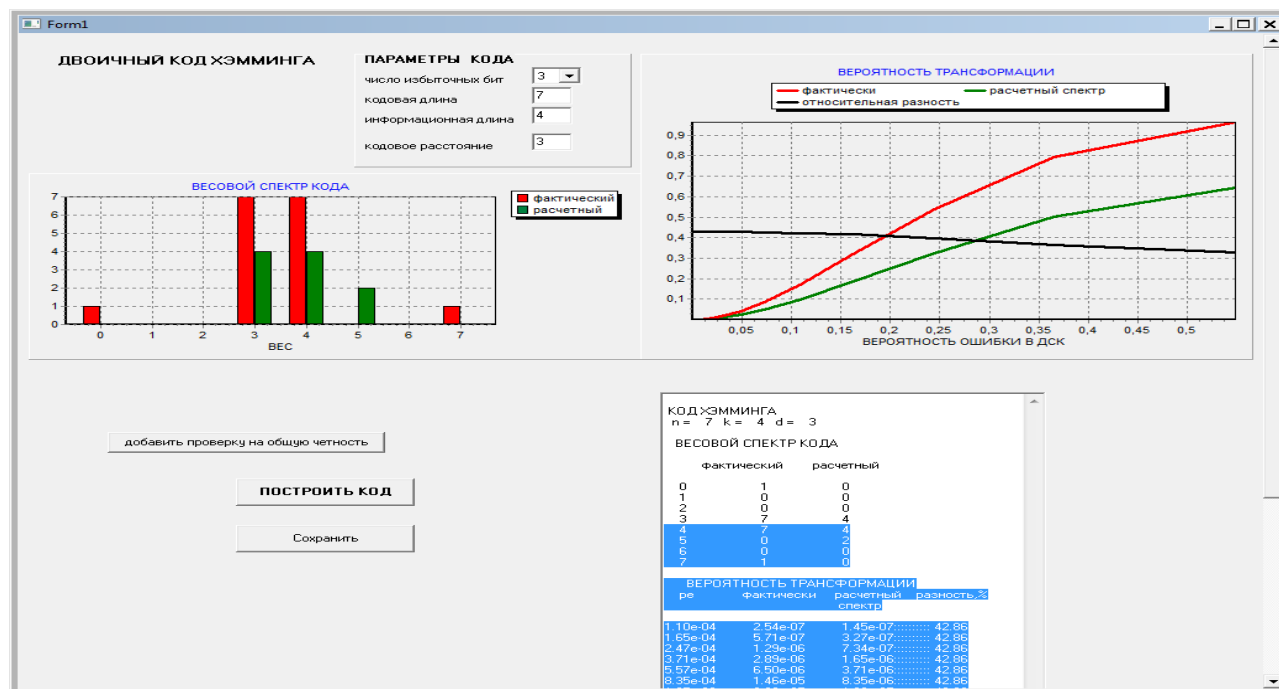


Рис. 1. Результаты расчёта вероятности трансформации для (7,4)-кода ($m = 3$)

Как представлено на снимке экрана окна расчёта, рис. 1 расчетный спектр существенно отличается от фактического и относительная разность в оценке вероятности трансформации составляет 33 – 43 %.

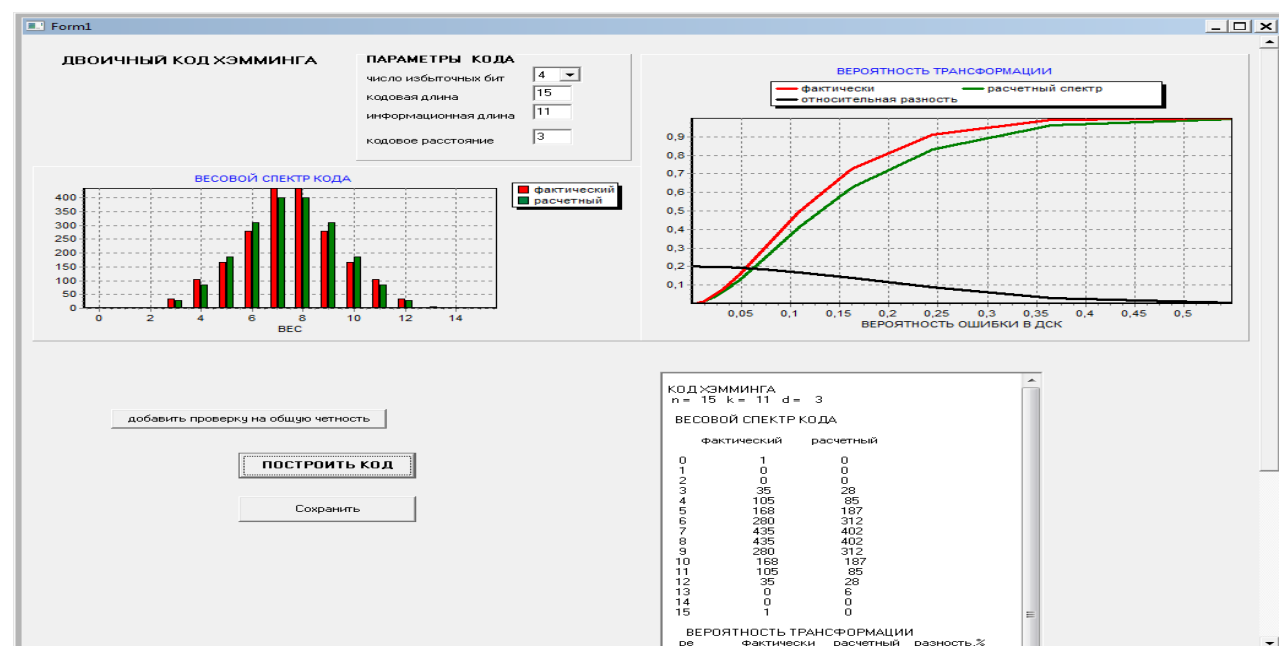


Рис. 2. Результаты расчёта вероятности трансформации для (15,11)-кода ($m = 4$)

Из снимка экрана результата расчёта программы, рис. 2, наблюдается лучшее по сравнению с предыдущим примером совпадение спектров, относительная разность вероятности трансформации от 0,5 до 20 %. Следует отметить, что работа проводится, как правило, в каналах с вероятностью ошибки не более 0,2. В этой области относительная разность составляет от 8 до 20 %.

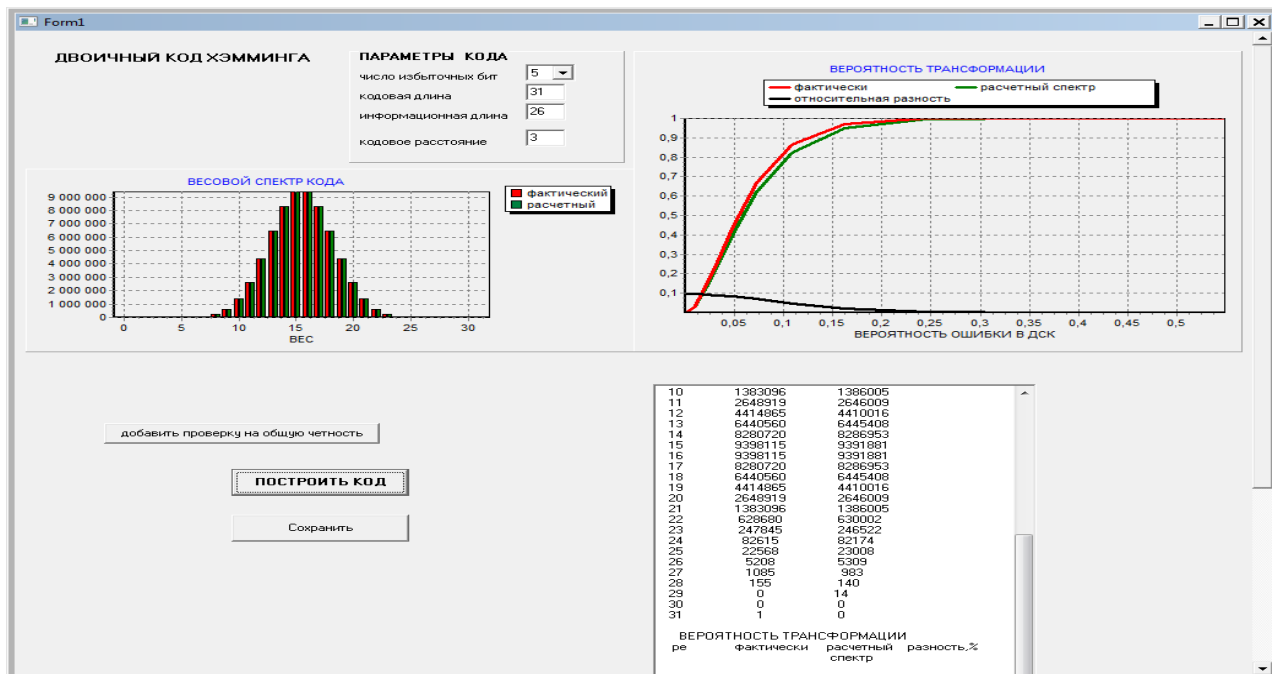


Рис. 3. Результаты расчёта вероятности трансформации для (31,26)-кода ($m = 5$)

При увеличении длины кода до 31, как представлено на рис.3, наблюдается достаточно хорошее совпадение спектров, относительная разность вероятности трансформации от 0 до 9,7%. В каналах с вероятностью ошибки не более 0,2 относительная разность составляет от 0 до 5%.

Очевидно, что приближенное соотношение для оценки весового спектра допустимо использовать при кодовых длинах более 31.

Рассмотрим укороченные коды (рис. 4-6).

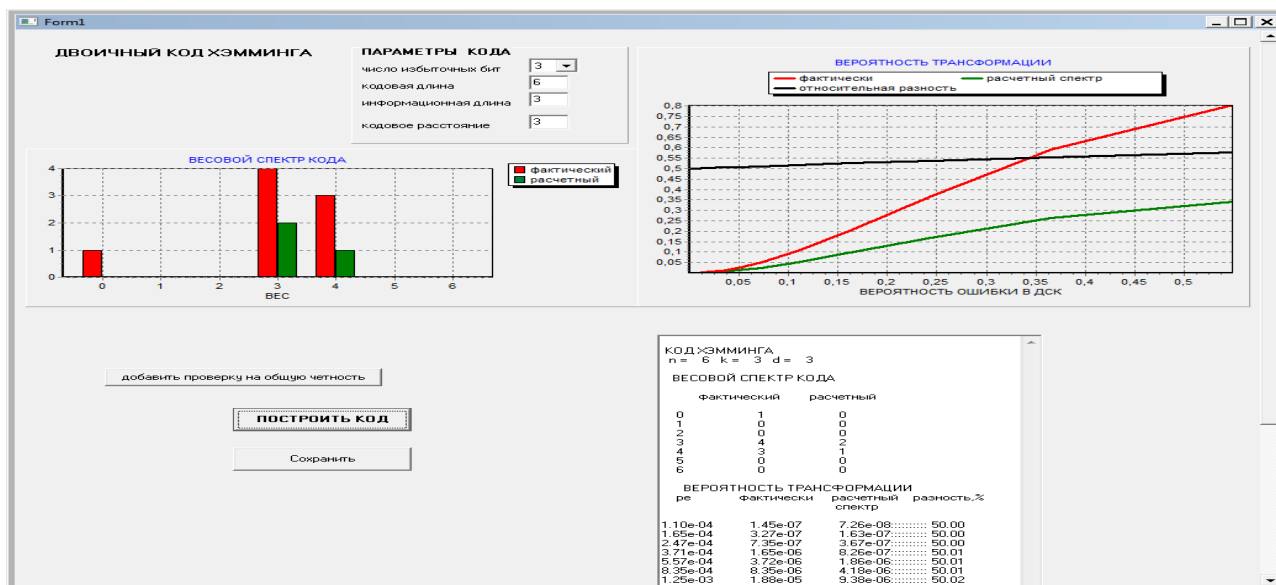


Рис. 4. Результаты расчёта вероятности трансформации для укороченного (6,3)-кода ($m = 3$)

При укорочении кода нарушается симметрия весового спектра, что при малых кодовых длинах ведет к росту относительной разности, которая составляет 50 – 57 %, как показано на рис. 4.

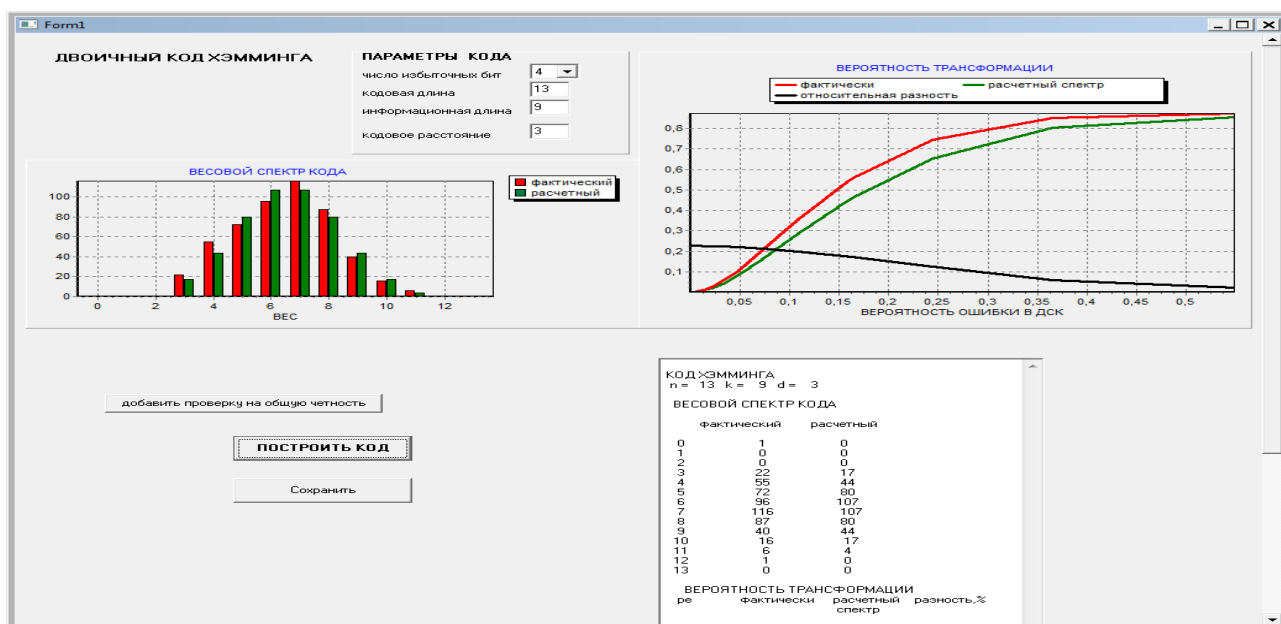


Рис. 5. Результаты расчёта вероятности трансформации для укороченного (13,9)-кода ($m = 4$)

При увеличении длины кода относительная разность снижается до 12 – 20 %, что видно из рис. 5.

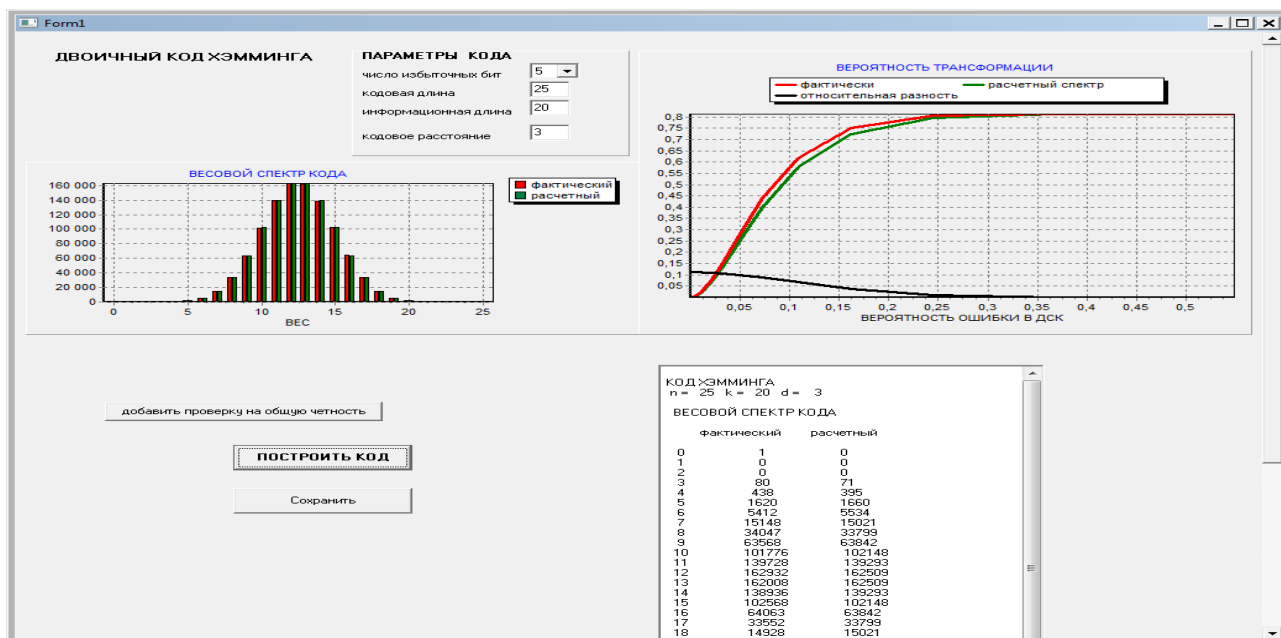
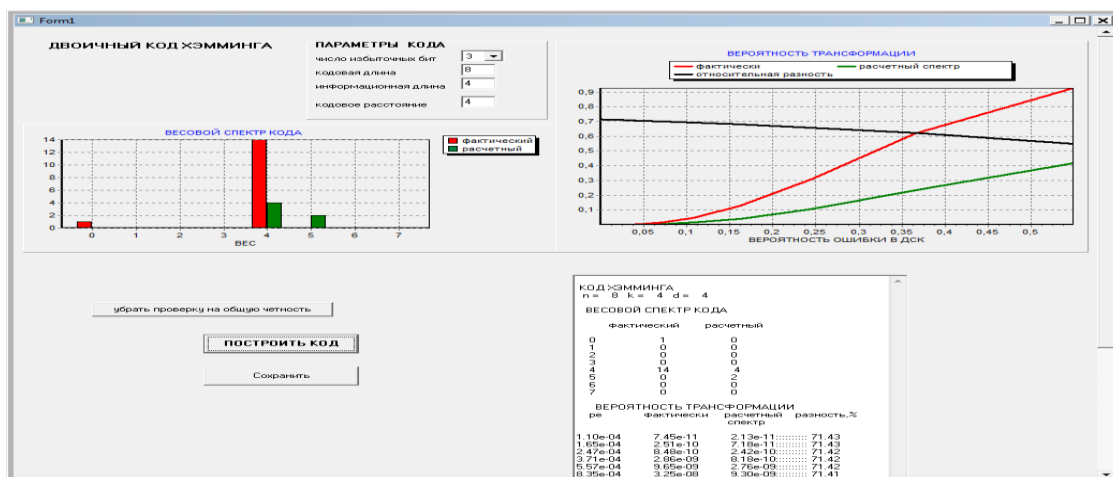


Рис. 6. Результаты расчёта вероятности трансформации для укороченного (25,20)-кода ($m = 5$)

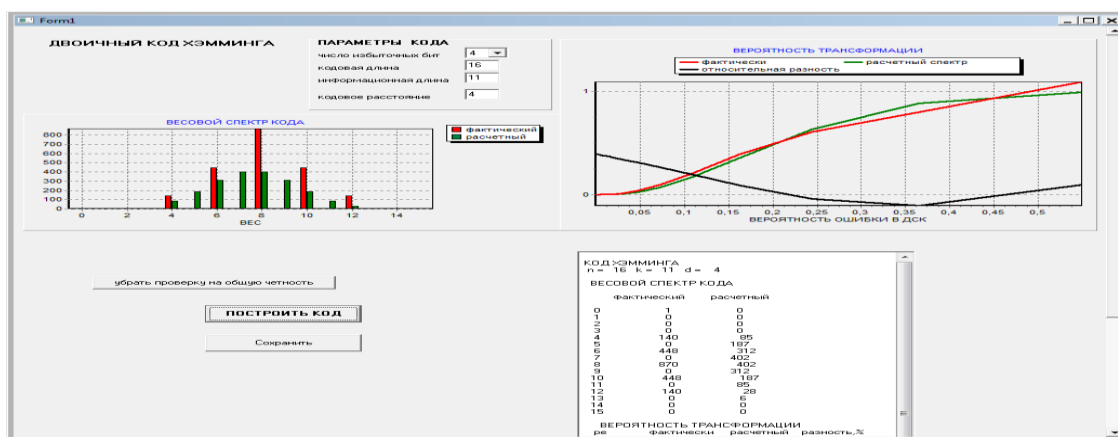
При увеличении кодовой длины до 25 относительная разность снижается до 1 – 11 %, что представлено на рис. 6.

Анализ данных, приведенных на рис. 4-6, позволяет сделать вывод о допустимости использования приближенного соотношения для расчета весового спектра кода при кодовых длинах не менее 25.

Результаты расчета для расширенных кодов приведены на рис. 7-9.

Рис. 7. Результаты расчёта вероятности трансформации для расширенного (8,4)-кода ($m = 3$)

При добавлении проверки на общую четность фактический и расчетный весовые спектры существенно различаются. Относительная разность при значениях вероятности ошибки порядка 10^{-1} составляет 70 %, как видно из расчёта программы рис. 7.

Рис. 8. Результаты расчёта вероятности трансформации для расширенного (16,11)-кода ($m = 4$)

На рис. 8 можно наблюдать, что с увеличением кодовой длины наблюдается снижение относительной разности расчётной и фактической вероятностей трансформации до 4-40 %. При этом наблюдается переход значения относительной разности через 0 в районе вероятности ошибки 0,25 – 0,45.

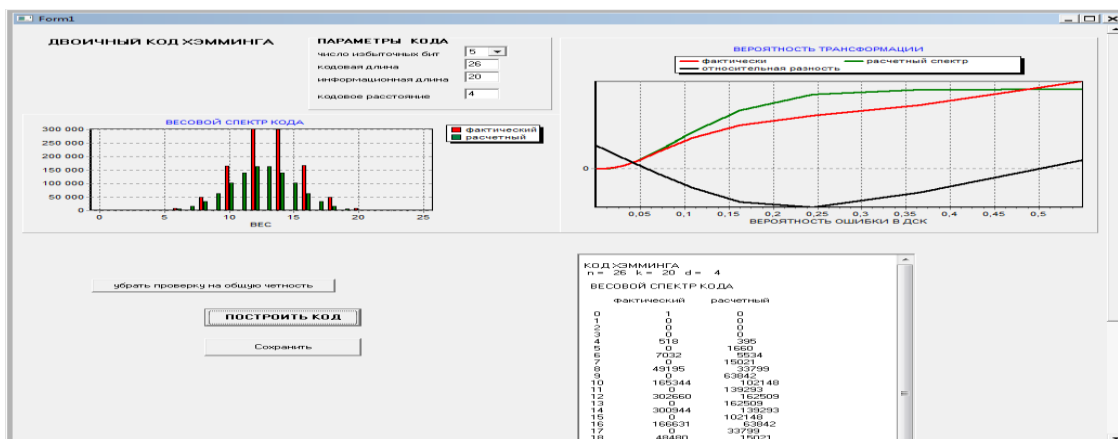


Рис. 9. Результаты расчёта вероятности трансформации для расширенного укороченного (26,20)-кода

При дальнейшем увеличении кодовой длины максимальное значение относительной разности снижается до 23 %. Переход через 0 наблюдается на интервале вероятности ошибки 0,05 – 0,5, причем абсолютное значение относительной разности достигает 40 %, как представлено на рис. 9.

Очевидно, при использовании расширенных кодов расчет по приближенному соотношению для определения весового спектра неприменим.

Представленные результаты свидетельствуют о целесообразности расчета весового спектра кодов Хэмминга по построенному кодовому множеству. Использование приближенного соотношения для расчета спектра вызывает ошибку в оценке вероятности трансформации до 70 %. Наибольшие значения относительной разности наблюдаются для коротких, укороченных и расширенных кодов.

Литература

1. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979. 744 с.
2. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.
3. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 1986. 576 с.
4. Вернер М. Основы кодирования. М.: Техносфера, 2004. 288 с.

Reference

1. Mc-Williams F.J., Sloan N.J.A. The theory of error-correcting codes. Moscow. Svyaz Publ., 1979. 744 p. (in Russian).
2. Peterson W., Weldon E. Error-Correcting Codes. Moscow. Mir Publ., 1976. 594 p. (in Russian).
3. Blachut R. Theory and practice of error control codes. Moscow. Mir Publ., 1986. 576 p. (in Russian).
4. Werner M. Information und Codierung. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2004. 288 p. (in Russian).

Статья поступила 11 мая 2025 г.

Информация об авторах

Акулов Валерий Семёнович – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий Военно-морского флота, корабельных комплексов и средств обмена информацией и разведки (НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р) НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542 90 54.

Узрик Лариса Николаевна – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542 90 54.

Дяченко Антон Николаевич – Заместитель начальника научно-исследовательского отделения. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)313 13 17. E-mail: inteltech@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Estimation of the transformation probability of binary Hamming codes

V. A. Akulov, L. N. Ugrik, A. N. Dyachenko

Annotation. Currently, there are many linear block codes used in the construction of cascade code structures with a high ability to detect and correct errors. However, in solutions that require minimizing computational complexity, low power consumption, and high speed, Hamming coding is still relevant. To achieve optimal characteristics of cascade code structures, it is necessary to accurately evaluate the parameters of individual components. **The purpose** of the work is to evaluate the accuracy of calculating the probability of transformation for classical and modified Hamming codes, using various methods for calculating the weight spectrum of the code. An element of the **novelty** of the work is the simultaneous consideration of the classical Hamming code, as well as shortened and extended codes based on it. Evaluation of the effect of code modifications on the probability of information transformation (the undetected error probability) **Results:** using the developed program for calculating the values of the probability of transformation with different methods of calculating the spectrum of codeword weights, both for classical Hamming codes and for its shortened modifications, as well as extended codes, with the addition of the codeword to parity. The data were obtained, according to which a comparative analysis of the accuracy of the approximate method for calculating the weight spectrum of codewords and the calculation method by completely iterating through a set of codewords was carried out. An assessment of the influence of calculation methods on the obtained value of the probability of transformation is given. **Practical relevance:** the results obtained can be used by developers to optimize the choice of codes in the designed systems, including those with resource constraints.

Keywords: probability of transformation, weight spectrum of the code, binary symmetric channel, Hamming code, extended Hamming code, shortened Hamming code

Information about Authors

Akulov Valery Semenovich – Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7 (812)542 90 54.

Ugrik Larisa Nikolaevna – Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7(812)542 90 54.

Dyachenko Anton Nikolaevich – Deputy the head of the research department. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)313 13 17. E-mail: inteltech@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya St. 8.

Для цитирования:

Акулов В. С., Угрик Л. Н., Дяченко А. Н. Оценка вероятности трансформации двоичных кодов Хэмминга // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 48-55. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-48-55.

For citation:

Akulov V. S., Ugrik L. N., Dyachenko A. N. Estimation of the transformation probability of binary Hamming codes Means of communication equipment. 2025. No. 2 (170). Pp. 48-55 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-48-55.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ.
СБОР, ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-56-64

**Анализ шумовых характеристик устройств цифровой обработки
и воспроизведения сигналов**

Буткевич Ю. Р.

Аннотация. Статья посвящена оценке влияния шумов на устройства цифровой обработки и воспроизведения сигналов систем передачи информации. Рассматривается элемент стенда, выполняющий аналого-цифровое преобразование и цифровую обработку сигналов с добавлением помех, а также их воспроизведение на несущей частоте. Особое внимание уделяется влиянию шумов на точность воспроизведения сигналов. **Постановка задачи и цель** данной статьи является анализ и оценка шумовых характеристик, которые появляются при преобразовании аналоговых сигналов в цифровые. Их последующей цифровой обработке и воспроизведении на несущей частоте в радиоэлектронных системах передачи информации. **Методы:** исследование выполнено с использованием полунатурного моделирования, что позволило воспроизвести условия, близкие к реальным. **Полученные результаты:** рассмотрены основные типы шумов: тепловые шумы, фликкер-шум и шум квантования, а также их влияние на точность и достоверность воспроизведения сигналов. Проведено моделирование шумовых процессов в среде MATLAB, построены гистограммы распределения амплитуд для различных реализаций шумов, выявлены особенности их статистических характеристик. Установлено, что распределения амплитуд демонстрируют сходство с нормальным законом, однако имеют отличия, связанные с композицией шумов и ограниченностью числа реализаций. В результате доказано, что точность воспроизведения смесей сигналов и помех ограничена влиянием шумов, нелинейностей и инерционности устройств, что приводит к дополнительным искажениям. **Практическая значимость** работы заключается в возможности применения полученных результатов для повышения эффективности оцифровки и цифровой обработки сигналов в радиоэлектронных системах передачи информации, а также для совершенствования методов моделирования и анализа шумовых характеристик.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, радиоэлектронные системы передачи информации, фликкер-шум, цифровая обработка сигналов, шумовые характеристики, электромагнитные помехи.

Введение

В условиях стремительного развития информационных технологий надежность и качество систем передачи информации становятся критически важными для обеспечения эффективной связи. Одной из основных проблем, с которой сталкиваются инженеры и исследователи, является влияние шумов, способных существенно ухудшать качество цифровой обработки и воспроизведения сигналов. Полунатурное моделирование представляет собой мощный инструмент для оценки и анализа воздействия шумовых, внутрисистемных и преднамеренных помех на работу систем передачи информации, позволяя проводить испытания в условиях, близких к реальным.

Полунатурное моделирование сочетает в себе элементы численного и экспериментального подходов, что дает возможность исследовать системы без необходимости полного физического развертывания всех компонентов. Такой подход позволяет значительно сократить время разработки, снизить затраты на создание прототипов и улучшить качество анализа. Важно отметить, что шумы могут возникать из различных источников и оказывать многообразное влияние на системы передачи информации, включая тепловые шумы, электромагнитные помехи и фликкер-шум [1-3].

Стенд полунатурного моделирования позволяет воспроизводить воздействие различных факторов на радиоэлектронные системы передачи информации (РСПИ). В то же время, воспроизведение смесей сигналов, помех возможно с конечной точностью ввиду влияния шумов, нелинейностей и инерционности устройств.

В данной статье рассматривается ключевой элемент стенда полунатурного моделирования, предназначенный для выполнения ряда операций, связанных с обработкой сигналов в условиях, приближенных к реальным. Этот элемент выполняет оцифровку входных сигналов, поступающих на выход радиопередающего устройства РСПИ. После преобразования аналогового сигнала в цифровую форму осуществляется его дальнейшая цифровая обработка, включающая добавление различных сигналов и помех с заданными характеристиками.

Важно отметить, что воспроизведение смесей сигналов и помех возможно только с конечной точностью, что также обусловлено влиянием шумов, и нелинейностями и инерционностями устройств. Эти факторы могут приводить к дополнительным искажениям и затруднениям в точном воспроизведении требуемых характеристик выходного сигнала [4-8].

Результатом обработки является формирование выходной смеси сигналов и помех, которая воспроизводится на заданной несущей частоте. Полученная смесь затем подается на вход приемного устройства для моделирования его работы в условиях реальной сигнально-помеховой обстановки.

Целью статьи является оценка шумовых характеристик, возникающих при аналого-цифровом преобразовании, цифровой обработке и воспроизведении на несущей частоте сигналов радиосистем передачи информации.

Основные типы шумов устройств цифровой обработки и воспроизведения сигналов

Шумы могут возникать из различных источников и влиять на устройства цифровой обработки и воспроизведения сигналов.

Тепловые шумы, также известные как шум Джонсона-Найквиста, представляют собой случайные флуктуации напряжения или тока, возникающие в проводниках и резисторах из-за теплового движения носителей заряда (электронов). Эти шумы присутствуют во всех электронных устройствах и могут существенно влиять на качество сигналов [9-10].

Основные характеристики:

- 1) Причина возникновения: тепловые шумы возникают при температуре выше абсолютного нуля (0 K) из-за хаотического движения электронов.
- 2) Спектральная плотность: мощность теплового шума равномерно распределена по частоте и описывается формулой Найквиста:

$$S(f) = 4kTR,$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура в Кельвинах, R – сопротивление.

Методы снижения тепловых шумов:

- 1) Охлаждение компонентов для уменьшения температуры.
- 2) Использование низкоомных резисторов.
- 3) Применение фильтров для сужения полосы пропускания.

Фликкер-шум, также известный как $1/f$ шум или фликкерный шум, представляет собой электронный шум, который наблюдается в большинстве аналоговых электронных устройств. Он характеризуется обратно пропорциональной зависимостью спектральной плотности мощности от частоты, что означает, что мощность сигнала уменьшается с увеличением частоты.

В общем виде спектральная плотность мощности $S(f)$ фликкер-шума может быть представлена как:

$$S(f) = \frac{k}{f^a},$$

где a – показатель степени, обычно равный 1 для фликкер-шума, k – размерная константа (в зависимости от конкретного устройства или системы).

Если говорить о времени, то фликкер-шум может быть представлен как процесс, у которого автокорреляционная функция зависит от времени и имеет свойства, которые сохраняются на различных временных масштабах. Временная зависимость фликкер-шума может быть описана как:

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) + n(t),$$

где $x(t)$ – сигнал фликкер-шума во времени, A – амплитуда сигнала, f_0 – основная частота, φ – начальная фаза, $n(t)$ – компонент фликкер-шума, обратно пропорциональный частоте ($1/f$).

Автокорреляционная функция фликкер-шума описывается как:

$$R(\tau) \approx \frac{1}{|\tau|^\beta},$$

где $R(\tau)$ – автокорреляционная функция, τ – временной интервал, β также равен 1 для фликкер-шума.

Шум квантования – это важный аспект цифровой обработки сигналов, который возникает в процессе преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

Когда аналоговый сигнал преобразуется в цифровую форму, он проходит через процесс, называемый квантованием. Этот процесс включает в себя округление непрерывных значений сигнала до ближайших дискретных уровней. В результате этого округления происходит потеря информации, что приводит к искажению оригинального сигнала. Эти искажения и представляют собой шум квантования.

Шум квантования возникает по нескольким причинам:

В большинстве систем квантования количество доступных уровней ограничено. Это означает, что любой аналоговый сигнал, который находится между двумя уровнями, будет округлен до ближайшего уровня, что приводит к ошибкам.

Различные методы округления (например, округление вверх или вниз) могут приводить к различным уровням ошибок в зависимости от характеристик сигнала.

Шум квантования можно формально описать как разницу между истинным значением сигнала и его квантованным представлением. Если обозначить входной сигнал как $d(nT)$, то шум можно выразить следующим образом:

$$e(nT) = F[d(nT)] - d(nT),$$

где F – функция квантования.

При равномерном квантовании максимальные границы шума могут быть оценены как:

$$|max[e(nT)]| = \frac{1}{m} 2^{(-b)} = \frac{1}{m} Q,$$

где b – количество разрядов квантования, а Q – шаг квантования.

Результаты моделирования

На основе анализа воздействующих шумов на сигналы, формирующие при полунатурном моделировании, построена структурная схема модели, позволяющей выполнить оценку результирующих шумов, которая приведена на рис. 1.

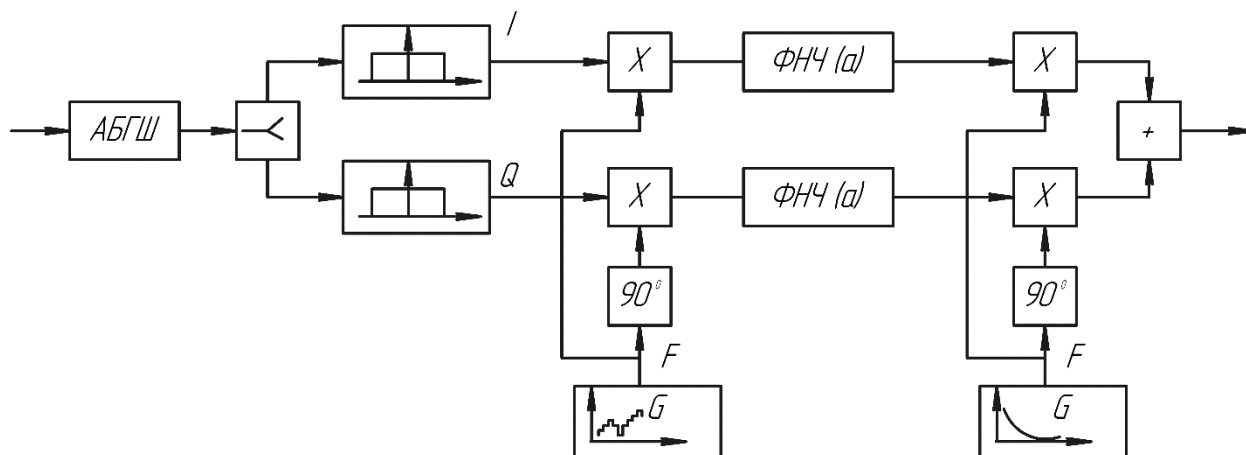


Рис. 1. Структурная схема формирования шумов

В соответствии со структурной схемой на проходящий сигнал влияют следующие шумы: аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), шумы квантования, нелинейные шумы при прохождении фильтра низких частот, фликкер-шумы, шумы квантования.

Приведем сигнал с АБГШ

$$y(t) = x(t) + N(t). \quad (1)$$

Результат прохождения фильтра:

$$y_I(t) = \int_0^{\tau} h_I(t) \frac{y(t-\tau)}{2} dt, \quad (3)$$

$$y_Q(t) = \int_0^{\tau} h_Q(t) \frac{y(t-\tau)}{2} dt. \quad (4)$$

Сигнал после АЦП:

$$Y_I[nT] = \frac{\text{ent}[N_{AYI}(t)]}{N_A} \Big|_{t=nT}, \quad (5)$$

$$Y_Q[nT] = \frac{\text{ent}[N_{AYQ}(t)]}{N_A} \Big|_{t=nT}, \quad (6)$$

где N_A – число градаций амплитуд аналого-цифрового преобразователя (АЦП), $Y_I, Y_Q \in \text{int16}$

Выход цифрового генератора:

$$C[nT] = \text{Cos } \varphi[nT], \quad (7)$$

$$S[nT] = \text{Sin } \varphi[nT]. \quad (8)$$

Выход первых множителей

$$Y_I[nT] = Y_I[nT] \cdot C[nT], \quad (9)$$

$$Y_Q[nT] = Y_Q[nT] \cdot S[nT]. \quad (10)$$

Далее идет стандартный фильтр нижних частот (ФНЧ) и квадратурный модулятор.

$$S_I(t) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} Y_I[nT] \cdot \text{sinc}\left(\frac{t-nT}{T}\right) \right) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (11)$$

$$S_Q(t) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} Y_Q[nT] \cdot \text{sinc}\left(\frac{t-nT}{T}\right) \right) \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (12)$$

Моделирование предложенной схемы генерации шумовых процессов было выполнено в программной среде *MATLAB* с использованием встроенных инструментов цифровой обработки сигналов. Результаты эксперимента, включающие гистограммы

распределения амплитуд для двух статистически независимых реализаций шумового процесса на временных интервалах $T_1 = 2.4$ мкс, $T_2 = 6$ мкс и $T_3 = 17$ мкс $T_4 = 60$ мкс при частоте дискретизации 96 МГц, визуализированы на рис. 2 и рис. 3.

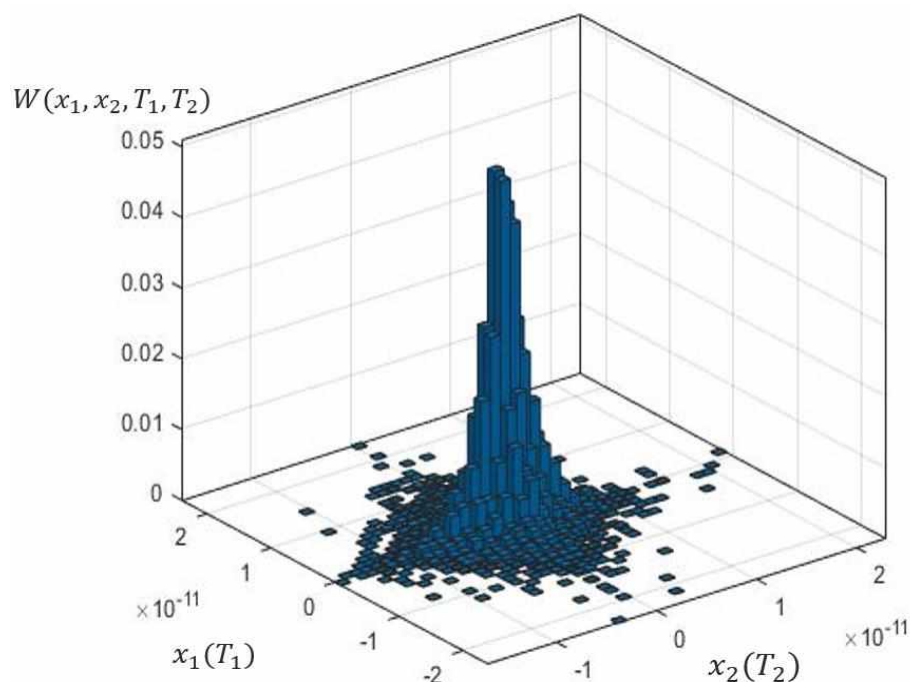


Рис. 2. Гистограмма для реализаций в моменты T_1 и T_2

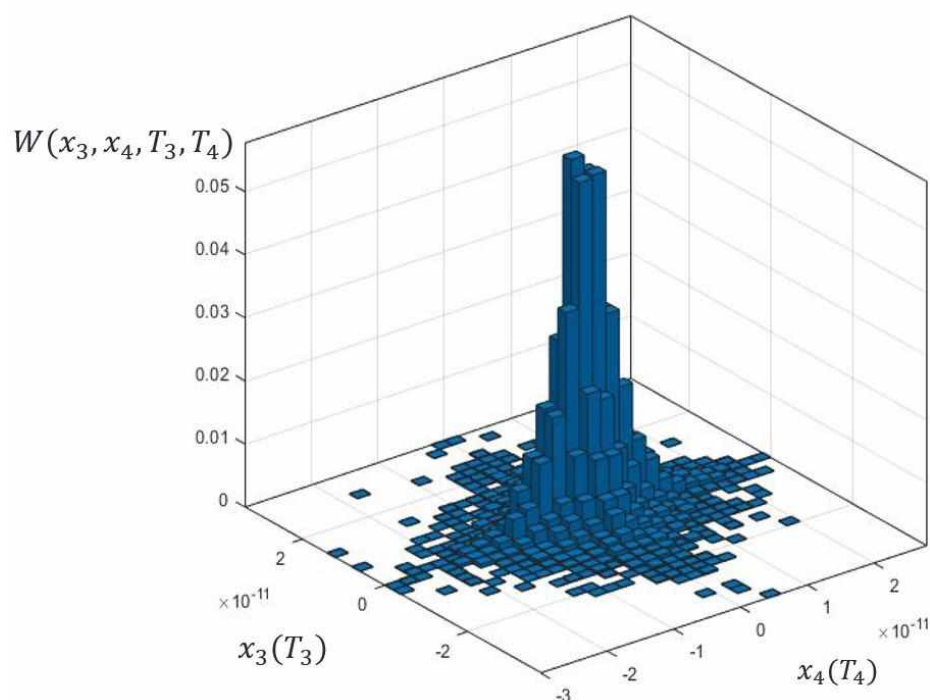


Рис. 3. Гистограмма для реализаций в моменты T_3 и T_4

Гистограммы, полученные для различных реализаций шумового процесса, демонстрируют сложный характер распределения амплитуд. При этом наблюдается определенное внешнее сходство с нормальным (гауссовым) распределением, что выражается в наличии выраженного максимума в центральной области и симметричном убывании плотности вероятности к краям. Однако, в отличие от гауссовского распределения,

экспериментальные гистограммы имеют сечения, отличные от эллипса, обусловленные влиянием различных факторов, включая сложной схемы композиции шумов, ограниченность числа реализаций и особенности используемых методов обработки.

На основе результатов моделирования схемы формирования шумов, выполненного в среде *MATLAB*, был проведен анализ статистического распределения полученных шумовых процессов. В частности, для оценки вероятности попадания реализаций шумового сигнала в заданные интервалы значений, построены гистограммы распределения. С целью обеспечения репрезентативности результатов, гистограммы построены для двух статистически независимых реализаций шумового процесса, охватывающих диапазон от минимального до максимального значения амплитуды сигнала. Общее число интервалов для каждой гистограммы установлено равным 100, что описывается следующей формулой:

$$P = \frac{N}{N_{points}}. \quad (11)$$

где $\Delta X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{100}$, $N = \sum_{i=0}^{99} \Delta X \cdot i \leq X < \Delta X \cdot (i+1)$, N_{points} – количество точек в реализации шума.

Для анализа сформированных шумовых процессов выполнено сравнение из полученных гистограмм распределения вероятностей, построенных на основе выборок реализаций с интервалом в 500 тактов. Данный подход позволяет оценить стационарность и эргодичность шумового процесса, а также выявить возможные зависимости между мгновенными и усредненными статистическими характеристиками. Результат представлен на рис. 4.

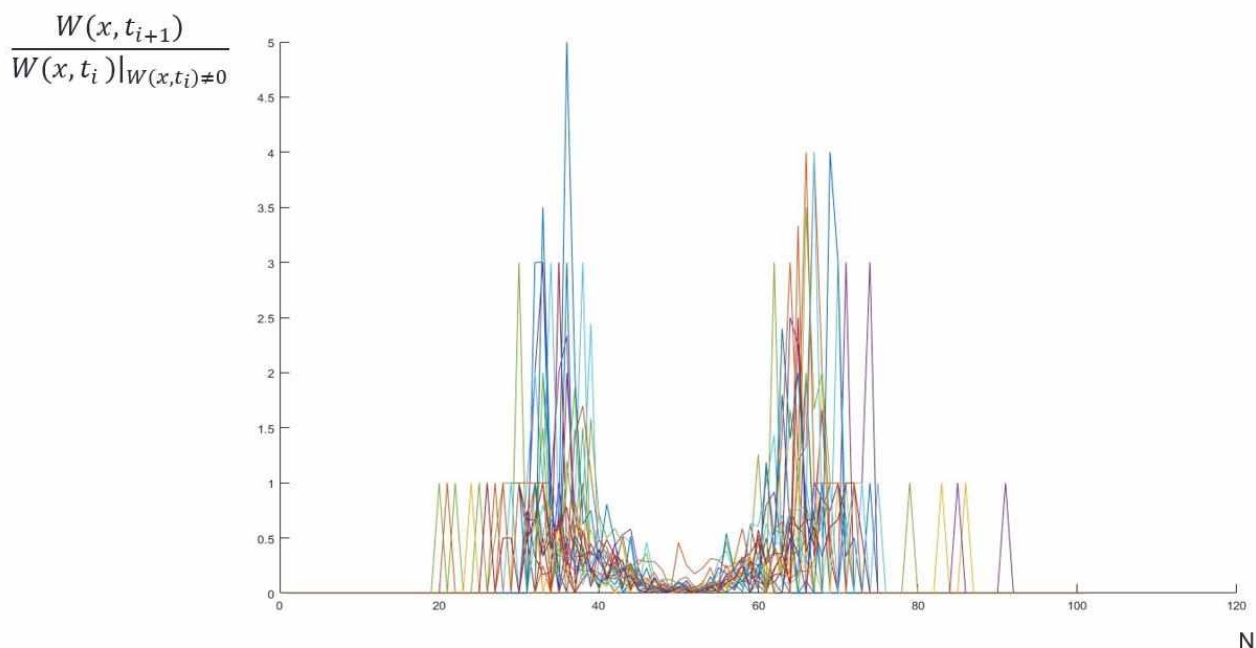


Рис. 4. Отношения гистограмм вероятностей для интервала в 500 тактов

На основании проведенного анализа полученных гистограмм вероятностей и сравнительных оценок реализаций шумового процесса можно сделать вывод о нестационарности шумового процесса, проявляющейся в изменении оценок гистограмм и статистических характеристик во времени, что связано с влиянием композиции шумов и особенностями алгоритма формирования сигналов.

Заключение

В ходе работы рассмотрен ключевой элемент стенда полунатурного моделирования, выполняющий оцифровку входных сигналов радиоэлектронных систем передачи информации, их цифровую обработку с добавлением сигналов и помех, а также воспроизведение на несущей частоте.

Установлено, что воспроизведение смесей сигналов и помех происходит с конечной точностью, обусловленной влиянием различных факторов, включая шумы (тепловые, фликкер-шум, шум квантования), а также нелинейности и инерционность устройств. Эти факторы приводят к искажениям, которые необходимо учитывать при разработке и анализе РСПИ.

Полученные результаты и предложенные методы могут быть использованы для повышения эффективности при оцифровке, цифровой обработке и воспроизведении на несущей частоте сигналов радиосистем передачи информации.

Автор выражает признательность профессору Логинову С.С. за обсуждение и критические замечания по статье.

Литература

1. Абрамов А. Ю. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. М.: Радио и связь, 2000. 320 с.
2. Оппенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.
3. Васильев К. К. Анализ и моделирование шумовых характеристик электронных устройств. М.: Энергия, 1985. 192 с.
4. Яруллин Р. Р., Сивинцева О. А., Раупов Р. Р., Буткевич Ю. Р. Этапы разработки стенда полунатурного моделирования // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2023: материалы X Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Казань, 13–15 апреля 2023 г.). Казань, 2023. С. 211–212.
5. Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Смолин А. Ю., Яруллин Р. Р. Методы моделирования в создании систем и средств вторичной радиолокации // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 69–76. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-69-76.
6. Логинов С. С., Буткевич Ю. Р., Сивинцева О. А. Тестирование генераторов псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца // Инфокоммуникационные технологии. 2023. Т. 21, № 2. С. 7–12. DOI 10.18469/ikt.2023.21.2.01.
7. Савенко М. А., Буткевич Ю. Р., Раупов Р. Р. Анализ методов генерации псевдослучайных чисел // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, (г. Казань, 09–10 ноября 2023 г.). Казань. 2023. С. 1366–1372.
8. Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Яруллин Р. Р. Стенд полунатурного моделирования условий функционирования асинхронных радиосистем с пространственной адресацией // XI Международная молодежная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы. (г. Казань, 11–12 апреля 2024 г.). Казань, 2024. С. 63–67.
9. Коэффициент шума: оценка шумовых характеристик взаимодействия гармонического колебания с аддитивным и мультипликативным шумом оптоэлектронных компонентов // Уральский радиотехнический журнал. 2024. № 3. С. 45–53.

10. Румянцев К., Лемешко Н. Измерения фазовых шумов импульсных сигналов с использованием анализаторов фазового шума R&S FSWP. Часть 1. // Современная электроника. 2020. № 5. С. 48-53.

References

1. Plotnitskaya E. S., Veremyev V. I., Vorobyov E. N. Teoreticheskaya model' signala, otrazhennogo ot vrashchayushchihsvy vintov vertoleta [Theoretical model of a signal reflected from rotating helicopter rotors]. Doklady 22-j mezhdunarodnoj konferencii DSPA2020 [Proceedings of the 22-nd international conference DSPA-2020]. IEEE, 2020. Pp. 327-331. (In Russian)

2. Geister S. R., Nguyen T. T. Matematicheskie modeli radiolokacionnogo signala, otrazhennogo ot nesushchego vinta vertolet, v prilozhenii k obrashchennomu sintezu apertury [Mathematical models of a radar signal reflected from a helicopter main rotor as applied to inverse aperture synthesis]. Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika [Bulletin of Russian Universities. Radio Electronics]. 2019. V. 22. No. 3. Pp. 74-87. (In Russian)

3. Poonle A. A., and Owolabi O. J. Path Loss Modelling Of UHF Radio Wave Propagation in Ado-Ekiti, Nigeria. ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD), 2019. V. 2 (1). Pp. 90-102.

4. Yarullin R. R. Sivintseva O. A. Raupov R. R. Butkevich Yu. R. Etapy razrabotki stenda polunaturnogo modelirovaniya [Stages of Development of a Hardware-in-the-Loop Modeling Stand] Prikladnaya elektrodinamika fotonika i zhivye sistemy 2023 Materialy X Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh aspirantov i studentov Kazan 13–15 aprelya 2023 Kazan 2023 Pp 211-212. (in Russian).

5. Butkevich Yu. R. Loginov S. S. Smolin A. Yu. Yarullin R. R. Modeling methods in the creation of secondary radar systems and means. Communication equipment. 2024. No. 4 (168). Pp 69-76. DOI 10.24412/2782-2141-2024-4-69-76 (in Russian).

6. Loginov S. S. Butkevich Yu. R. Sivintseva O. A. Testing pseudo random signal generators based on the Lorenz system. Infocommunication technologies. 2023. Vol. 21. No. 2. Pp 7-12. DOI 10.18469/ikt.2023.21.2.01 (in Russian).

7. Savenko M. A. Butkevich Yu. R. Raupov R. R. Analiz metodov generatsii psevdosluchaynykh chisel [Analysis of Methods for Generating Pseudorandom Numbers] XXVI Tupolevskie chteniya shkola molodykh uchenykh Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii [XXVI Tupolev Readings School of Young Scientists Proceedings of the International Youth Scientific Conference] Kazan November 9–10 2023 Kazan 2023 Pp 1366-1372. (in Russian).

8. Butkevich Yu. R. Loginov S. S. Yarullin R. R. Stend polunaturnogo modelirovaniya usloviy funktsionirovaniya asinhronnykh radiosistem s prostranstvennoy adresatsiey [Hardware-in-the-Loop Modeling Stand for Functioning Conditions of Asynchronous Radio Systems with Spatial Addressing] Prikladnaya elektrodinamika fotonika i zhivye sistemy 2024 XI Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh aspirantov i studentov Applied Electrodynamics Photonics and Living Systems 2024 April 11–12 Kazan Russia (in Russian).

9. Koefitsient shuma otsenka shumovykh kharakteristik vzaimodeystviya garmonicheskogo kolebaniya s additivnym i multiplikativnym shumom optoelektronnykh komponentov [Noise Figure Evaluation of Noise Characteristics of Interaction of Harmonic Oscillation with Additive and Multiplicative Noise of Optoelectronic Components] Uralskiy radiotekhnicheskii zhurnal Ural Radio Engineering Journal 2024 No 3 Pp 45-53. (in Russian).

10. Rumyantsev K., Lemeshko H. Measurement of Pulse Signal Phase Noise Using R&S FSWP Noise Analyzerse. Part 1. Modern Electronics. 2020. No. 5. Pp. 48-53 (in Russian).

Статья поступила 12 мая 2025 г.

Информация об авторе

Буткевич Юрий Рудольфович – аспирант кафедры «электронных квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ)» «Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ». Область научных интересов: полунатурное моделирование, динамических хаос. Тел.: +7 986 929 15 91. E-mail: bytkevic@mail.ru

Адрес: Россия, Республика Татарстан, 420029, г. Казань, ул. Журналистов. д. 50.

Analysis of noise characteristics of digital signal processing and reproduction devices

Yu. R. Butkevich

Annotation. The article is devoted to the assessment of the influence of noise on digital signal processing and reproduction devices of information transmission systems. The stand element performing analog-to-digital conversion and digital processing of signals with the addition of interference, as well as their reproduction at the carrier frequency, is considered. Particular attention is paid to the influence of noise on the accuracy of signal reproduction. **The problem statement and the purpose** of this article is the analysis and assessment of noise characteristics that appear during the conversion of analog signals to digital, their subsequent digital processing and reproduction at the carrier frequency in radio-electronic information transmission systems. **Methods:** the study was carried out using semi-naturalistic modeling, which made it possible to reproduce conditions close to real ones. **Results:** the main types of noise are considered: thermal noise, flicker noise and quantization noise, as well as their influence on the accuracy and reliability of signal reproduction. Noise processes were modeled in the MATLAB environment, histograms of the amplitude distribution for various noise implementations were constructed, the features of their statistical characteristics were revealed. It was found that the amplitude distributions demonstrate similarity with the normal law, but have differences associated with the composition of noise and the limited number of implementations. As a result, it was proven that the accuracy of reproduction of signal and interference mixtures is limited by the influence of noise, nonlinearities and inertia of devices, which leads to additional distortions. **The practical significance** of the work lies in the possibility of using the obtained results to improve the efficiency of digitization and digital processing of signals in electronic data transmission systems, as well as to improve the methods of modeling and analyzing noise characteristics.

Keywords: semi-naturalistic modeling, noise, electronic data transmission systems (EDTS), flicker noise, digital signal processing, noise characteristics, electromagnetic interference.

Information about the author

Butkevich Yuri Rudolfovich - postgraduate student at the Department of "Electronic quantum means of information transmission EQMIT» "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI", scientific director Loginov S.S. Research interests: Semi-natural modeling, dynamic chaos. Tel.: 89869291591. E-mail: bytkevic@mail.ru

Address: Russia, Republic of Tatarstan, 420029, Kazan, Zhurnalistov Street 50.

Для цитирования:

Буткевич Ю. Р. Анализ шумовых характеристик устройств цифровой обработки и воспроизведения сигналов // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 56-64.
DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-56-64.

For citation:

Butkevich Yu. R. Analysis of noise characteristics of digital signal processing and reproduction devices. Means of Communication equipment. 2025. No. 2 (170). Pp. 56-64 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-56-64.

О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Лобеев Д. П., Билятдинов К. З., Гриценко А. А.

Аннотация. *Цель работы:* по результатам исследования особенностей возникновения эффекта Доплера в цифровых системах технологической радиосвязи стандарта LTE 1800 TDD на железнодорожном транспорте с применением технологии OFDM при разных модуляциях сигнала на высоких скоростях (свыше 400 км/ч) разработать способ компенсации негативных влияний доплеровского сдвига частоты. **Новизна:** предлагается компенсировать доплеровский сдвиг частоты на скоростях свыше 400 км/ч для стабильной работы в условиях железнодорожного транспорта за счет введения задержки на переключение между базовыми станциями линейной сети, тем самым позволив уменьшить скачок Доплеровской частоты. **Результаты:** промоделирована работа сети при разных модуляциях на скоростях 400 км/ч, показаны изменения угла поворота сигнального созвездия, сделаны выводы о работе сети при разных модуляциях на скоростях свыше 400 км/ч, предложен способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера на работу системы при скоростях свыше 400 км/ч. По результатам исследования сделан вывод, что работоспособность радиоканала с модуляцией QAM64 на скорости 400 км/ч без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна, с модуляцией QAM16 без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна, с модуляцией QPSK без компенсации эффекта Доплера в сигнале возможна. Для исключения скачкообразного изменения доплеровской частоты целесообразно процедуру Handover (хэндовер) проводить за несколько секунд до прохода основной (сигнальной) базовой станции. Скорость передачи данных в сети LTE ограничивается энергетикой, полосой и, что особенно характерно при TDD, – внутрисистемными помехами. Для снижения уровня помех в такой сети необходимо либо использовать набор более малых полос, либо работать в одной полосе, но в синхронном режиме. **Практическая значимость:** предложенный способ позволяет в значительной степени компенсировать негативное влияние эффекта Доплера на высокоскоростных магистралях в условиях ограниченного частотного ресурса линейной сети на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, доплеровский сдвиг частоты, компенсация эффекта Доплера, модуляция сигнала, радиосвязь, эффект Доплера.

Введение

Основной особенностью радиоканалов широкополосной радиосвязи LTE является применение технологии OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) [1-2].

Технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида (1):

(1)

Преимуществами технологии OFDM являются способность борьбы с межсимвольной интерференцией и узкополосными помехами, а также возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих и др.

Недостатки технологии OFDM:

- 1) синхронизация по времени и частоте;
- 2) чувствительность к эффекту Доплера.

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-позиционной квадратурной фазовой (QPSK), 16- или 64- позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QAM16 или QAM64). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит. Модель радиосигнала QAM в общем виде описывается выражениями (2) и (3):

(2)

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_p t) + Q(t) \sin(2\pi f_p t), \quad (3)$$

где $I(t)$ – синфазная составляющая комплексной огибающей радиосигнала, $Q(t)$ – её квадратурная составляющая, f_p – частота поднесущей [3].

При этом на практике особую актуальность приобретает направление по разработке и внедрению различных способов противодействия возникновению эффекта Доплера в цифровых системах технологической радиосвязи стандарта *LTE 1800 TDD* на железнодорожном транспорте при разных модуляциях сигнала на высоких скоростях (свыше 400 км/ч) [1-3].

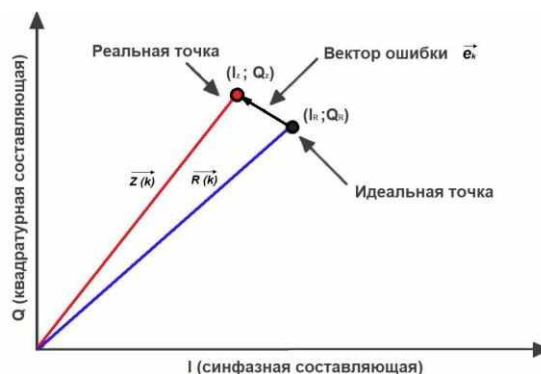


Рис. 1. Графическое представление вектора ошибки для точки сигнального созвездия

Возможность успешной демодуляции символов поднесущей на приемной стороне определяется по величине вектора ошибки $\vec{e}$.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация вектора ошибки, показывающего величину отклонения реального измеренного вектора $Z(k)$ точки сигнального созвездия от идеального положения точки с опорным вектором $R(k)$. Q_R , I_R и Q_z , I_z – проекции на синфазную и квадратурную ось опорного вектора и реального вектора точки сигнального созвездия, соответственно.

Величину вектора ошибки можно выразить следующей формулой (4):

(4)

Величина вектора ошибки $\vec{e}_k$ для успешной демодуляции символов поднесущей не должна превышать половины длины кодового расстояния d между соседними точками сигнального созвездия.

Расстояние d между соседними точками в системе квадратурной фазово-амплитудной модуляции *QAM* и *QPSK*, с нормированной к единице пиковой амплитудой и числом уровней L может быть представлено в виде (5):

$$d = \frac{\sqrt{2}}{L-1} . \quad (5)$$

Число уровней L для модуляций *QPSK*, *QAM16*, *QAM64* составляет соответственно 2, 4 и 6. Кодовое расстояние d для модуляций *QPSK*, *QAM16* и *QAM64* составляет соответственно $\frac{2}{\sqrt{2}}$, $\frac{\sqrt{2}}{3}$ и $\frac{\sqrt{2}}{5}$.

Таким образом, постановка задачи исследования будет заключаться в разработке способа компенсации негативных влияний доплеровского сдвига частоты в технологических сетях радиосвязи стандарта *LTE 1800 TDD* на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Необходимо разработать способ с учётом особенностей обеспечения радиосвязи стандарта *LTE 1800 TDD* на железнодорожном транспорте. Далее в основной части приведено краткое содержание этапов решения задачи исследования.

Основная часть

1. Моделирование работы сети при разных модуляциях

QPSK модуляция строится на основе кодирования двух бит передаваемой информации одним символом. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

На рис. 2 на векторной диаграмме модуляции *QPSK* показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию дибита (11) при сближении приемного передающего устройства.



Рис. 2. Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «11» на векторной диаграмме модуляции *QPSK* (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины вектора ошибки (не более $\frac{1}{\sqrt{2}}$)

В 16-позиционной *QAM* (*QAM16*) существует по четыре сигнальных значения для каждой из квадратурных компонент I и Q . Этим достигаются шестнадцать значений суммарного сигнала.

Зная, что $16 = 2^4$, получаем, что в *QAM16* одним символом могут быть переданы четыре бита. Это означает, что символьная скорость в таком виде модуляции получается в четыре раза меньше битовой, т. е. равна $\frac{1}{4}$ от битовой скорости. Таким образом, указанный тип модуляции позволяет организовать спектрально более эффективную передачу данных, чем при модуляции *QPSK*. [4-7].

На рис. 3 на векторной диаграмме модуляции *QAM16* показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию точки сигнального созвездия «1000» при сближении приемного передающего устройства.

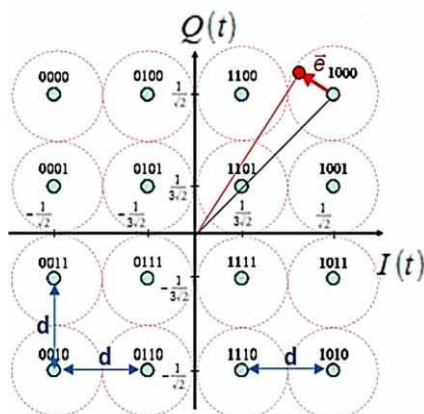


Рис. 3. Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «1000» на векторной диаграмме модуляции *QAM16* (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины вектора ошибки (не более $\frac{1}{3\sqrt{2}}$)

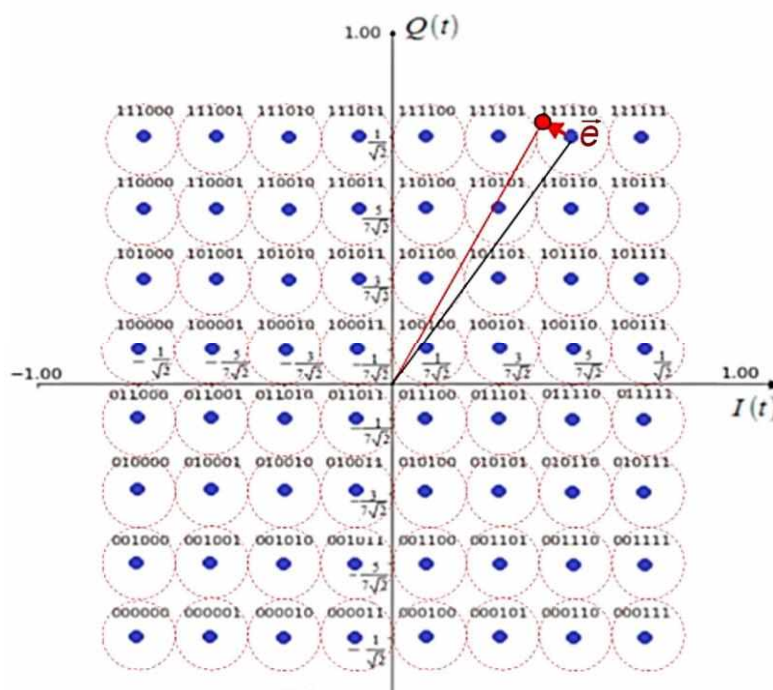


Рис. 4. Влияние эффекта Доплера на позицию точки сигнального созвездия «111110» на векторной диаграмме модуляции QAM_{64} (теоретическое) с указанием кодового расстояния d и предельных границ значений величины вектора ошибки (не более $\frac{1}{5\sqrt{2}}$)

В 64-позиционной QAM (QAM_{64}) одним символом могут быть переданы 6 бит. На рис. 4 на векторной диаграмме модуляции QAM_{64} показано влияние эффекта Доплера (теоретическое) на позицию точки сигнального созвездия «111110» при сближении приемного передающего устройства.

Значения синфазной Q_z и квадратурной I_z составляющих для каждой точки сигнального созвездия с учетом влияния эффекта Доплера определяется по формулам (6) и (7):

$$Q_z = \sqrt{Q_R^2 + I_R^2} \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_R}{I_R}\right) + \pi\varepsilon\right), \quad (6)$$

$$I_z = \sqrt{Q_R^2 + I_R^2} \frac{\sin(\pi\varepsilon)}{\pi\varepsilon} \sin\left(\arctan\left(\frac{Q_R}{I_R}\right) + \pi\varepsilon\right). \quad (7)$$

где ε – нормализованное смещение частоты, определяемое как Доплеровское смещение частоты f_d , деленное на интервал поднесущей Δf_d (для LTE составляет 15 кГц).

На рис. 5 представлено отклонение сигнального созвездия $QPSK$ от идеальных значений и матрица рассчитанных значений величин вектора ошибки $\vec{e}_k$, для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 400 км/ч. Как видно из рисунка, значение $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ не превышает значение $d_{QPSK}/2$ (0,707). Работоспособность радиоканала с модуляцией $QPSK$ без компенсации эффекта Доплера в сигнале возможна

$$\vec{e}_{QPSK} \begin{pmatrix} 0,277 & 0,277 \\ 0,277 & 0,277 \end{pmatrix}.$$

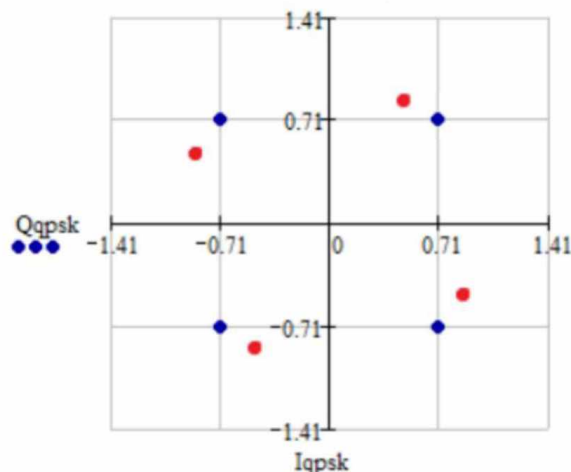


Рис. 5. Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия $QPSK$ от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

На рис. 6 представлено отклонение сигнального созвездия $QAM16$ от идеальных значений величин вектора ошибки $\vec{e}_k$ для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 400 км/ч. Как видно из рисунка значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ для точек созвездия «0000», «1000», «0010», «1010» превышают значение $\frac{d_{QAM16}}{2}$ (0,236). Работоспособность радиоканала с модуляцией $QAM16$ без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна.

$$\vec{e}_{QAM16} \rightarrow \begin{pmatrix} 0,277 & 0,206 & 0,206 & 0,277 \\ 0,206 & 0,092 & 0,092 & 0,206 \\ 0,206 & 0,092 & 0,092 & 0,206 \\ 0,277 & 0,206 & 0,206 & 0,277 \end{pmatrix}.$$

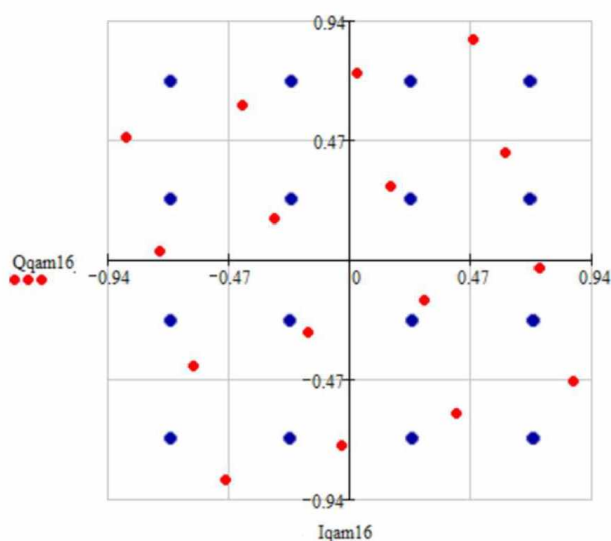


Рис. 6. Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия $QAM16$ от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи LTE диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

Расчеты показали, что значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ не превышают значений $\frac{d_{QAM16}}{2}$ для канала широкополосной радиосвязи *LTE* диапазона 1800 МГц при приближении поезда к базовой станции со скоростью 340 км/ч (величина $f_d = 566,5$ Гц).

Как видно из рисунка 7 значения $\vec{e}_k$ с учетом запаса $d/4$ для 52 точек созвездия из 64 превышают значение $\frac{d_{QAM64}}{2}$ (0,101). Работоспособность радиоканала с модуляцией *QAM64* на скорости 400 км/ч без компенсации эффекта Доплера в сигнале невозможна.

$$\vec{e}_{QAM64} = \begin{pmatrix} 0,277 & 0,241 & 0,213 & 0,198 & 0,198 & 0,213 & 0,241 & 0,277 \\ 0,241 & 0,198 & 0,163 & 0,143 & 0,143 & 0,163 & 0,198 & 0,241 \\ 0,213 & 0,163 & 0,119 & 0,088 & 0,088 & 0,119 & 0,163 & 0,213 \\ 0,198 & 0,143 & 0,088 & 0,04 & 0,04 & 0,088 & 0,143 & 0,198 \\ 0,198 & 0,143 & 0,088 & 0,04 & 0,04 & 0,088 & 0,143 & 0,198 \\ 0,213 & 0,163 & 0,119 & 0,088 & 0,088 & 0,119 & 0,163 & 0,213 \\ 0,241 & 0,198 & 0,163 & 0,143 & 0,143 & 0,163 & 0,198 & 0,241 \\ 0,277 & 0,241 & 0,213 & 0,198 & 0,198 & 0,213 & 0,241 & 0,277 \end{pmatrix}.$$

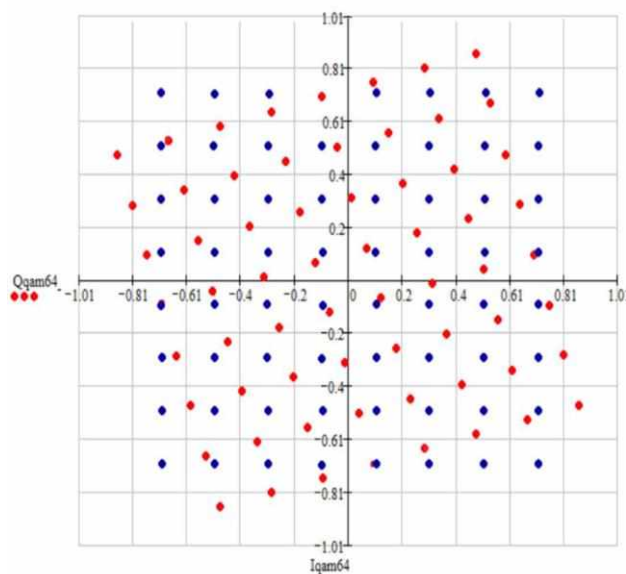


Рис. 7. Отклонение (красный цвет) сигнального созвездия *QAM64* от идеальных значений (синий цвет) для канала широкополосной радиосвязи *LTE* диапазона 1800 МГц на скорости сближения 400 км/ч

2. Способ компенсации негативного влияния эффекта Доплера

Рассмотрим следующий сценарий. На некотором контрольном участке железнодорожной магистрали расположим четыре базовых станции (БС). Среднее расстояние между БС примем равным 1500 м. Антенны БС разместим на высоте 25 м. Высоту положения антенны абонентской (локомотивной) станции (АС) примем равной 6 м. Так как мачты БС размещаются в полосе отвода, то расстояние от полотна железной дороги до БС примем равным 5 м. Скорость движения локомотива будем считать максимально возможной, численно равной 500 км/с. Поясняющая иллюстрация показана на рис. 8.



Рис. 8. Ситуационный план

Предположим, что выполнение процедуры хэндовера происходит по типовому сценарию, т. е. когда уровень сигнала от новой базовой станции превышает текущий уровень сигнала.

В данном случае это эквивалентно условию – переход на работу с БС, ближайшей по дальности. В этом случае участок хэндовера расположен примерно посередине между ближайшими БС. График изменения относительной дальности между абонентской (локомотивной) станцией и фокусом антенны ближайшей базовой станции представлен на рис. 9.

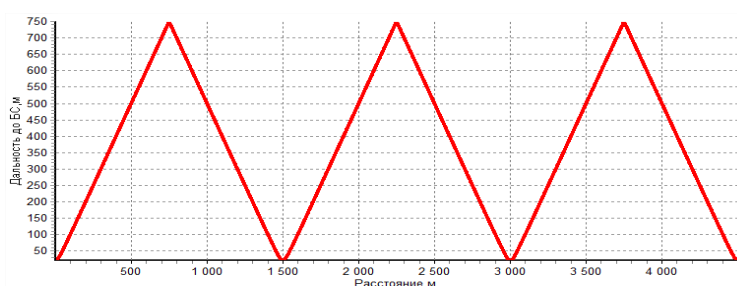


Рис. 9. График изменения дальности от абонентской (локомотивной) станции до ближайшей базовой станции

Доплеровский сдвиг частоты определяется радиальной скоростью между передатчиком и приемником. На рис. 10 представлен график изменения радиальной скорости между АС и БС в функции времени.

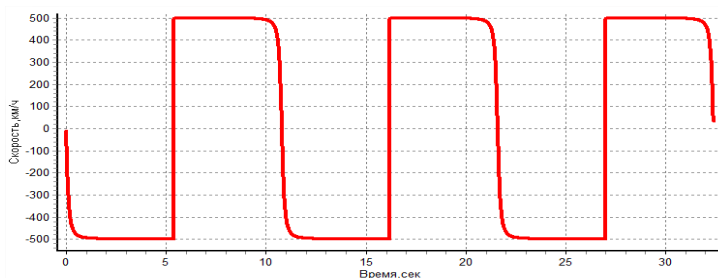


Рис. 10. График изменения относительной скорости между локомотивной АС и ближайшей базовой станции

Изменение радиальной дальности приводит к доплеровскому смещению частоты. Построим соответствующий график в предположении, что частота передатчика равна 1800 МГц. Результат показан на рис. 11.

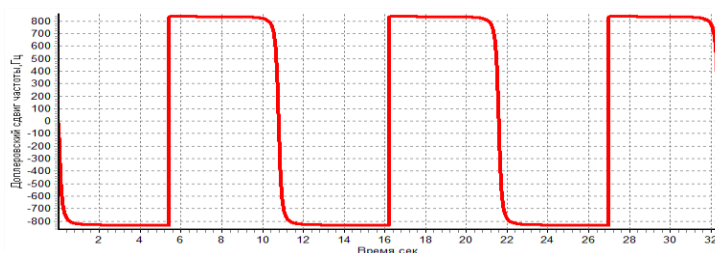


Рис. 11. График изменения доплеровского сдвига частоты (частота 1800 МГц)

На рис. 10 и 11 видно, что, во-первых, при выполнении процедуры хэндовера происходит скачок доплеровского сдвига частоты на удвоенное значение 833 Гц, т. е. почти на 1,7 кГц. Это видно на отметках времени 5 с., 16 с. и 27 с. Кроме того, резкое изменение доплеровского сдвига частот происходит и в моменты прохождения локомотивом очередной БС (на 11 с. и 22 с.). При этом собственно участки такого резкого изменения доплеровской частоты достаточно малы и составляют 2...3 с., а все остальное время доплеровский сдвиг постоянен и численно равен ± 833 Гц. Однако, в эти моменты высока вероятность потери канала, так как компенсация такого сдвига существенно усложняет аппаратную реализацию как БС, так и АС.

Для решения этой проблемы попробуем изменить положение участка хэндовера. Будем выполнять его в момент прохождения очередной базовой станции. Соответствующий график представлен на рис. 12.

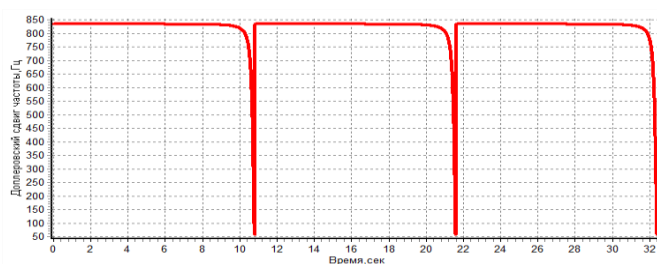


Рис. 12. График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хэндовера при прохождении очередной базовой станции (частота 1800 МГц)

Из рис. 12 видно, что практически на всем перегоне обеспечивается постоянная составляющая доплеровского сдвига частоты, за исключением коротких моментов при прохождении локомотива мимо БС, когда его значение падает с 833 Гц до нуля. Очевидно, что решить эту проблему можно, если выполнять хэндовер не в момент прохождения БС, а, например, за 3 секунды до этого события. Соответствующий график показан на рис. 13.

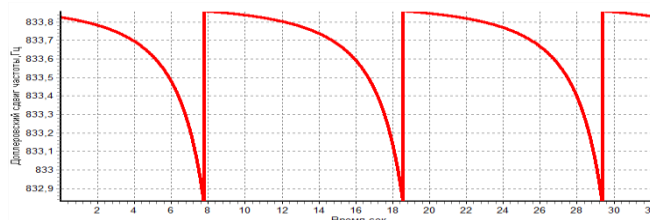


Рис. 13. График изменения доплеровского сдвига частоты при выполнении хэндовера за 3 с. до прохождения очередной базовой станции (частота 1800 МГц).

Из рис. 13 видно, что девиация доплеровского сдвига частоты будет составлять менее 1 Гц. Следовательно, эта проблема – решена. В процессе движения поезда значение доплеровского сдвига будет медленно изменяться от 0 до 833 Гц, в зависимости от скорости движения состава.

Нужно отметить, что поскольку в сети *LTE* диапазона 1800 МГц используется технология временного дуплекса (*TDD*) и работа в прямом и обратном направлении осуществляется на одной частоте, то и значение доплеровского сдвига будет одинаково как для прямого (БС – АС), так и для обратного (АС – БС) направлений [8].

3. Особенности частотно-территориального планирования

Главная задача частотно-территориального планирования (ЧТП) сети *LTE* – это обеспечить требуемые скорости передачи данных на абонентские станции,

расположенные в пределах требуемой зоны обслуживания. В данном случае, в качестве абонентской станции выступает локомотивная АС. Очевидно, что одновременно в зоне обслуживания на магистрали может оказаться не более двух составов, и, соответственно, двух АС, которые будут двигаться в противоположных направлениях. В этом случае, доплеровский сдвиг будет для одного состава иметь положительный знак, для другого – отрицательный. Разные условия приема предполагают целесообразность использования разных полос частот.

Например, две полосы по 5 МГц. Одна полоса – для одного направления движения составов, вторая – для другого направления.

Скорость передачи данных в сети *LTE* ограничивается энергетикой, полосой и, что особенно характерно при TDD, – внутрисистемными помехами. Для снижения уровня помех в такой сети необходимо либо использовать набор более малых полос, либо работать в одной полосе, но в синхронном режиме.

Теоретически, вместо одной полосы 5 МГц (эффективная полоса 4,5 МГц) можно использовать три полосы (по сути – три номинала частот) по 1,4 МГц (эффективная полоса 1,08 МГц). Однако предварительные расчеты показывают, что три номинала не дадут преимуществ в части ЭМС по сравнению с использованием полосы 5 МГц в синхронном режиме.

Выводы

1) Работа радиоканала *LTE* диапазона 1800 МГц при скоростях движения поезда 400 км/ч обеспечивается в режиме модуляции *QPSK*. Работа радиоканала *LTE* диапазона 1800 МГц в режиме модуляций *QAM16* невозможна при скоростях более 400 км/ч. Работа радиоканала *LTE* диапазона 1800 МГц в режиме модуляций *QAM64* невозможна при скоростях более 400 км/ч. Обеспечение работоспособности модуляций *QAM16* и *QAM64* при скоростях движения поезда более 400 км/ч. требует применения дополнительных мер по снижению влияния эффекта Доплера.

2) Для исключения скачкообразного изменения доплеровской частоты целесообразно процедуру хэндовера проводить за несколько секунд до прохода основной (сигнальной) базовой станции.

3) Для реализации сети *LTE-R* диапазона 1800 МГц необходимо использовать две полосы по 5 МГц, позволяющих реализовать две синхронные сети, обеспечивающие передачу данных с двигающихся в разном направлении железнодорожных составов.

Литература

1. Лобеев Д. П., Роевков Д. Н. Особенности организации радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная дню радио. 2024. № 1 (79). С. 274-277.
2. Тараненко А. Ю., Гриценко А. А., Лобеев Д. П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 1. С. 9-12.
3. Скрынников В. Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. – М.: Издательство «Спорт и Культура – 2000». 2012. 864 с.
4. Li Ke, Sun Zhiguo, Ning Xiaoyan. Analysis of Doppler frequency shift response mechanism based on OFDM system. Matec Web of Conferences 232, 04049 (2018). EITCE 2018. – URL: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201823204049> (дата обращения 05.05.2025).
5. Mohan P. N., Sudhakar R. N. Performance of M-QAM OFDM Systems in the Presence of EVM Degradation. International Journal of Science and Research (IJSR), 2015. Volume 4. Issue 6. Pp. 1545-1549. – URL: www.ijsr.net (дата обращения 05.05.2025).
6. Tiejun Wang, Proakis J.G., Masry E., Zeidler J.R. Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading. IEEE Transactions on Wireless Communications, June 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1422-1432, doi: 10.1109/TWC.2006.1638663 (дата обращения 05.05.2025).

7. Zhang, Yu & Xiong, Lei & Yang, Xuelian & Tan, Yuanchun. Impact of Doppler Shift on LTE System in High Speed Train Scenario. 2018. DOI: 431-440.10.1007/978-3-319-66628-0_41 (дата обращения 05.05.2025).

8. Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. №18-46-02 (о выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте, работающих на основе радиointерфейса LTE TDD).

References

1. Lobeev D. P., Roenkov D. N. *Osobennosti organizacii radiokanala v cifrovyyh setyah tekhnologicheskoy zheleznodorozhnoj radiosvyazi standarta LTE* [Features of the radio channel organization in digital networks of LTE standard technological railway radio communication]. *Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A.S.Popova, posvyashchennaya dnyu radio* [Scientific and Technical conference of the St. Petersburg NTO RES named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day]. 2024, no. 1 (79), pp.274-277 (in Russian).

2. Taranenko A. Yu., Gritsenko A. A., Lobeev D. P. *Optimizaciya ispol'zovaniya chastotnogo spectra* [Optimization of the use of the frequency spectrum]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2025, no. 1, pp. 9-12 (in Russian).

3. Skrynnikov V. G. *Radiopodsystemy UMTS/LTE. Teoriya i praktika* [UMTS/LTE radio subsystems. Theory and practice]. Moscow. Publishing house "Sport and Culture – 2000". 2012. 864 p.

4. Li Ke, Sun Zhiguo, Ning Xiaoyan. Analysis of Doppler frequency shift response mechanism based on OFDM system. *Matec Web of Conferences* 232, 04049 (2018). EITCE 2018. Available at: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201823204049> (accessed 05 May 2025).

5. Mohan P.N., Sudhakar Reddy N. Performance of M-QAM OFDM Systems in the Presence of EVM Degradation. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015. Volume 4. Issue 6. Pp. 1545-1549. Available at: www.ijsr.net (accessed 05 May 2025).

6. Tiejun Wang, J.G. Proakis, E. Masry and J.R. Zeidler, Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, June 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1422-1432, doi: 10.1109/TWC.2006.1638663 (accessed 05 May 2025).

7. Zhang, Yu & Xiong, Lei & Yang, Xuelian & Tan, Yuanchun. (2018). Impact of Doppler Shift on LTE System in High Speed Train Scenario. 2018. DOI: 431-440.10.1007/978-3-319-66628-0_41 (accessed 05 May 2025).

8. Reshenie GKRC ot 11.09.2018 № 18-46-02 (o vydelenii polosy radiochastot 1785-1805 MGc dlya radioelektronnyh sredstv suhoputnoj podvizhnoj sluzhby dlya sozdaniya tekhnologicheskikh setej svyazi na zheleznodorozhnom transporte, rabotayushchih na osnove radiointerfejsa LTE TDD) [Decision of the State Emergency Committee of September 11, 2018 No. 18-46-02 (on the allocation of the 1785-1805 MHz radio frequency band for radio-electronic means of the land mobile service for the creation of technological communication networks in railway transport, based on the LTE TDD radio interface)] (in Russian).

Статья поступила 13 мая 2025 г.

Информация об авторах

Лобеев Дмитрий Петрович – аспирант кафедры «Электрическая связь» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС). Область научных интересов: цифровые системы технологической радиосвязи. Тел.: +7(812)319 15 50 доб. 62-419. E-mail: lobeev1@mail.ru. Адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Боровая д.49.

Билятдинов Камиль Закирович – доктор технических наук, кандидат военных наук, доцент, И.о. заф. кафедрой, профессор кафедры «Информатика и информационная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС). Область научных интересов: связь, автоматизация, информационная безопасность, управление. Тел.: +7(812)310 34 72. E-mail: inib@pgups.ru. Адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр. д.9.

Гриценко Андрей Аркадьевич – кандидат технических наук, генеральный директор ИКЦ «Северная корона». Область научных интересов: спутниковая связь. Тел. +7(812)922 36 21. E-mail: org@spacecenter.ru. Адрес: Россия, г. Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., дом 4-6.

The occurrence of the Doppler effect on high-speed highways and a way to compensate for the Doppler effect

D. P. Lobehev, K. Z. Bilyatdinov, A. A. Gritcenko

Annotation. The purpose of the work: based on the results of a study of the features of the Doppler effect in digital LTE 1800 TDD standard radio communication systems in railway transport using OFDM technology at different signal modulations at high speeds (over 400 km/h), to develop a way to compensate for the negative effects of the Doppler frequency shift. **Novelty:** it is proposed to compensate for the Doppler frequency shift at speeds over 400 km/h for stable operation in railway transport conditions by introducing a delay in switching between base stations of the linear network, thereby reducing the Doppler frequency jump. **Results:** network operations at different modulations at speeds of 400 km/h are modeled, changes in the rotation angle of the signal constellation are shown, conclusions are drawn about network operation at different modulations at speeds over 400 km/h, a method is proposed to compensate for the negative effect of the Doppler effect on system operation at speeds over 400 km/h. According to the results of the study, the radio channel with QAM64 modulation at a speed of 400 km/h is impossible without compensation for the Doppler effect in the signal, with QAM16 modulation without compensation for the Doppler effect in the signal is impossible, with QPSK modulation without compensation for the Doppler effect in the signal is possible. To avoid abrupt changes in the Doppler frequency, it is advisable to perform the Handover procedure a few seconds before passing the main (signal) base station. The data transfer rate in an LTE network is limited by energy, bandwidth, and, most notably in TDD, by in-system interference. To reduce the level of interference in such a network, it is necessary either to use a set of smaller bands, or to work in the same band, but in synchronous mode. **Practical significance:** the proposed method makes it possible to significantly compensate for the negative effects of the Doppler effect on high-speed highways in conditions of a limited frequency resource of the linear network in railway transport.

Keywords: high-speed backbone, Doppler frequency shift, Doppler compensation, signal modulation, radio communications, Doppler effect.

Information about the authors

Lobehev Dmitry Petrovich - postgraduate student at the Department of Electrical Communications of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (FGBOU VO PGUPS). Research interests: digital technological radio communication systems. Tel. +78123191550 ext. 62-419. E-mail: lobehev1@mail.ru. Address: St. Petersburg, Borovaya st., 49.

Bilyatdinov Kamil Zakirovich – Doctor of Technical Sciences, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department, Professor of the Department of «Computer Science and Information Security» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (FGBOU VO PGUPS). Research interests: communications, automation, information security, management. Tel.: +7812310-3472. E-mail: inib@pgups.ru. Address: St. Petersburg, Moskovsky pr., 9.

Gritsenko Andrey Arkadyevich – Ph.D. of Technical Sciences, General Director of the Severnaya Korona Research Center. Research interests: Satellite communications. Tel. +78129223621. E-mail: org@spacecenter.ru. Address: St. Petersburg 17th line V.O., house 4-6.

Для цитирования: Лобеев Д.П., Билиятдинов К.З., Гриценко А.А. О способе компенсации влияния эффекта Доплера на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Техника средств связи. 2025. № 2(170). С. 65-75. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-65-75

For citation: Lobehev D.P. Bilyatdinov K. Z., Gritsenko A.A. The occurrence of the Doppler effect on high-speed highways and a way to compensate for the Doppler effect. Means of communication equipment. 2025. № 2(170). Pp. 65-75 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-65-75

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 623.61

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-76-84

О развитии подходов к определению основных показателей функционирования систем управления на основе свойства оперативности

Давыдчик В. В.

Аннотация. На основе анализа и систематизации современных взглядов на свойства оперативности, устойчивости и непрерывности управления и систем управления силами предложен подход к разработке системы показателей устойчивости и непрерывности функционирования систем управления, исходя из свойства оперативности. **Целью работы** является совершенствование научно-методического аппарата моделирования и обоснования систем управления в части разработки показателей для оценки свойств функционирования. **Используемые методы:** семантический анализ свойств оперативности и устойчивости и раскрытие их взаимосвязей, методы теории эффективности, способы систематизации свойств и показателей сложных систем. **Новизна** состоит: в подходе к разработке показателей для оценки свойств функционирования систем управления; в разработке содержания и определений показателей оперативности, устойчивости и непрерывности функционирования отдельных контуров управления и системы управления в целом. **Результаты:** обоснована возможность интерпретации устойчивости и непрерывности через оперативность системы управления при изменении внешних условий. Предложен подход к построению системы показателей устойчивости функционирования систем управления, основанный на учёте изменения оперативности функционирования в динамике изменения условий обстановки при деструктивном внешнем воздействии. **Научно-теоретическая значимость** состоит в упорядочении и систематизации представлений о взаимосвязи свойств функционирования систем управления. Введённые показатели устойчивости отражают различные аспекты выполнения требований к оперативности, характеризуют устойчивость функционирования как отдельных контуров управления, так систем управления в целом, и могут быть использованы при совершенствовании научно-методического аппарата обоснования перспектив развития систем управления морскими объектами.

Ключевые слова: вероятностно-временные характеристики, контур управления, непрерывность функционирования, эффективность, показатели эффективности, система управления, устойчивость.

Введение

Военно-научное обоснование перспектив развития систем управления (СУ) силами (войсками) в современных условиях, как правило, опирается на моделирование её функционирования с целью исследования влияния разнообразных внешних и внутренних факторов и выработки требований к создаваемым образцам средств управления и связи. В свою очередь, и создание новых образцов средств управления и связи предполагает возможность оценки их соответствия требованиям тактико-технических заданий в части пространственно-временных характеристик, возможность их сравнения с отечественными или зарубежными аналогами, а также оценку прироста эффективности вышестоящей системы при интеграции в её состав нового образца.

Средства математического и имитационного моделирования, при наличии определённых условий, предоставляют возможность сократить время и затраты на исследование поведения систем, благодаря возможности сокращения до минимума необходимости в проведении натурных экспериментов. Из числа этих определённых условий, кроме необходимости наличия достаточного научно-методического задела для разработки средств моделирования и их программно-аппаратной реализации, принципиально

важным представляется использование заказчиком и исполнителями образцов средств управления единых согласованных подходов к решению задач моделирования. Таковое единство взглядов должно формироваться ещё на стадии создания научно-методического задела при определении целей моделирования, выборе средств моделирования и выработке замысла на разработку научно-методического аппарата и входящих в него моделей.

Научно-методический аппарат должен быть адекватен задачам исследований и содержать средства (методы, методики) для расчёта показателей и характеристик структурных и функциональных свойств образца в отдельности и в составе системы.

К настоящему времени достаточно всесторонне проанализированы и сформулированы свойства процесса управления силами (войсками) и определены его показатели [4-6], которые, как правило, предлагается использовать и для оценки процесса функционирования систем управления силами. Поскольку показатели оценки управления предназначены, главным образом, для оценки результатов действий сил (например, уровень решения силами поставленных задач), то их оказывается недостаточно для оценки процессов функционирования систем управления. Данный вопрос не получил достаточного освещения в периодических изданиях, а в известных монографиях [5, 6] основные свойства процесса управления (устойчивость, непрерывность, оперативность, скрытность, обоснованность) и аналогичные свойства процесса функционирования системы управления практически не различаются. Более того, они относятся к одному уровню иерархии показателей [6]. Вследствие этого некоторые авторы предлагают многокритериальную оптимизацию средств управления выполнять по показателям указанных свойств с введением «унифицированного» показателя, составленного путём скалярного произведения этих показателей, имеющих различную размерность. Результаты подобной «оптимизации» непредсказуемы.

Кроме того, вследствие проникновения в военную сферу и широкого в ней распространения квалиметрического подхода, используемого на потребительском рынке, имеют место случаи смешения или отождествления свойств объектов и свойств процесса их функционирования. Данные случаи, как правило, возникают из-за отсутствия у авторов корректной математической модели процесса и ограниченности возможностей по её разработке (или даже из-за непонимания авторами необходимости разработки). Ввиду методологической некорректности, эти подходы могут оказать компрометирующее влияние на использование проверенных, адекватных (хотя возможно, и более трудоёмких) математических методов, к числу которых относятся, например, исследование операций и другие разделы прикладной математики, [1-7].

В связи с вышеизложенным, представляется целесообразным проанализировать содержание свойств и показателей функционирования системы управления силами и, при необходимости, конкретизировать их определения, следуя классическим принципам построения показателей эффективности, введённым А.Н. Колмогоровым [1], а также учесть фундаментальные результаты Р.О. Бартини, развитые в книге В.Я. Розенберга и соавторов, [3]. Ниже, для простоты, рассмотрен частный случай – процесс доведения короткого сообщения до подводных управляемых объектов.

Пространственно-временная основа описания свойств объектов и процессов

Известно, что всеобщими формами существования объективной реальности являются пространство и время. С другой стороны, широко известно положение о том, что законов природы может быть столько, сколько имеется доступных для измерения величин. И отсюда одним из основных научных требований при формулировании закона природы является необходимость измерения величин, относительно которых формулируется этот закон.

«Пространство и время являются мерой всех физически измеряемых величин. Каждая такая величина представляет определенное качество и задается размерностью пространства и времени. Р.О. Бартини в 1965 г. разработал систему описания всех измеряемых величин,

в которой использованы только две основные размерные величины: *длина L и время T* . Все остальные величины, включая массу, выводятся из этих двух основных и представляются в виде их произведений», [3].

Этим фактом подтверждается допустимость использования оперативности как определяющей характеристики функционирования любых пространственно определённых систем, в том числе системы управления силами.

Характеристика свойств оперативности, устойчивости, непрерывности, как фундаментальных свойств (функционирования) сложных организационно-технических систем, содержится во многих работах отечественных авторов, начиная с 60-х годов прошлого века.

В качестве отправных определений свойств оперативности, устойчивости, непрерывности воспользуемся формулировками из работы [6].

Анализ подходов к определению оперативности функционирования системы управления

«Управление силами – это циклически повторяющийся процесс воздействия управляющего органа на объект управления для достижения поставленной цели, в котором последовательно, в масштабе реального времени, на основе обработки исходной информации и оценки обстановки (соотношения сил и условий их действий) вырабатываются:

- замысел операции (боя);
- решение на операцию (бой);
- меры и действия по их реализации.

Основная (опосредованная) цель управления – реализация потенциальных возможностей подчинённых сил в операции (бою)» [6].

«Суммарное время, затрачиваемое на прохождение информации состояния в орган управления (T_o), переработку этой информации в командную информацию (T_p) и доведение командной информации до сил (T_k) представляет собой основной, определяющий цикл управления.» [6].

«Время цикла управления определяется из выражения $T_{\text{ц}} = T_o + T_p + T_k$ ».[6].

«Оперативность управления определяется способностью командования своевременно и адекватно реагировать на действия противника и реализовывать управленческие решения к заданному сроку. Главный показатель оперативности управления – это время, требуемое на принятие и реализацию управленческих решений, которое не должно превышать заданной величины, зависящей от поставленной задачи и условий её решения. Вспомогательными показателями могут быть величина цикла управления, а также величина отклонения момента принятия решения от заданного (которая может отрицательно сказываться на реализации плана боевых действий)». [6].

«Оперативность управления определяется временем, затрачиваемым на сбор и обработку информации (специальные системы), на принятие решения (средства автоматизации управления) и передачу командной информации (система связи) – $T_{\text{ц}}$. Требования к СУ по оперативности управления предъявляются исходя из соотношения $T_{\text{ц}} + T_d < T_{\text{крит}}$, где T_d – время, необходимое силам на действия по выполнению поставленной задачи; $T_{\text{крит}}$ – время, через которое действия сил не приведут к решению поставленной задачи». [6].

Исходя из вышеприведённого, оперативность функционирования системы управления (ОФСУ) будем понимать как свойство, характеризующее способность системы управления реагировать на изменение обстановки за время, не более заданного (требуемого) при выполнении ограничений на значения характеристик иных существенных свойств ФСУ.

Оперативность является наиболее общей и часто используемой характеристикой ФСУ, поскольку позволяет учесть ограничительное влияние многих других функциональных характеристик СУ.

Показатель ОФСУ определяется (оценивается, рассчитывается) для множества функций, достаточно полно характеризующих процесс ФСУ.

Оперативность функционирования системы управления (ОФСУ) имеет смысл и определяется для цикла(ов) управления (цикла(ов) функционирования системы управления).

Функционирование системы управления – процессы движения (добывания, сбора, обработки, преобразования, обобщения, выработки, передачи, приёма, и других действий) информации (в виде сообщений, донесений, докладов, приказов, распоряжений, подтверждений и др. документов (далее по тексту – сообщений)), осуществляемые для достижения управляемыми (исполнительными) объектами целей (решения задач), поставленных органом управления.

Ниже рассматривается функционирование системы управления при доведении коротких сообщений (заданного объема) в командном тракте системы управления;

Отметим, что понятие «цикл» относится к процессу, т. е. «цикл» – это «цикл процесса».

Циклы (процесса) функционирования системы управления (в целом) реализуются в определённых контурах управления, учитывающих разнородность управляемых сил, различия и особенности решаемых силами задач.

Контур управления (КУ) – составная часть процесса управления, осуществляемая совокупностью управляющего органа (органа управления) и управляемых объектов (объектов управления, исполнительных объектов), участвующих в решении поставленной задачи. Контур управления может полными или неполными (усечёнными, частными). Полный контур управления может состоять из частных контуров, например: частный контур освещения обстановки, контур выработки решения органа управления, контур доведения до управляемого (управляемых) объекта (объектов) сообщения с решением;

Могут быть названы следующие формы представления (интерпретации) контуров управления:

- *организационная* (для различных видов организации: централизованная, децентрализованная);
- *пространственная* (зональная, региональная, объектовая);
- *функциональная* (освещение обстановки, обработка информации, доведение информации);
- *информационная* (по видам информации, по объёмам информации).

Контур управления могут рассматриваться как функциональные или структурные подсистемы или части системы управления, реализующие соответствующие им циклы управления.

Циклы и контуры управления могут рассматриваться применительно:

- к решению задачи (задач) управляемыми объектами;
- к функционированию системы управления (в целом);
- к функционированию части (составной или функциональной) системы управления.

Контур управления реализуется в контурах функционирования системы управления.

Контур функционирования системы управления (КФСУ) – организованная совокупность объектов и средств системы управления, участвующих в процессе управления исполнительными объектами при решении ими поставленной задачи. КФСУ обеспечивают осуществление КУ.

Свойства управления (оперативность и др.) относятся к контурам управления и характеризуются свойствами и показателями (функционирования) контуров управления.

За показатель оперативности функционирования системы управления (ПОФСУ) принимается вероятность выполнения функций управления в контурах управления за время не более заданного.

ОФСУ в каждом контуре доведения (или, короче, оперативность контура управления) определяется относительно (для) сообщения, отправленного в конкретный момент времени, и для конкретного контура, при этом оценивается парой равнозначных показателей:

- вероятность доведения сообщения за время не более заданного значения;
- время доведения сообщения с вероятностью не менее заданного значения.

Ниже чаще используется первый из этих показателей.

Критерием ОФСУ является достижение требуемого значения показателя оперативности функционирования системы управления.

Для совокупности контуров ОФСУ характеризуется совокупностью значений вероятности доведения сообщения за время не более заданного для каждого контура совокупности.

Анализ подходов к определению устойчивости функционирования системы управления

За предшествующие десятилетия взгляды на понятие «устойчивость функционирования системы управления» (УФСУ) изменялись вслед за эволюцией понятий «управление» и «устойчивость управления».

«Устойчивость управления определяется способностью управлять силами с заданными требованиями в конкретные периоды обстановки в условиях различных видов воздействия. Главный показатель устойчивости управления – вероятность выполнения системой управления возложенных на неё функций с заданными требованиями в различных условиях.» [6].

«Устойчивость управления определяется способностью управлять силами с заданной эффективностью при активном противодействии противника. Главный показатель устойчивости управления – вероятность надёжного управления силами при воздействии различных видов оружия и помех противника». [6].

Устойчивость функционирования системы управления (УФСУ) – свойство (процесса функционирования СУ), характеризующее способность СУ обеспечивать (поддерживать) требуемый уровень характеристик ФСУ в условиях воздействия внешних факторов. В частности, под устойчивостью доведения сообщений понимается способность СУ сохранять в контурах управления требуемый уровень вероятности доведения сообщения за время не более заданного (в частном случае, в контурах доведения сообщений) в течение времени решения задачи управляемыми объектами.

Устойчивость можно рассматривать для различных условий функционирования в рамках одного или различных сценариев изменения обстановки.

В рамках одного сценария могут рассматриваться и сравниваться периоды различных воздействий.

В рамках различных сценариев сравниваются альтернативные варианты СУ в наиболее характерные моменты времени сценария. Например, мирное время, угрожаемый период, моменты воздействия теми или иными средствами.

Устойчивость измеряется через снижение показателя эффективности, в качестве которого целесообразно и, как правило, используются показатели оперативности, вследствие их соответствия целям оценивания и возможности вычисления.

Для оценки УФСУ необходимо оценивать ОФСУ для различных моментов времени в течение решения задачи (в промежутке $[T_n, T_k]$ времени функционирования СУ), что означает необходимость моделирования доведения сообщений, отправляемых в эти различные моменты времени (в течение времени решения задачи).

За показатель УФСУ может быть принята вероятность выполнения требований к ОФСУ за время не более заданного в течение времени решения задачи управляемыми объектами. (Здесь «в течение времени решения задачи управляемыми объектами» понимается как «в пределах времени решения задачи управляемыми объектами». При этом заданное время может быть фиксированным или остаточным в пределах «критического» времени решения задачи управляемыми объектами), [10].

Расчёт вероятности предполагает наличие достаточно полной статистики по ФСУ (или значений вероятностно-временных характеристик, заданных техническими заданиями на средства управления и связи).

При отсутствии такой статистики (или при однократном моделировании) ФСУ за показатель устойчивости ФСУ могут быть приняты показатели, характеризующие изменение оперативности ФСУ:

- к определённым (фиксированным) моментам времени (абсолютный точечный показатель);
- в течение определённого (фиксированного) промежутка времени (абсолютный одномерный показатель);
- относительно требуемого уровня оперативности в течение определённого (фиксированного) промежутка времени (относительный одномерный показатель).

Таковыми показателями являются, соответственно [10]:

- 1) разность значений вероятности выполнения требований к оперативности ФСУ для различных моментов времени решения задачи управляемыми объектами;
- 2) наибольшее отклонение (снижение) достигаемых значений показателя ОФСУ от требуемого уровня (значения);
- 3) доля времени решения задачи управляемыми объектами, в течение которого выполнены требования к ОФСУ (доведению сообщений, отправляемых в различные моменты времени в пределах времени решения задачи управляемыми объектами) в контурах системы управления.

При этом последний показатель 3) может быть определён:

- а) либо на промежутке времени, в течение которого хотя бы одно сообщение, отправленное в промежутке $[T_n, T_k]$, может быть доведено за время, не более заданного (или оставшегося до критического) с вероятностью не менее заданной;
- б) либо на промежутке времени, в течение которого каждое сообщение, отправленное в промежутке $[T_n, T_k]$, может быть доведено за время, не более заданного, (или оставшегося до критического) с вероятностью не менее заданной;

Из определений показателей следует, что:

- показатель а) позволяет оценивать максимальные возможности СУ в течение промежутка времени её функционирования;
- показатель б) позволяет учитывать изменение возможностей СУ в течение этого промежутка времени, т.е. оценивать динамику изменения возможностей СУ.

С устойчивостью управления связано требование непрерывности управления [6].

Анализ подходов к определению непрерывности функционирования системы управления

Исследование понятий «непрерывность управления» и «непрерывность функционирования системы управления» опирается на приведённые ниже их определения в монографиях [4-6], по которым можно заметить тенденцию движения (отхода)

от объединения этих понятий в [4] к их конкретизации и отделению от понятия «устойчивость» и «живучесть» в [5, 6]. Приведём эти определения.

«Непрерывность или устойчивость [это свойство и требование к управлению, – прим. В.Д.] достигающееся живучестью системы управления и заключающаяся в её способности обеспечить бесперебойную связь с войсками, постоянное знание командиром и штабом обстановки и возможность с их стороны оказывать необходимое влияние на ход боевых действий имеющимися силами и средствами», [4].

«Под непрерывностью управления понимают возможность командования и штаба постоянно воздействовать на ход боевых действий, т. е. своевременно получать от них информацию о складывающейся обстановке и доводить до них приказы и распоряжения на всю глубину боевых действий», [6].

«Непрерывность управления обеспечивается теми элементами СУ, которые непосредственно участвуют в цикле управления», [6].

«Основным количественным критерием непрерывности управления может быть время, в течение которого отсутствует связь с войсками...», [13].

«Кроме того, непрерывность управления может характеризоваться вероятностью выхода из строя пунктов управления в результате применения по ним различных средств поражения, временем на их восстановление и вероятностью нарушения связи радиопомехами», [4].

«Показателем непрерывности может быть, например, вероятность наличия (отсутствия) промежутков времени, в которые эффективность системы остаётся на заданном уровне. Дополнительно можно использовать такие показатели, как вероятность надёжной двусторонней связи с силами и время доставки сообщений адресату», [5].

Из приведённых формулировок следует, что устойчивость и непрерывность являются различными свойствами функционирования системы управления, причём непрерывность функционирования системы управления (НФСУ) характеризует способность СУ не прерывать функционирование, т. е. не допускать перерывов в функционировании.

Показатели НФСУ определяются аналогично показателям УФСУ с тем отличием, что вместо промежутков времени, в которые имеются отклонения показателя ОФСУ от требуемого уровня, необходимо рассматривать промежутки времени прекращения ФСУ (в том смысле, что в эти промежутки времени ОФСУ будет ниже минимально допустимого значения).

Выводы

Таким образом, ОФСУ, УФСУ и НФСУ связаны между собой как содержательно, так и формально-логически, и показатели для их оценки образуют систему, основанную на показателе оперативности ФСУ в контурах управления.

При этом устойчивость и непрерывность в течение определённого промежутка времени могут рассматриваться с двух сторон: как свойства (характеристики) функционирования отдельных (конкретных) контуров управления и как свойства (характеристики) функционирования совокупности (или части) контуров управления, в том числе как свойства (характеристики) функционирования системы управления в целом.

Из вышеизложенного также следует:

- 1) Оперативность ФСУ при доведении сообщения(й) может определяться для сообщения(й), отправляемого(ых) в определённый момент времени (при этом показатель оперативности ФСУ есть скалярная величина). Для определения устойчивости ФСУ необходимо определить оперативность ФСУ при доведении нескольких сообщений, отправляемых в различные моменты времени рассматриваемого промежутка функционирования СУ (и при этом показатель устойчивости ФСУ, включающей более одного контура управления, есть векторная

величина, элементами которой являются значения показателя оперативности ФСУ) для отдельных КУ.

- 2) Оперативность ФСУ определяется для отдельных (обособленных) контуров управления. Но устойчивость ФСУ и непрерывность ФСУ могут быть определены как для отдельного контура, так и для совокупности контуров, вплоть до всей системы управления.
- 3) Выполненный анализ свойств системы управления и свойств процесса её функционирования позволяет систематизировать подходы к разработке показателей устойчивости и непрерывности функционирования сложных систем управления, в том числе при разработке научно-методического аппарата обоснования развития системы управления морскими подводными объектами.

Литература

1. Колмогоров А. Н. Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы // Труды Математического института им. В. А. Стеклова, Вып. 12, 1945.
2. Волгин Н. С., Махров Н. В., Юровский В. А. Исследование операций. Л.: ВМА, 1981.
3. Гвардейцев М. И., Кузнецов П. Г., Розенберг В. Я. Математическое обеспечение управления. Меры развития общества. – СПб.: Специальная литература, 2017. – 222 с.
4. Автоматизация управления войсками. Под ред. В. Д. Рябчука. – М.: Воениздат, 1977. – 301 с.
5. Автоматизация управления и связь в ВМФ. Под общ. ред. Ю. М. Кононова. – СПб.: «Элмор», 2001. – 512 с.
6. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ. – СПб.: «Элмор», 2005. – 832 с.
7. Густов А. А. Общий подход к оценке эффективности функционирования системы пунктов управления // Техника средств связи. 2018. № 1 (141). С. 281-287.
8. Пучков С. В. Современные подходы к оценке эффективности функционирования системы управления объединения в операции // Военная мысль. 2019. № 12. С. 68-75.
9. Кулешов И. А., Расчесова А. Г., Фортинский А. Г. Подходы к оценке эффективности современных систем связи // Техника средств связи. Научно-технический сборник. Выпуск 1 (140), СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 70-78.
10. Давыдчик В. В., Можаяева А. Э. Подход к разработке показателей для оценки устойчивости функционирования систем управления морскими объектами при деструктивном воздействии // Техника средств связи. 2021. № 1(153). С. 66-76.

References

1. Kolmogorov A. N. Number of hits at several shots and general principles of estimating the efficiency of a firing system. – Proceedings of the V. A. Steklov Mathematical Institute, vol. 12, 1945. (in Russian).
2. Volgin N. S., Makhrov N. V., Yurovsky V. A. Operations Research. L.: VMA, 1981. (in Russian).
3. Gvardeitsev M. I., Kuznetsov P. G., Rosenberg V. Y. Mathematical support of management. Measures of Society Development. St.Petersburg. Special Literature Publ., 2017. 222 p. (in Russian).
4. Automation of troop management. Edited by Ryabchuk V.D. Moscow. Voenizdat Publ., 1977. 301 p. (in Russian).
5. Automation of control and communication in the Navy. St. Petersburg. Elmore Publ., 2001. 512 p. (in Russian).
6. Information Technologies in the Navy Force Management System. St. Petersburg. Elmore Publ., 2005. 832 p. (in Russian).
7. Gustov A. A. General Approach to the Assessment of the Control Point System Functioning Efficiency. Means of Communication Equipment. 2018. No. 1 (141). Pp. 281-287 (in Russian).
8. Puchkov S. V. Modern approaches to the assessment of the effectiveness of the association management system functioning in operation. Voennaya Mysl'. 2019. No. 12. Pp. 68-75 (in Russian).

9. Kuleshov I. A., Raskhesova A. G., Fortinsky A. G. Approaches to the efficiency assessment of modern communication systems. Means of Communication Equipment. 2012. Issue 1 (140), St. Petersburg. Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, p. 70-78 (in Russian).

10. Davydchik V. V.; Mozhaeva A. E. Approach to the development of indicators to assess the stability of marine object control systems under destructive impact. Means of Communication Equipment. 2021. № 1(153). Pp. 66-76 (in Russian).

Статья поступила 30 апреля 2025 г.

Информация об авторе

Давыдчик Виталий Владимирович – заместитель начальника научно-исследовательского отдела ПАО «Интелтех», кандидат технических наук. Область научных интересов: обоснование развития сложных организационно-технических систем управления. Тел.: +7(812)313 16 73. E-mail: davydchikvv@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

On the development of approaches to determining the main indicators of the functioning of management systems on the based on the properties of efficiency

V. V. Davydchik

Annotation. Based on the analysis and systematization of modern views on the properties of operability, stability and continuity of management and force control systems, an approach to the development of a system of indicators of stability and continuity of functioning of control systems based on the property of operability is proposed. **The purpose of the work** is to improve the scientific and methodological apparatus of modeling and justification of control systems in terms of developing indicators to assess the properties of operability. **Methods used:** semantic analysis of the properties of operability and stability and disclosure of their interrelationships, methods of efficiency theory, methods of systematization of properties and indicators of complex systems. The novelty consists of: in the approach to the development of indicators for assessing the properties of functioning of management systems; in the development of the content and definitions of indicators of efficiency, stability and continuity of functioning of individual control loops and the management system as a whole. **Results:** the possibility of interpreting stability and continuity through the operability of the control system under changing external conditions is substantiated. The approach to the construction of the system of indicators of stability of control systems functioning, based on taking into account the changes in the operability of functioning in the dynamics of changing conditions under destructive external influence, is proposed. The scientific and theoretical significance consists in the ordering and systematization of ideas about the relationship between the properties of the functioning of management systems. The introduced stability indices reflect various aspects of meeting the requirements to operability, characterize the stability of functioning of both individual control loops and control systems as a whole, and can be used to improve the scientific and methodological apparatus for substantiating the prospects of development of marine object control systems.

Keywords: probabilistic-temporal characteristics, control loop, continuity of functioning, efficiency, performance indicators, control system, sustainability.

Information about the author

Davydchik Vitaly Vladimirovich – Deputy Head of the Scientific Research Department of PJSC "Inteltech", Candidate of Technical Sciences. Research interests: justification of the development of complex organizational and technical management systems. Tel.: (812)313-16-73. E-mail: davydchikvv@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

Для цитирования: Давыдчик В. В. О развитии подходов к определению основных показателей функционирования систем управления на основе свойства оперативности // Техника средств связи. 2025. № 2(170). С. 76-83. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-76-84

For citation: Davydchik V.V. On the development of approaches to determining the main indicators of the functioning of management systems on the based on the properties of efficiency Means of communication equipment. 2025. № 2(170). Pp. 76-84. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-76-84

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.396.946

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-85-98

Анализ факторов, влияющих на распространение радиоволн СДВ диапазона

Акулов В. С., Бисярин М. А., Угрик Л. Н., Петров А. Н.

Аннотация. Актуальность: в работе даны количественные иллюстрации основных закономерностей полей СДВ диапазона на трассах большой протяженности, а также проведен анализ влияния на поле в точке наблюдения различных параметров окружающей среды. Количественный анализ приводится с использованием разработанного в Санкт-Петербургском государственном университете программного обеспечения. Причем **новизной** раскрытой в статье общей методики расчета электромагнитных полей диапазона очень низких частот (3 – 30 кГц) и ее программной реализации является то, что в настоящее время уместно говорить не просто о расчете полей, а о методе их прогнозирования, поскольку предложенный программный продукт содержит и модели необходимых параметров среды. **Методы:** глобальное прогнозирование полей диапазона сверхдлинных волн необходимо проводить только на базе многопараметрической волноводной задачи, учитывающей все многообразие геофизических данных. **Теоретическая значимость:** программа реализации реализованной электронной версии карты содержит 10 градаций по удельной проводимости и диэлектрической проницаемости Земли с дискретностью разбиения земной поверхности на однородные по свойствам участки размером 0,5*0,5 градуса. При этом в отличие от существующей карты Моргана она не только учитывает геологическое строение земной поверхности, но и отражает эффекты сезонных изменений параметров. **Практическая значимость:** Предложенное программное обеспечение позволяет с контролируемой точностью выполнять прогнозирование полей для заданной даты и времени суток. Причем расчеты по данной программе имеют убедительное экспериментальное подтверждение, в чем и заключается ее.

Ключевые слова: задача дифракции на открытой сфере, очень низкие частоты, сверхдлинные волны, суточный ход напряженности поля, электро-магнитные поля.

Введение

Начало теоретических исследований распространения радиоволн низкочастотных диапазонов относится к началу двадцатого столетия, когда П. Дебай построил строгое решение для сферической однородной Земли. Такая задача теперь называется задачей дифракции на открытой сфере. Решение было построено Петером Дебаем методом разложения по собственным функциям азимутального оператора задачи. Это решение оказалось малоприменимым для практических задач. Позже Дж.Н. Ватсону удалось преобразовать решение П. Дебая к хорошо сходящемуся ряду по собственным функциям радиального оператора – ряду нормальных волн (мод). В зарубежной литературе такой подход чаще называют методом волновых мод. В законченном виде задача дифракции на открытой сфере для вертикального точечного источника поля была сформулирована и решена академиком В.А. Фоком в 1940-х годах [1].

Методы, развитые В.А. Фоком, оказались плодотворными и при исследовании распространения радиоволн с учетом ионосферы Земли. Начало этих исследований относится к 1960-м годам, причем успехи в этой области в значительной степени связаны с фундаментальными работами под руководством профессора Г.И. Макарова кафедры радиофизики Санкт-Петербургского (тогда Ленинградского) Государственного университета (СПбГУ). По результатам этих исследований была опубликована монография [2], которая подготовлена по результатам оригинальных работ 1960-х – 1980-х годов ее авторов и школы в целом.

К сожалению, данная монография была издана небольшим тиражом, и сразу после опубликования стала библиографической редкостью. Ниже приводится краткое описание современных методов расчета полей сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона. Но главной задачей настоящей работы являются количественные иллюстрации основных закономерностей полей СДВ диапазона на трассах большой протяженности и анализ влияния на поле в точке наблюдения различных параметров окружающей среды. Такой анализ проводится в известной литературе недостаточно детально, а потребность в этом при решении практических задач имеется. Количественный анализ проводится с использованием разработанного в СПбГУ программного обеспечения. Причем в настоящее время уместно говорить не просто о расчете полей, а о методе их прогнозирования, поскольку указанный программный продукт содержит и модели необходимых параметров среды.

Под диапазоном СДВ здесь понимается частотный участок 10 – 30 кГц, который используется на практике. Этот участок входит в диапазон очень низких частот (ОНЧ, по международной классификации – *VL F*). Термин ОНЧ (частоты 3 – 30 кГц) обычно принят в радиофизической литературе.

Общая методика расчета электромагнитных полей ОНЧ диапазона и ее программная реализация

В основе развитого в монографии [2] метода лежит базовая задача о распространении радиоволн, возбуждаемых вертикальным электрическим диполем в регулярном волноводе Земля-ионосфера. Задача формулируется в импедансной постановке, но в отличие от традиционного подхода импеданс вводится не для полного поля, а для спектральных составляющих продольного и поперечного операторов задачи. При таком подходе удается обобщить базовую задачу на случай анизотропного и нерегулярного волновода при произвольной зависимости свойств Земли и ионосферы от радиальной координаты. Это позволяет определять электромагнитные поля для реальных трасс с учетом их освещенности, времени года и направления распространения. В монографии [2] аналитически выявлены также многие интересные для практики качественные закономерности. Здесь же нас в первую очередь интересуют расчетные результаты решения рассматриваемой многопараметрической задачи.

Процесс распространения электромагнитных волн любого диапазона в той или иной мере зависит от таких характеристик среды распространения, как неоднородность, анизотропия, свойства ограничивающих поверхностей. Для ОНЧ диапазона естественно использовать волноводную модель распространения, поскольку при длинах волн в десятки километров практически вся распространяющаяся энергия снизу ограничена земной поверхностью, а сверху – участком ионосферы до высот примерно 100 км. Неоднородность среды распространения учитывается тем, что:

- ионосфера считается неоднородной как в вертикальном, так и в продольном направлении, т. е. комплексная диэлектрическая проницаемость ионосферы зависит от высоты и географических координат;
- проводимость земной поверхности зависит от географических координат.

В рассматриваемой задаче существенную роль играет анизотропия среды, которая является следствием наличия постоянного магнитного поля Земли. Это поле достаточно изучено, и его величина с хорошей точностью выражается аналитически.

Имеет смысл отметить важное отличие технических волноводов от природных, где локализация волнового поля обеспечивается за счет других физических механизмов. Если нижняя граница природного волновода как-то фиксирована – это земная поверхность, то верхняя граница как таковая отсутствует. Локализация волнового поля в околоземном пространстве обеспечивается за счёт убывания в ионосфере вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости с высотой. Земная поверхность также

не является идеальным проводником, и электромагнитное поле проникает в толщу Земли. Это отражается при формулировке граничных условий в процессе решения задачи.

Распространение электромагнитных волн ОНЧ диапазона трактуется как процесс, происходящий в волноводе «Земля-ионосфера», и описывается системой уравнений Максвелла. Эта система записывается в матрично-символьном виде с выделением продольного и поперечного операторов. При учете анизотропии волновода все компоненты электромагнитного поля оказываются связанными, что не позволяет выделить отдельно поперечно-магнитные и поперечно-электрические составляющие. Волновод разбивается на сегменты, в пределах каждого из которых волновод считается продольно-однородным, т. е. его свойства не зависят от географических координат в направлении распространения. В пределах сегмента комплексная диэлектрическая проницаемость зависит от вертикальной координаты, но эта зависимость постоянна. Постоянной также считается и проводимость подстилающей поверхности. Разбиение на однородные сегменты напрямую связано с моделями ионосферы и подстилающей поверхности.

В пределах однородного сегмента электромагнитное поле представляется в виде суммы по модам

$$\vec{\Phi} = \sum_m \vec{\Psi}_m(r) \Lambda_m \exp(iv_m \Delta\theta),$$

где $\vec{\Psi}_m$ называемый также модовой функцией и описывающий распределение волнового поля m -ой моды по высоте, Λ_m – коэффициент возбуждения соответствующей моды, v_m – постоянная распространения этой моды, $\Delta\theta$ – угловая длина сегмента. Модовая функция и постоянная распространения определяются как собственная функция и собственное число граничной задачи для поперечного оператора задачи. На земной поверхности ставится импедансное граничное условие. Условие на верхней границе следует прокомментировать. Теоретически оно могло бы быть сформулировано просто в виде $\vec{\Phi} \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$. Однако из-за сложной структуры вертикальных профилей электронной концентрации реализовать численный алгоритм решения задачи по вычислению собственных чисел и собственных функций оказалось бы слишком сложно. Да и практической необходимости в этом нет. Вместо этого по специальному критерию подбирается некоторая эффективная высота ионосферы, на которой ставится граничное условие импедансного типа

$$\begin{pmatrix} H_\varphi \\ -E_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta \\ H_\theta \end{pmatrix},$$

где $\begin{pmatrix} H_\varphi \\ -E_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta \\ H_\theta \end{pmatrix}$ $\hat{\alpha}$ – матрица отражательных свойств ионосферы, (E_θ, H_θ) – продольные компоненты электрического и магнитного полей, (E_φ, H_φ) – компоненты электрического и магнитного полей в горизонтальном поперечном направлении.

Надлежащим выбором эффективной высоты добиваются практической независимости результатов расчёта поля от определенного произвола в её выборе.

Для определения модовых функций и постоянных распространения необходимо решать сложное трансцендентное уравнение, параметры которого определяются при анализе поля, проникающего в ионосферу. Решение может быть реализовано при практически произвольных профилях ионосферы, однако этот процесс достаточно трудоемкий. При этом возможны потери некоторых собственных чисел, что требует дополнительного контроля за качеством решения этого уравнения.

На границе двух однородных сегментов происходит перевозбуждение мод, в следующем сегменте определяются новые модовая функция и постоянная распространения, а коэффициенты возбуждения определяются с помощью матрицы преобразования мод. Вычисление этой матрицы – одна из существенных составляющих алгоритма. Определение

коэффициентов возбуждения мод в начале трассы осуществляется путем решения антенной задачи. Источником поля считается вертикальный электрический диполь, характеризующийся токовым моментом или излучаемой мощностью. При написании окончательного выражения для поля в точке приема используется асимптотика функций Лежандра, справедливая в диапазоне ОНЧ при удалении порядка 100 км от передатчика и от антипода.

Ввиду суперпозиции мод зависимость поля от расстояния носит немонотонный характер, причем интерференционные экстремумы могут быть достаточно выраженными. Данный эффект проявляется сильнее на неосвещенных трассах и на небольших расстояниях. Иллюстрации приводятся ниже.

Используемые модели среды распространения

Решение базовой задачи относится к сферической продольно однородной трассе. В реальности протяженные трассы могут включать в себя участки с разными параметрами земли и ионосферы. Для учета таких ситуаций применяют уже приближенный (эвристический) подход. По географическим координатам передатчика и приемника осуществляется прокладка геодезической трассы, соединяющей эти две точки. На этой геодезической (трассе) формируются участки однородности, в пределах которых действует описанное представление поля. Критерием разбиения трассы на однородные интервалы является заданное относительное постоянство эффективной высоты ионосферы и постоянство проводимости земли в пределах каждого участка.

Концентрация электронов в ионосфере определяется по модели, основы которой были разработаны в СПбГУ в 1975 – 1995 годах и увенчались созданием ГОСТа [3-5]. В качестве основных исходных данных использованы данные о распространении радиоволн СДВ диапазона, полученные в процессе многолетней работы путем измерения сигналов отечественных и зарубежных радиостанций в многочисленных стационарных пунктах и на многих трассах. Указанные параметры ионосферы получены решением обратной задачи распространения радиоволн. Модель определяет электронную концентрацию на высотах 44 – 105 км и описывает все основные регулярные ее вариации: долготные, широтные, гелиоциклические, сезонные и суточные. Исходными данными для определения профиля электронной концентрации в заданной географической точке являются координаты этой точки, дата и время суток.

На высотах, больших 75 км для дня и 90 км для ночи, значения электронной концентрации, определяемые моделью СПбГУ, близки к значениям международной модели *IRI*, которые были получены на основе ракетных измерений. Ниже указанных граничных значений высот, в области относительно малых концентраций электронов, точность ракетных измерений резко падает, однако именно на этих высотах ионосфера оказывает существенное влияние на распространение СДВ. Поэтому конструирование профиля электронной концентрации на основе измерения полей и решения обратной задачи является основным, а в ряде случаев и единственным методом построения искомой модели для низкочастотных диапазонов.

Необходимым для расчета поля параметром ионосферы также является частота соударений электронов с нейтральными частицами. Как физический параметр эта величина менее изменчива и рассчитывается по высотным профилям атмосферного давления и температуры с учетом их регулярных широтных и сезонных изменений. Здесь может быть использована стандартная международная модель ионосферы для высот 40 – 110 км.

Для учета распределения по земному шару параметров подстилающей поверхности используется известная карта Моргана [6]. Эта карта составлена на основании геологических сведений о слоистом строении различных участков Земли, а также данных электрофизических полевых и лабораторных измерений свойств различных геологических структур. В СПбГУ реализована электронная версия карты, которая

содержит 10 градаций по удельной проводимости и диэлектрической проницаемости земли с дискретностью разбиения земной поверхности на однородные по свойствам участки размером $0,5 \times 0,5$ градуса. Следует, однако, заметить, что карта Моргана учитывает геологическое строение земной поверхности, но не отражает эффекты сезонных изменений параметров.

Компоненты магнитного поля Земли представляются в виде суммы сферических гармоник до порядка $n=6$. Они входят в компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды и используются для определения геомагнитной широты.

Рассчитываемые и наблюдаемые эффекты при распространении ОНЧ волн

Разработанное в СПбГУ программное обеспечение имеет экспериментальное подтверждение. Для примера на рис. 1 и 2 приводится сравнение результатов измерений и теоретического прогноза, заимствованное из монографии [2]. Рис. 1 относится к измерениям сигналов австралийской радиостанции японскими исследователями. Расчеты выполнены с помощью версии программ СПбГУ 1990-х годов. Экспериментальные кривые получены усреднением за интервалы от нескольких дней до месяца. Расчетные и экспериментальные данные совмещены по полуденным отсчетам.

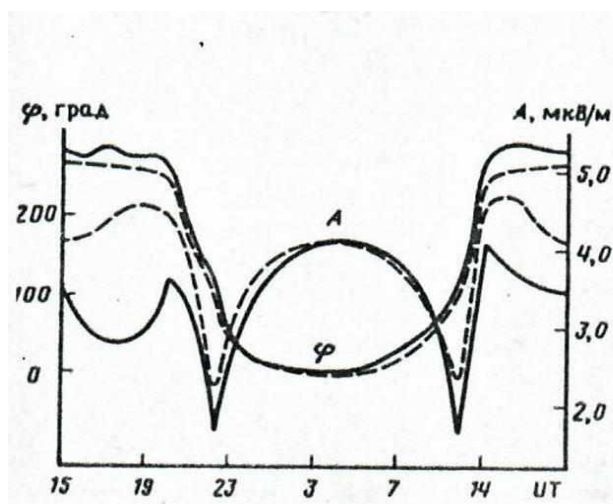


Рис. 1. Суточные вариации амплитуды и фазы сигнала на трассе NWC – Киото ($R = 6,8$ Мм, $f = 15,5$ кГц). Сплошные линии – эксперимент [2]

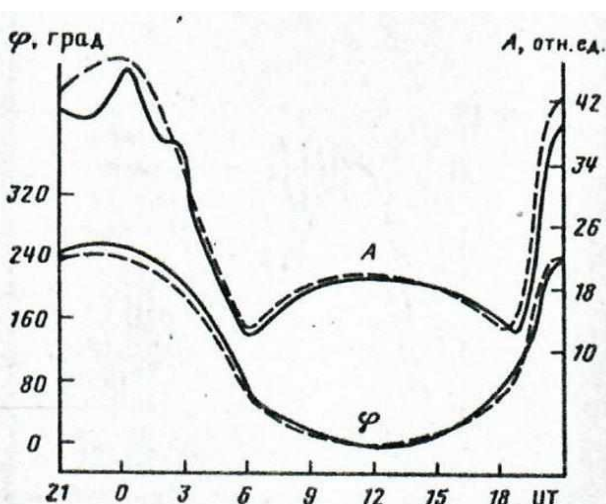


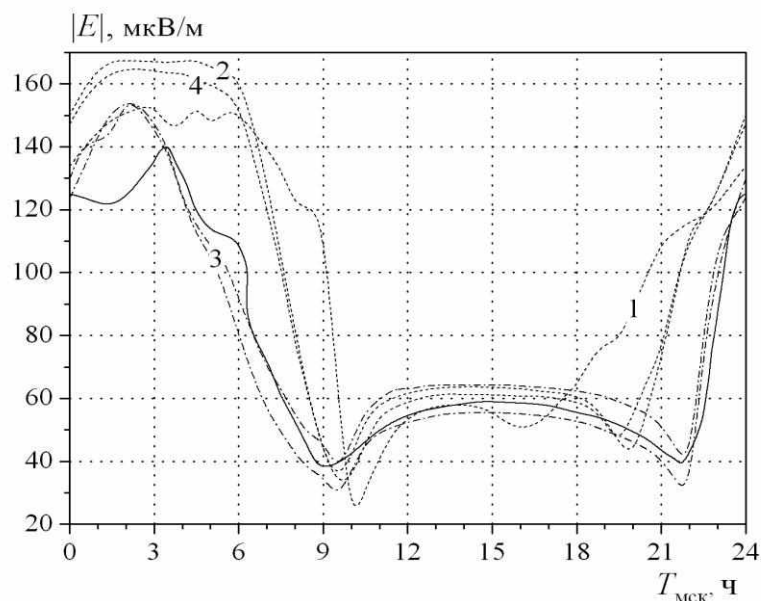
Рис. 2. Суточные вариации амплитуды и фазы сигнала на трассе Либерия – Ленинград (Санкт-Петербург) ($R = 6,9$ Мм, $f = 13,6$ кГц). Сплошные линии – эксперимент ЛГУ (СПбГУ) [2]

На рис.3 сплошной линией показана экспериментальная кривая измерений в Санкт-Петербурге, соответствующая рис. 2 и приведенная к московскому времени.

На рис. 3 коротким пунктиром показанный суточный ход амплитуды поля, полученный с помощью последней версии программного обеспечения СПбГУ для зимы (1), весны (2) и осени (4). Эта версия и используется для дальнейшего анализа. Наилучшее совпадение с экспериментальной кривой имеет место для летнего периода (3), когда вероятнее всего и проводились измерения. Эти кривые, полученные для экстремальных периодов солнечной активности, показаны штрих-пунктиром. Влияние гелиоциклического фактора незначительно, что более детально будет обсуждаться ниже. Расчеты выполнены для излученной мощности передатчика 1 кВт. Совмещение с экспериментом выполнено также по полуденным отсчетам (15 ч московского времени) путем соответствующего масштабирования экспериментальной кривой.

Сравнительно хорошее соответствие теории и результатов измерений свидетельствует о совершенстве разработанных в СПбГУ математических и расчетных методов

прогнозирования полей, которые описаны выше. Эти экспериментальные результаты получены, как указывалось, усреднением данных измерений. Таким же усреднением были получены и значения электронной концентрации, положенные в основу модели ионосферы. Поэтому и теоретические и экспериментальные данные не описывают различного рода случайные вариации параметров среды, предсказать которые невозможно в принципе. Возможные случайные вариации отсчетов поля, а, следовательно, и точность прогноза, принято характеризовать стандартным отклонением. Эта величина оценивается значениями 3–4 дБ для дневных условий и до 6–8 дБ на неосвещенных трассах. Обычно предполагается, что мгновенные значения поля в децибелах подчиняются нормальному закону



распределения.

Рис. 3. Экспериментальные данные измерений в Санкт-Петербурге, соответствующие рис. 2

Если вычисленное поле считать его медианным значением, то возможный разброс единичных отсчетов оценивается доверительными полуинтервалами, значения которых для разных значений доверительной вероятности приведены в таблице [7]. Таким образом, не следует ожидать хорошего совпадения расчетных данных с единичными измерениями. Можно лишь говорить о попадании таких измерений в указанный доверительный интервал.

Таблица 1 – Точность разброса доверительного интервала рассчитанного поля [7]

Доверительная вероятность	Доверительный полуинтервал (дБ) при стандартном отклонении (дБ)					
	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
0,80	3,85	5,13	6,41	7,69	8,97	10,3
0,90	4,94	6,58	8,23	9,87	11,5	13,2
0,95	5,88	7,84	9,80	11,8	13,7	15,7

В настоящем анализе нелишним будет обсудить рекомендации Международного союза радиосвязи (МСЭ) по прогнозированию напряженности поля [8]. В данном документе рекомендуется в СДВ диапазоне использовать метод волноводной моды (в отечественной терминологии – метод нормальных волн). Говорится об учете вертикальной неоднородности ионосферы методом численного интегрирования соответствующих дифференциальных уравнений, об учете горизонтальной неоднородности трассы методом ВКБ и о

преобразовании (трансформации) мод на границах однородных участков. Так и построена программа СПБГУ. Однако в рекомендациях МСЭ далее все сводится к учету ограниченного числа трасс с ионосферой экспоненциального профиля. Мало того, в данном документе прямо говорится о целесообразности подгонки параметров ионосферы под результаты измерений поля и использования средних экспоненциальных профилей для трассы в целом. Параметры экспоненциального профиля подбирались по результатам измерения поля на воздушных судах, а об учете высоты точки наблюдения при вычислениях в документе [8] ничего не говорится.

На рис. 4 пунктиром приведены результаты расчетов из документа [8] (Приложение 3) на гипотетической трассе азимутом $\phi = 340^\circ$ и берущей начало в г. Галифакс (Канада). Настораживает незначительное различие напряженности поля для дневных и ночных условий. Сплошными линиями на данном рисунке показаны результаты расчетов на этой трассе по программе СПБГУ для различного времени суток. Неплохое совпадение с обеими кривыми из документа [8] имеет место только для 8 ч московского времени, когда на трассе ночь, поскольку местное время на данной трассе отличается от московского времени на 5-6 часов.

Особенностью рассматриваемой сейчас трассы является то, что удельная проводимость земной поверхности σ вдоль нее существенно меняется, что показано на рис. 4 коротким пунктиром. Участки с плохой проводимостью здесь перемежаются с морскими участками. Данная кривая была рассчитана с помощью упомянутой выше электронной карты Моргана, программно адаптированной в СПБГУ. На неосвещенных участках трассы изменение проводимости земли сказывается меньше, поскольку в этих условиях хорошо отражающей областью является ионосфера. В дневных условиях при переходе на участок трассы с плохой проводимостью происходит резкое уменьшение амплитуды поля. Такое уменьшение прекращается с выходом далее на участок с хорошей проводимостью Земли.

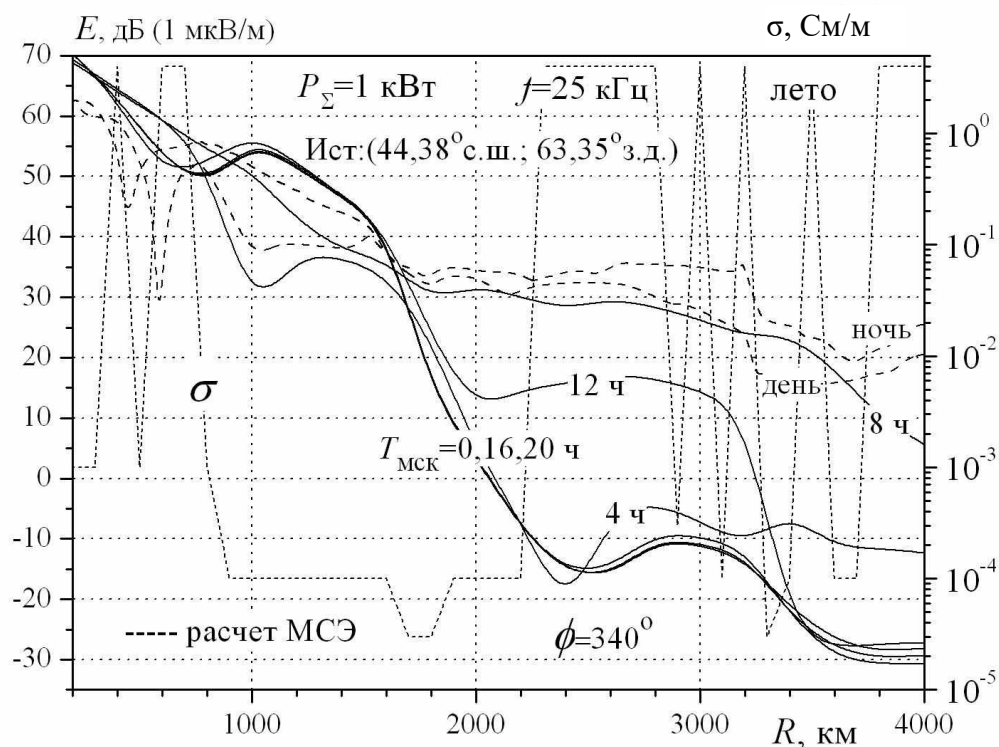


Рис. 4. Результаты расчетного эксперимента в соответствии с методикой [8]

Этот эффект выявляется по результатам расчета поля по программе СПБГУ. Расчеты по программе МСЭ этого эффекта лишены, хотя в документе [8] утверждается, что проводимость почвы вдоль трассы является важным фактором. В связи с этим дальнейший численный анализ проводится с помощью программы СПБГУ.

Интересно также более детально обсудить влияние освещенности трассы. Такая иллюстрация представлена на рис. 5, где показан суточный ход напряженности поля на той же трассе на различных расстояниях от источника. Здесь сразу видны временные интервалы, когда вся трасса освещена. Кривые для этих интервалов имеют характерный вид «плато», и поле в этих условиях относительно стабильно. Значительная разница в уровне поля имеет место на расстояниях между 1000 км и 2000 км, поскольку на этих расстояниях трасса почва менее проводящая, рис. 4. Иная картина имеет место для неосвещенных и смешанных трасс. В этих случаях поле может существенно меняться в течение 1-2 часов, что не выявляется при усреднении свойств среды по всей анализируемой трассе. Это, в частности, свидетельствует о некорректности конструирования свойств среды по измерениям поля на воздушных судах. Эти измерения не являются «снимком» поля в заданный момент времени, поскольку на протяженных трассах они длятся по несколько часов, и за такой период поле может существенно изменяться при неизменной видимой освещенности трассы.

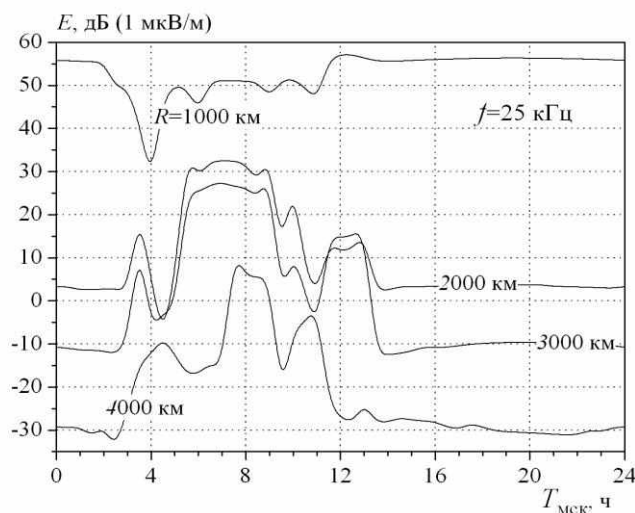


Рис. 5. Суточный ход напряженности поля на различных расстояниях от источника

Для дальнейшего анализа рассмотрим трассы различных азимутов, когда источник находится в точке с координатами (64°с.ш., 40°в.д.). Выбран день весеннего равноденствия, когда чисто дневные и чисто ночные участки трассы примерно одинаковы. Суточный ход напряженности поля для этих трасс представлен на рис. 6, где приведены также все необходимые исходные данные. Здесь опять выявляются временные интервалы, когда трасса полностью освещена. Для азимута $\phi = 270^\circ$ (направление восток-запад) средним временем освещенного участка является 9 ч московского времени, для противоположного направления запад-восток ($\phi = 90^\circ$) – 15 ч, для меридиональной трассы ($\phi = 180^\circ$) – это, естественно, полдень.

Зависимость поля от расстояния для указанных моментов времени показана на рис. 7 а. На остальных графиках рис. 7 приводится проводимость почвы на рассматриваемых трассах. Трасса с запада на восток является чисто сухопутной, меридиональная трасса – тоже преимущественно сухопутная, трасса с востока на запад – преимущественно океанская. Амплитуды полей на данных трассах близки друг к другу. Сухопутные участки трасс здесь обладают умеренной электропроводностью земной поверхности ($\sigma = 10^{-2}$ См/м – влажная почва, $\sigma = 10^{-3}$ См/м – сухая почва). Поле над такими участками незначительно отличается от поля над морскими трассами. Аномальное дополнительное затухание поля имеет место

только на протяженных сухопутных участках, особенно, с чрезвычайно низкой электропроводностью порядка 10^{-4} См/м. Одна из таких трасс над Канадским геологическим щитом была рассмотрена выше (рис. 4). Другим характерным примером аналогичной трассы является Гренландия. Подобных трасс на Земном шаре немного.

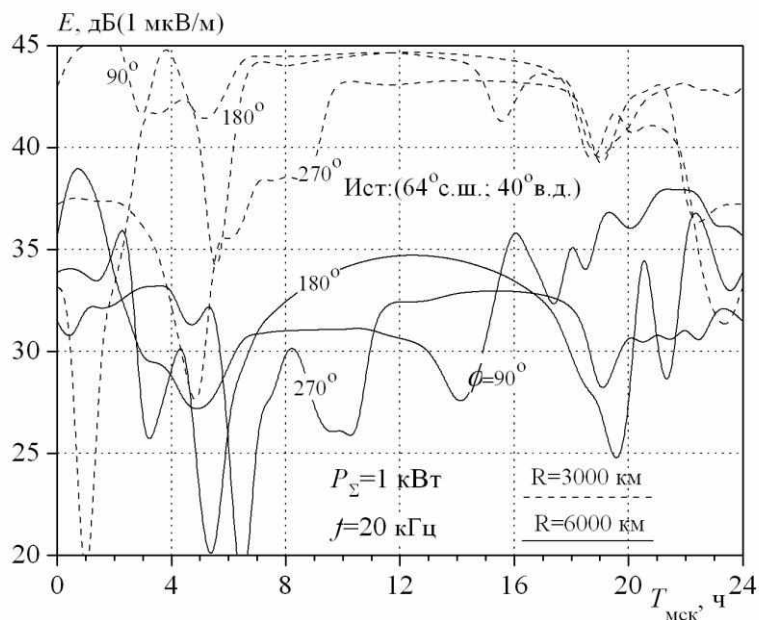


Рис. 6. Суточный ход напряженности поля на различных трассах

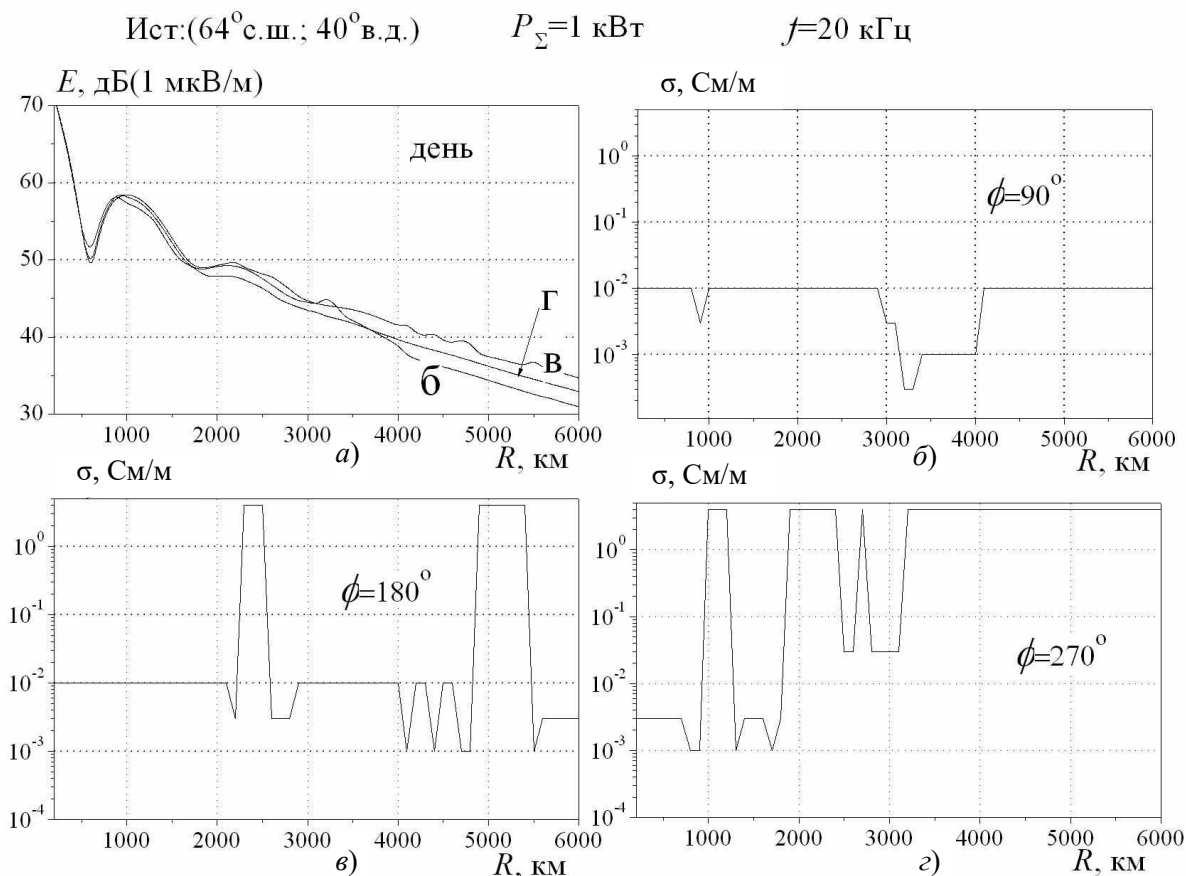


Рис. 7. Зависимость поля от расстояния для дневного времени а);
проводимость почвы на рассматриваемых трассах б), в), з)

На неосвещенных трассах поле в большей степени определяется свойствами ионосферы, влияние параметров почвы здесь менее значимо. Зависимость $E(R)$ на неосвещенных или частично освещенных трассах представлено на рис. 8 сплошными линиями. Соответствующие моменты времени, для которых проведены расчеты, выбраны по результатам, показанным на рис. 6.

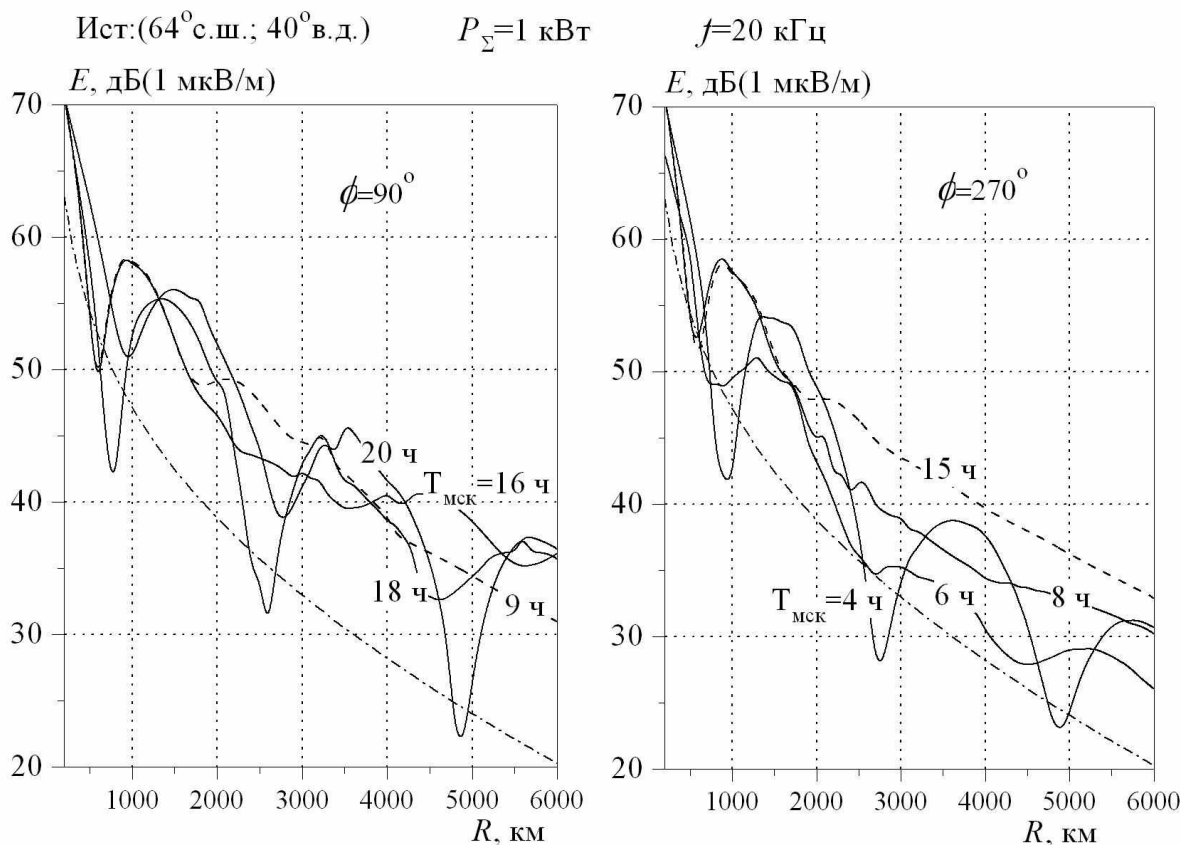


Рис. 8. Зависимость поля от расстояния для неосвещенного и частично освещенного времени суток на трассе

Характерна существенная нерегулярность хода напряженности поля, причем эта нерегулярность сказывается на небольших интервалах времени. Для сравнения здесь же пунктиром приведена напряженность поля для случая полной освещенности трасс, что было уже показано на рис. 7. Эти данные еще раз свидетельствуют о неприемлемости использования ограниченного числа моделей трасс на базе экспоненциальной ионосферы, что рекомендуется в документе [8].

На рис. 8 штрих-пунктиром приведены также результаты расчетов по известной полуэмпирической формуле Остина. Считается, что эта формула получена на основании обобщения результатов многочисленных измерений напряженности поля, и она может использоваться для прогнозирования поля в дневных условиях на морских трассах [9]. Это, однако, противоречит приведенным на рис. 8 данным. Такой результат не следует считать неожиданным. Еще на рубеже 1950-х годов, когда не существовало волноводной теории распространения радиоволн, один из авторов монографии [10] Я.Л. Альперт выполнил сравнение результатов, получаемых по формуле Остина и другим подобным полуэмпирическим формулам, с имеющимися в то время экспериментальными данными. Был сделан вывод о невозможности описания полей СДВ диапазона с помощью такого

упрощенного подхода и о необходимости создания теории с учетом ионосферы Земли. Такая теория была создана в последующие десятилетия.

Описанные результаты основаны на расчетах, выполненных для 2024 года, когда активность Солнца близка к максимуму. Вместе с тем в диапазоне СДВ гелиоциклический фактор порой оказывает заметное влияние на распределение поля в волноводе Земля-ионосфера. Это иллюстрируется на рис. 9, где показан суточный ход напряженности поля при различных расстояниях от источника. Сплошными линиями представлена напряженность поля для максимума солнечной активности, что было рассмотрено выше (например, рис. 6). Пунктиром показана напряженность на тех же трассах для минимума солнечной активности (2019 год). Нумерация каждой пары кривых соответствует расстоянию в тысячах километров.

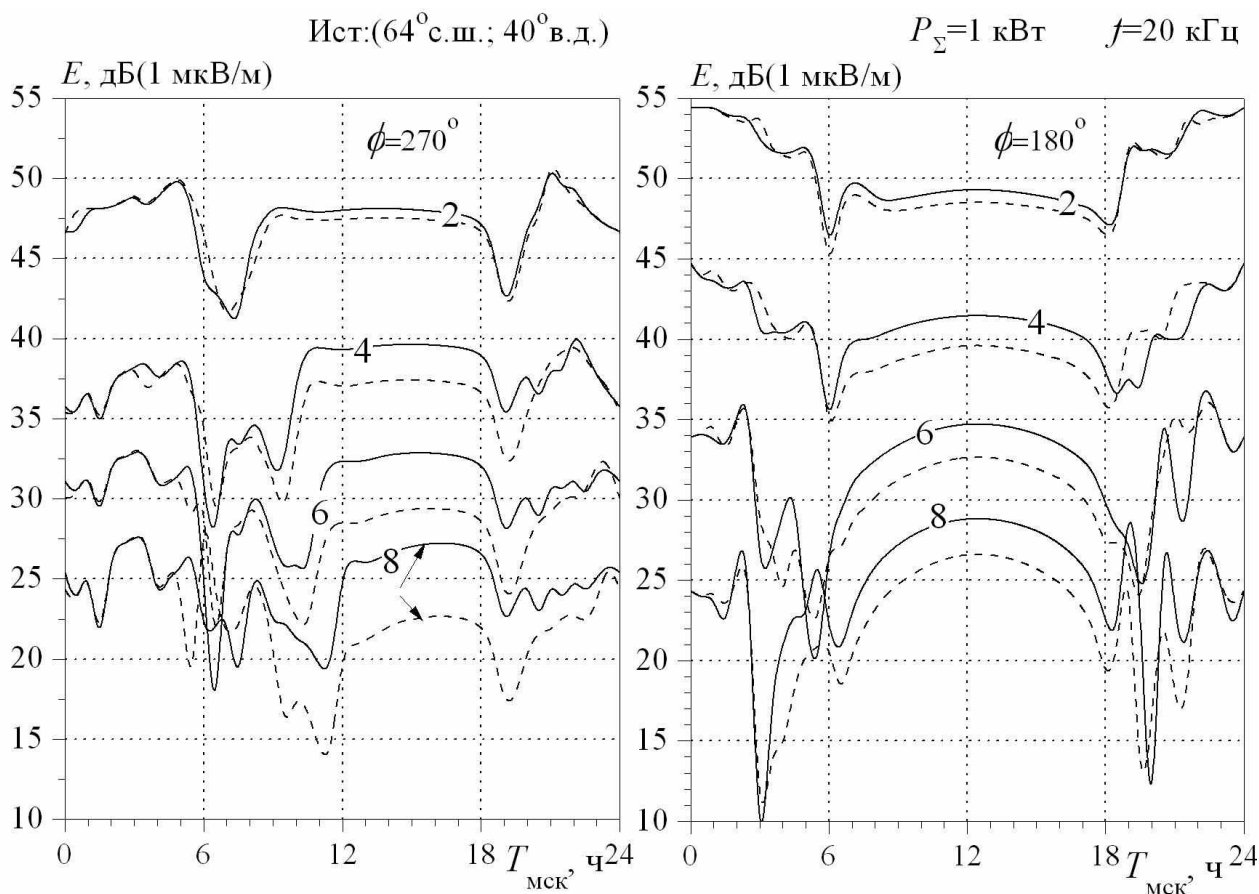


Рис. 9. Суточный ход напряженности поля при различных расстояниях от источника

При высокой активности Солнца уровень поля, естественно, выше. При больших расстояниях на высокоширотных трассах ($\phi = 270^\circ$) разница в уровне поля в зависимости от солнечной активности может достигать 5-6 дБ и более, с чем необходимо считаться на практике. В средних широтах ($\phi = 180^\circ$) влияние гелиоциклического фактора ниже.

Описанный анализ был выполнен для средних частот СДВ диапазона (20 и 25 кГц). На практике же используется диапазон 10-30 кГц. Известно, например, что поле в нижнем участке указанного диапазона несколько стабильнее. В верхнем участке диапазона существенно заметнее флуктуации поля, особенно на неосвещенных трассах. Вместе с тем основные качественные выводы, которые были здесь получены, можно отнести ко всему, используемому на практике, СДВ диапазону.

Выводы

- 1) Глобальное прогнозирование поле СДВ диапазона необходимо проводить только на базе многопараметрической волноводной задачи, учитывающей все многообразие геофизических данных.
- 2) Наиболее совершенной из известных программных реализаций прогнозирования поля является программа, разработанная в Санкт-Петербургском Государственном университете. Программа построена на базе современных математических методов и моделей окружающей среды.
- 3) Программа СПбГУ позволяет с контролируемой точностью выполнять прогнозирования полей для заданной даты и времени суток. Расчеты по данной программе имеют убедительное экспериментальное подтверждение.
- 4) Наибольшее влияние на поле в волноводе Земля-ионосфера оказывает степень освещенности трассы. В дневных условиях поле относительно стабильно. На неосвещенных и смешанных трассах флуктуации поля существенны, и точность прогнозирования ниже.
- 5) Проводимость земной поверхности оказывает меньшее влияние на поле вдоль трассы. Этот параметр оказывает заметное влияние только над протяженными сухопутными трассами, особенно, с чрезвычайно низкой проводимостью.
- 6) На высокоширотных трассах следует считаться с гелиоциклическим фактором, связанным с солнечной активностью.
- 7) Различные методы, основанные на конструировании моделей ограниченного числа типовых трасс, а тем более полуэмпирические формулы не позволяют получить удовлетворительные для практики результаты по прогнозированию полей.

Литература

1. Фок В. А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1970. 520 с.
2. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение радиоволн в волноводном канале земля-ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 151 с.
3. Орлов А. Б., Азарнин Г. В. Основные закономерности распространения сигналов СДВ диапазона в волновом канале Земля – ионосфера (Обзор экспериментальных работ) // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: Изд. ЛГУ, 1970. Вып. 10. С. 3-107.
4. Азарнин Г. В., Колсанов В. А., Орлов А. Б. О возможной структуре глобальной модели нижней ионосферы для прогнозирования СДВ // Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: Изд. ЛГУ, 1987. Вып. 21. С. 112-125.
5. ГОСТ 25645.157-94. Ионосфера Земли нижняя. Модель глобального распределения концентрации и эффективной частоты соударений электронов для прогнозирования низкочастотных радиополей. М.: Стандартинформ, 1994.
6. Morgan R. R., Maxwell E. L. Omega navigation system conductivity map. Report N 54-F-1, DECO Electronics Inc., Boulder, Colorado 80302, 1965.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 567 с.
8. Рекомендация МСЭ-R P.684-7. Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц. – Женева: МСЭ, 2016.
9. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
10. Альперт Я. А., Гинзбург В. Л., Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953. 883 с.

References

1. Fock V. A. Problems of diffraction and propagation of electromagnetic waves. Moscow. Sovetskoe radio Publ., 1970. 520 p. (in Russian).

2. Makarov G. I., Novikov V. V., Rybachek S. T. Propagation of radio waves in the waveguide channel of the earth-ionosphere and in the ionosphere. Moscow. Nauka, 1994, 151 p. (in Russian).
3. Orlov A. B., Azarnin G. V. The main patterns of propagation of ADD signals in the Earth-ionosphere wave channel (Review of experimental works). Problems of diffraction and propagation of waves. Leningrad. LSU Publ., 1970. No. 10. Pp. 3-107 (in Russian).
4. Azarnin G.V., Kolsanov V.A., Orlov A. B. On the possible structure of the global model of the lower ionosphere for predicting ADD. Problems of diffraction and wave propagation. Leningrad. LSU Publ., 1987. No. 21. Pp. 112-125 (in Russian).
5. GOST 25645.157-94. Earth's ionosphere is lower. Global concentration distribution and effective electron impact frequency model for prediction of low frequency radio fields. Moscow. Standartinform, 1994 (in Russian).
6. Morgan R. R., Maxwell E. L. Omega navigation system conductivity map. Report N 54-F-1, DECO Electronics Inc., Boulder, Colorado 80302, 1965.
7. Wentzel E. S. Probability theory. Moscow. Science Publ., 1969. 567 p. (in Russian).
8. ITU-R Recommendation P.684-7. Prediction of field strength at frequencies below approximately 150 kHz. Geneva. ITU, 2016 (in Russian).
9. Dolukhanov M. P. Propagation of radio waves. M.: «Communication», 1972, 336 p. (in Russian).
4. Dodonov A. V., Mikheev A. F. Underwater Radio. M.: Military ed., 1996, 188 p. (in Russian).
10. Alpert Y. A., Ginsburg V. L., Feinberg E. L. Radio Wave Propagation. Moscow. State. Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1953. 883 p. (in Russian).

Статья поступила 12.03.2025 г.

Информация об авторах

Акулов Валерий Семёнович – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий Военно-морского флота, корабельных комплексов и средств обмена информацией и разведки (НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р) НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542 90 54. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Бисярин Михаил Александрович – Доктор физико-математических наук. Ведущий научный сотрудник кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: радиофизика, аналитические методы в теории распространения волн. E-mail: m.bisyarin@spbu.ru.

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7.

Угрик Лариса Николаевна – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ КК СОИ Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Область научных интересов: повышение эффективности обеспечения радиосвязи с морскими объектами. Тел.: +7(812)542 90 54. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Петров Андрей Николаевич – начальника научно-исследовательского отделения. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7 911 262 84 37. E-mail: inteltech@inteltech.ru.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

Analysis of factors influencing the spread of the SLE radio waves

V. S. Akulov, M. A. Bisyarin, L. N. Ugrik, A. N. Petrov

Abstract. Relevance: the paper provides quantitative illustrations of the main patterns of ADD fields on long-distance routes, as well as an analysis of the impact on the field at the point of observation of various environmental parameters. Quantitative analysis is provided using software developed at St. Petersburg State University. Moreover, **the novelty** disclosed in the article of the general methodology for calculating electromagnetic fields of the very low frequency range (3-30 kHz) and its software implementation is that at present it is appropriate to talk not just about calculating fields, but about a method for predicting them, since the proposed software product also contains models of the necessary environmental parameters. **Methods:** global prediction of ultra-long wave range fields should be carried out only on the basis of a multi-parameter waveguide problem that takes into account all the variety of geophysical data. **Theoretical significance:** the program implementation of the implemented electronic version of the map contains 10 gradations in specific conductivity and permittivity of the Earth with the discreteness of dividing the earth's surface into homogeneous sections of 0.5×0.5 degrees in properties. At the same time, unlike the existing Morgan map, it not only takes into account the geological structure of the earth's surface, but also reflects the effects of seasonal changes in parameters. **Practical significance:** the proposed software allows with controlled accuracy to perform field predictions for a given date and time of day. Moreover, the calculations for this program have convincing experimental confirmation, which is what it is.

Keywords: diffraction problem on the open sphere, very low frequencies, extra-long waves, daily course of field strength, electro-magnetic fields.

Information about Authors

Akulov Valery Semenovich – Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7 (812)542 90 54.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya St. 8.

Bisyrin Mihail Aleksandrovich – Doctor of Physics and Mathematics Sciences. Leading Researcher, Department of Radiophysics, St. Petersburg State University. Research interests: radiophysics, analytical methods in the theory of radio wave propagation. E-mail: m.bisyrin@spbu.ru

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Universitetskaya nab., bild. 7.

Ugrik Larisa Nikolaevna – Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Research. The Scientific Research Center for Telecommunications Technologies of the Navy, Ship Complexes and means of information Exchange and Intelligence of the Scientific Research Institute of the OSIS of the Navy VUNTS of the Navy "Naval Academy" Tel.: +7(812)542 90 54.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya St. 8.

Petrov Andrey Nikolaevich – Head of Research Department. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel. +7 911 262 84 37. E-mail: inteltech@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya St. 8.

Для цитирования: Акулов В. С., Бисярин М. А., Угрик Л. Н., Петров А. Н. Анализ факторов, влияющих на распространение радиоволн СДВ диапазона // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 85-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-85-98

For citation: Akulov V. S., Bisyrin M. A., Ugrik L. N., Petrov A. N. Analysis of factors influencing the spread of the SLE radio waves. Means of communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 85-98 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-85-98

На Запад головой

Шёл бой за Днепр, за правый берег...
Шёл бой за маленький плацдарм.
В своих солдат безмерно веря,
Приказ им отдал командарм:

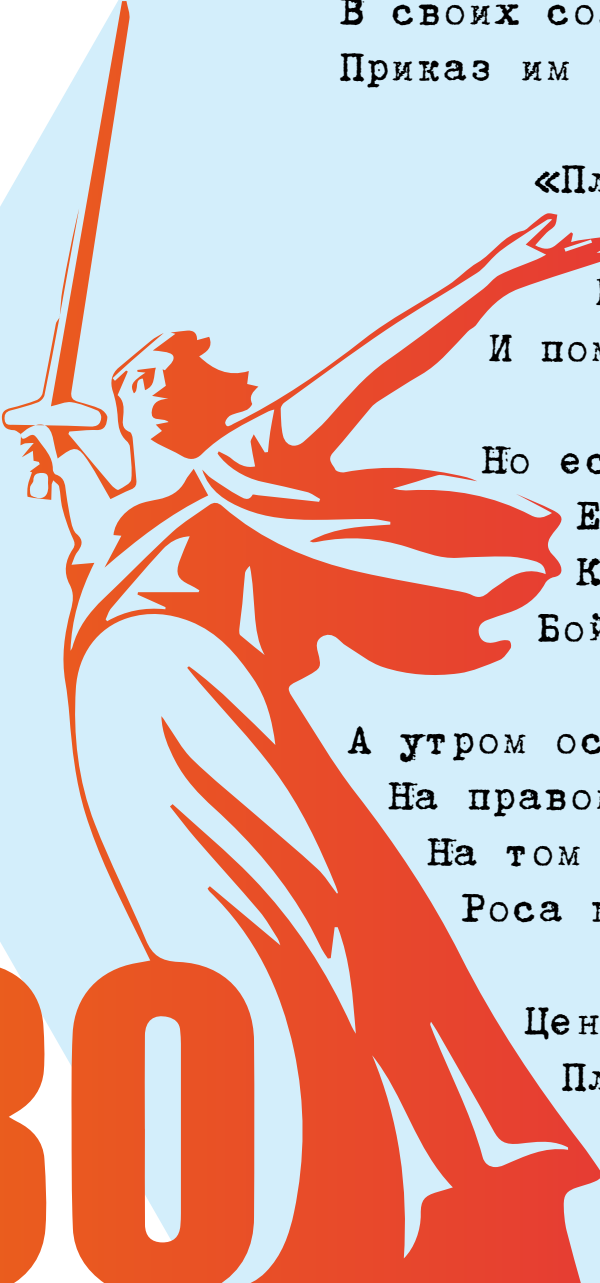
«Плацдарм во что бы то ни стало
Любой ценою удержать!».
Их было мало, очень мало,
И помощь неоткуда ждать.

Но есть приказ, есть долг солдата,
Есть вера в Родину, в народ...
Когда же кончились гранаты,
Бой рукопашный принял взвод.

А утром основные силы
На правом были берегу...
На том плацдарме тихо было,
Роса краснела на лугу.

Ценою жизни удержали
Плацдарм, неравный приняв бой.
Сыны Отчизны, все лежали
Они на Запад головой.

Владимир Жуков



80
ПОБЕДА!