



**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.

**Кузичкин А.В.**

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

**Курносов В.И.**

Главный научный сотрудник 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

**Габриэльян Д.Д.**

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

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

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

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

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

Военная академия связи (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Михайлов Р.П.**

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

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

Военная академия связи (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Одоевский С.М.**

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

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

Военная академия связи (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Пашинцев В.П.**

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

ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Путилин А.Н.**

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

ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Федоренко В.В.**

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

ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Финько О.А.**

Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменка (г. Краснодар).

Д.т.н., профессор

Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменка (г. Краснодар).

Д.т.н., профессор

**Цимбал В.А.**

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

Военная академия связи (г. Санкт-Петербург).

Д.т.н., профессор

**Семенов С.С.**

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

ПАО «Интелтех» (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

Д.в.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. Budenny. 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 RVSN 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 print-макета: **Мамончикова А.С.**

Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**

Поддержка сетевой версии журнала: **Тюкинеева Л.В.**

Секретарь редакции: **Тюкинеева Л.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](mailto:mce-journal@inteltech.ru)

Официальный сайт: [www.inteltech.ru](http://www.inteltech.ru); [www.mce-journal.ru](http://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 публикации 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 (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/litm/means-of-communication-equipment/>; <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/e79656/>

Свободная цена

Тираж: 40 экз.

Подписано в печать 19.12.2025. Дата выхода в свет 22.12.2025

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Турилов В.А.	2
Определение параметров рельефа местности и характеристик тактических средств радиосвязи, позволяющих организовать скрытную сеть связи вблизи линии боевого соприкосновения	14
Курочкина В. С., Колодяжный П. А.	14
Оптимизация функционирования передовых пунктов технического обеспечения как фактор повышения эффективности системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления	
Акулов В. С., Угрек Л. Н., Петров А. Н.	26
Приближенный метод расчета электромагнитных полей СДВ диапазона	

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Иванов Д. В., Путилин А. Н.	35
Фазовый фильтр движущегося навигационного приемника импульсно-фазовой радионавигационной системы	

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Шемаев К. Е., Ребдев П. А., Степина Н. О.	41
Векторизация методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений на процессорной архитектуре RISC-V	

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

Одоевский С. М., Зизевский В. А., Симонова К. О.	51
Повышение эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом	

### ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Путилин А. Н., Шаптала В. С.	63
Выбор системы помехоустойчивого кодирования для сверхширокополосных каналов радиосвязи	

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Будко Д. Д., Будко П. А., Клименко А. Д., Рыжкова Д. Н.	74
Модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами	

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Карпухин С. А.	84
Четырехсекторная пирамidalная фазированная антенна решетка кругового обзора с широкой рабочей полосой пропускания	

### ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Гусеница Я. Н., Квасов М. Н., Ефремов А. В.	94
Модуль коммутации средств связи	

Список научных статей, опубликованных в журнале «Техника средств связи» в 2025 году	99
---	----

## CONTENTS

### COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Turilov V. A.	2
Determination of terrain parameters and tactical radio communication means characteristics, allowing to organize a hidden communication network near the combat contact line	

Kurochka V. S., Kolodzazny P. A.	14
Optimization of the functioning of advanced technical support points as a factor in increasing the efficiency of the technical support system for communications and automated control systems	

Akulov V. S., Ugrik L. N., Petrov F. N.	26
An approximate method for calculating electromagnetic fields in the ultra-long wave range	

### ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Ivanov D. V., Putilin A. N.	35
Phase filter of a moving navigation receiver of a pulse-phase radio navigation system	

### COMPUTING SYSTEMS

Shemaev K. E., Rebdev P. A., Stepin N. O.	41
Vectorization of methods for solving ordinary differential equations on the risc-v processor architecture	

### INFORMATION PROCESSES AND TECHNOLOGIES. COLLECTION, STORAGE AND PROCESSING OF INFORMATION

Odoevsky S. M., Zizevsky V. A., Simonova K. O.	51
Improving the efficiency of the multi-service transport communication network by balancing multimedia traffic together with channel resource management	

### INFORMATION SECURITY ISSUES

Putilin A.N., Shaptala V.S.	63
Selecting an error-correcting coding system for ultra-wideband radio channels	

### ROBOTIC SYSTEMS

Budko D. D., Budko P. A., Klimenko A. D., Ryzhkova D. N.	74
A frequency band selection model for the formation of decameter radio control lines for unmanned transport systems	

### MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Karpukhin S. A.	84
Four-section pyramidal phased array circular-view antenna with wide bandwidth	

### INTELLECTUAL PROPERTY OBJECTS AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT DEVELOPMENT

Gusenitsa Y. N., Kvasov M. N., Efremov A. V.	94
Commutation module for communication equipment	

**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

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 621.37

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-2-13

**Определение параметров рельефа местности и характеристик тактических средств радиосвязи, позволяющих организовать скрытную сеть связи вблизи линии боевого соприкосновения**

Турилов В. А.

**Аннотация.** В статье ставится задача подтвердить возможность радиоэлектронной маскировки средств радиосвязи в тактическом звене управления путем комплексного использования особенностей рельефа местности, создающих условия для затухания радиосигналов, распространяющихся в направлении противника, до уровня, исключающего выявление местоположения источников излучения средствами радиоэлектронной разведки, обеспечивая при этом устойчивую связь с органами управления с помощью радио-ретрансляторов на летно-подъемных средствах, располагаемых на значительном удалении от линии боевого соприкосновения. Целью работы является создание математической модели оценки степени затухания радиосигналов в зависимости от изменяемых параметров рельефа местности и характеристик источников и приемников излучения и проверка модели на конкретном примере параметров. При моделировании используется методика оценки степени затухания радиосигналов на радиотрассах между радиоэлектронными средствами связи и комплексами радиоэлектронной разведки, сформированная на основе положений Рекомендаций МСЭ-Р серии Р, содержащая основные теоретические положения для проведения расчетов. Новизна предлагаемого решения состоит в создании на основе известных теоретических положений практического инструмента, позволяющего формировать требования к размещению и маскировке на местности средств радиосвязи с заданными техническими характеристиками. К результатам работы следует отнести создание математической модели оценки степени затухания радиосигналов в зависимости от параметров рельефа местности и характеристик источников и приемников излучения. В статье представлены результаты математического моделирования для конкретного примера значений параметров естественных и возводимых на местности препятствий, характеристик средств радиосвязи с направленными и всенаправленными антеннами, радио-ретрансляторов на летно-подъемных средствах, а также воздушных, наземных и переносных (носимых) комплексов радиоэлектронной разведки противника. Результаты математического моделирования подтверждают возможность создания скрытных сетей радиосвязи для управления войсками и оружием вблизи линии боевого соприкосновения при применении средств радиосвязи и радио-ретрансляторов на летно-подъемных средствах с заданными техническими характеристиками и направленными антеннами в комплексе со специальными способами радиомаскировки радиопередающих устройств с помощью естественных и возводимых на местности препятствий. Практическая значимость работы заключается в возможности применения созданной математической модели для разработки технических требований к перспективным тактическим средствам радиосвязи, а также наставлений или иных нормативных документов по радиомаскировке средств радиосвязи вблизи линии боевого соприкосновения.

**Ключевые слова:** абонентская станция, базовая станция, затухание радиосигнала, комплекс радиоэлектронной разведки, радиотрасса, рельеф местности, скрытность радиосвязи.

**Введение**

В современных условиях ведения боевых действий защищенность от радиоэлектронной разведки противника (РЭР) систем радиосвязи тактического звена, в особенности вблизи линии боевого соприкосновения (ЛБС), играет важнейшую роль в обеспечении живучести и боевой эффективности воинских подразделений.

Один из путей повышения разведзашщенности систем радиосвязи вблизи ЛБС состоит в обеспечении в заданных условиях скрытности источников излучения радиосигналов (абонентских станций – АС) от их обнаружения всеми типами комплексов радиоэлектронной разведки (КРЭР), применение которых возможно противником. То есть, при заданных технических характеристиках и расположении АС на местности степень затухания радиосигнала АС в направлении приемника радиосигналов вышестоящего командования (базовой станции – БС) должна обеспечивать качественный прием информации у адресата, но при этом затухание радиосигнала АС в направлении КРЭР противника должно исключать возможность определения КРЭР местоположения АС путем обнаружения ее радиоизлучения.

## 1. Параметры математической модели радиотрассы

Оценку выполнения АС указанных выше требований в настоящей работе предложено осуществлять путем математического моделирования степени затухания радиосигналов частотой от 100 МГц до 6 ГГц с мощностью излучения передатчика от 0,05 до 1,0 Вт на примере рельефа местности, представленном на рис. 1.

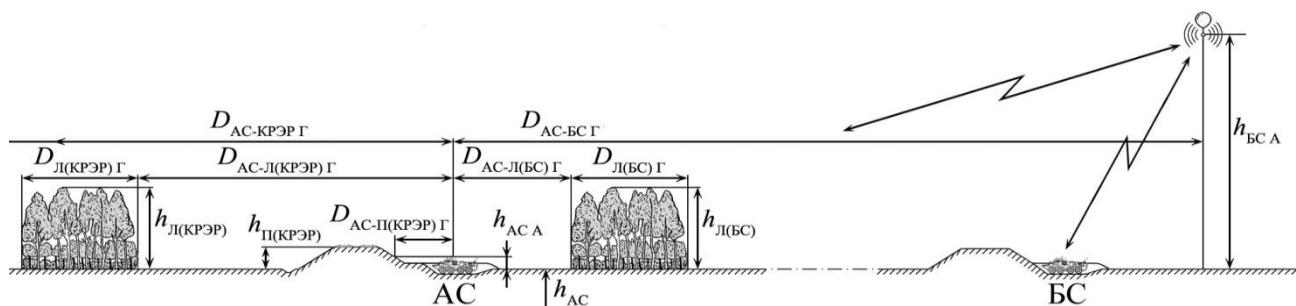


Рис. 1. Пример рельефа местности расположения АС в укрытии за железнодорожной насыпью и лесозащитными полосами

В данном примере радиообмен между АС и БС осуществляется через ретранслятор, размещенный на летно-подъемном средстве (воздушном шаре, аэростате, БПЛА или др.).

Условие приема радиосигнала АС приемником БС и КРЭР приведем к следующему виду:

$$E_{AC} - S > 0,$$

где:  $E_{AC}$  – напряженность поля радиосигнала АС, поступающего на приемную антенну БС ( $E_{AC-BC}$ ) или КРЭР ( $E_{AC-KPЭР}$ ), дБ(мкВ/м);  $S$  – чувствительность приемного тракта БС ( $S_{BC}$ ) или КРЭР ( $S_{KPЭР}$ ), дБ(мкВ/м).

Методика расчета значения  $E_{AC}$ , сформированная на основе Рекомендаций МСЭ-R серии Р, изложена автором в работах [1, 2].

Чувствительность приемного тракта  $S$  в технической литературе часто представляют комбинацией чувствительности приемника  $S_{Rx}$ , выраженной в единицах мощности (дБм) или единицах плотности мощности (дБВт/Гц), и коэффициента усиления приемной антенны.

Единицы плотности мощности радиосигнала переводятся в единицы мощности (дБВт) по формуле:

$$S_{Rx\ dBW} = S_{Rx\ dBW/Hz} + 10 \lg (\Delta F) + 60 ,$$

где:  $\Delta F$  – ширина полосы радиосигнала.

Вычисление чувствительности приемного тракта в единицах напряженности поля по значению чувствительности приемника, выраженной в единицах мощности, и значению коэффициента усиления приемной антенны выполняется по формуле:

$$S = S_{Rx dBW} - G_{Rx} + 20\lg(F) + 107,219 ,$$

где  $G_{Rx}$  – коэффициент усиления приемной антенны, дБи;  $F$  – несущая частота радиосигнала, Гц.

Основой специальных приемов радиоэлектронной маскировки АС, направленных на повышение их энергетической скрытности, служат способы целенаправленного ухудшения условий распространения электромагнитной энергии в определенном направлении за счет применения естественного рельефа местности (лесных массивов, склонов оврагов, холмов, лакколитов, терриконов, железнодорожных и автодорожных насыпей, сооружений и т. п.), а также табельных маскировочных комплектов из радиопоглощающих материалов [3].

В рассматриваемом примере рельефа местности (рис. 1) распространению радиосигнала АС в сторону КРЭР препятствует железнодорожная насыпь, обеспечивающая высокое дифракционное затухание радиосигнала из-за полного или частичного сужения просвета в первой зоне Френеля радиотрассы, и лесозащитная полоса, а в сторону БС – только лесозащитная полоса. Затухание радиосигнала в лесозащитной полосе определяется комбинацией затухания при сквозном распространении радиоволн через лесной массив в направлении приемника и затухания из-за дифракции радиосигнала на кромках элементов растительности.

Рассматриваемый пример рельефа местности расположения АС характеризуется параметрами, представленными в табл. 1. В табл. 2 представлены иные используемые при расчетах параметры радиотрасс, вычисленные на основе параметров из табл. 1. Изменяемые характеристики АС, БС и КРЭР математической модели представлены в табл. 3.

Таблица 1 – Параметры рельефа местности расположения АС

№ п/п	Параметр	Обозначение	Ед. изм.
1.	Расстояние по горизонтали <sup>1</sup> от АС до БС	$D_{AC-BC\Gamma}$	м
2.	Расстояние по горизонтали от АС до самого значительного препятствия на радиотрассе АС-БС	$D_{AC-\Pi(BC)}$	м
3.	Высота самого значительного препятствия на радиотрассе АС-БС <sup>2</sup>	$h_{\Pi(BC)}$	м
4.	Расстояние по горизонтали от АС до лесозащитной полосы на радиотрассе АС-БС	$D_{AC-L(BC)\Gamma}$	м
5.	Глубина по горизонтали лесозащитной полосы на радиотрассе АС-БС	$D_{L(BC)\Gamma}$	м
6.	Высота лесозащитной полосы на радиотрассе АС-БС	$h_{L(BC)}$	м
7.	Расстояние по горизонтали от АС до КРЭР	$D_{AC-KREP\Gamma}$	м
8.	Расстояние по горизонтали от АС до самого значительного препятствия на радиотрассе АС-КРЭР	$D_{AC-\Pi(KREP)\Gamma}$	м
9.	Высота самого значительного препятствия на радиотрассе АС-КРЭР	$h_{\Pi(KREP)}$	м
10.	Расстояние по горизонтали от АС до лесозащитной полосы на радиотрассе АС-КРЭР	$D_{AC-L(KREP)\Gamma}$	м
11.	Глубина по горизонтали лесозащитной полосы на радиотрассе АС-КРЭР	$D_{L(KREP)\Gamma}$	м
12.	Высота лесозащитной полосы на радиотрассе АС-КРЭР	$h_{L(KREP)}$	м

Таблица 2 – Дополнительные параметры рельефа местности расположения АС

№ п/п	Параметр	Формула для вычисления	Ед. изм.
1.	Угол места между горизонтальной плоскостью и лучом радиотрассы от антенны АС до антенны БС	$\Theta_{BC} = \arctg(\frac{h_{BCA} - h_{ACA}}{D_{AC-BC\Gamma}})$	град
2.	Длина радиотрассы от передающей антенны АС до приемной антенны БС	$D_{AC-BC} = \frac{D_{AC-BC\Gamma}}{\cos(\Theta_{BC})}$	м
3.	Длина части радиотрассы АС-БС от передающей антенны АС до самого значительного препятствия на трассе	$D_{AC-\Pi(BC)\Gamma} = \frac{D_{AC-\Pi(BC)\Gamma}}{\cos(\Theta_{BC})}$	м

<sup>1</sup> Для расстояний до 100 км расстояние по горизонтали между двумя точками на поверхности Земли можно принять приблизительно равным кратчайшему расстоянию между точками по сферической поверхности Земли [1].

<sup>2</sup> Значения высоты в вычислениях принимаются относительно высоты АС над уровнем моря  $h_{AC}$ .

№ п/п	Параметр	Формула для вычисления	Ед. изм.
4.	Длина части радиотрассы АС-БС от передающей антенны АС до лесозащитной полосы	$D_{AC-L(BC)} = \frac{D_{AC-L(BC)\Gamma}}{\cos(\Theta_{BC})}$	м
5.	Длина части радиотрассы АС-БС в лесозащитной полосе	$D_{L(BC)} = \frac{D_{L(BC)\Gamma}}{\cos(\Theta_{BC})}$	м
6.	Угол места между горизонтальной плоскостью и лучом радиотрассы от антенны АС до антенны КРЭР	$\Theta_{KP\varnothing P} = \operatorname{arctg}\left(\frac{h_{KP\varnothing P A} - h_{ACA}}{D_{AC-KP\varnothing P \Gamma}}\right)$	град
7.	Длина радиотрассы от передающей антенны АС до приемной антенны КРЭР	$D_{AC-KP\varnothing P} = \frac{D_{AC-KP\varnothing P \Gamma}}{\cos(\Theta_{KP\varnothing P})}$	м
8.	Длина части радиотрассы АС-КРЭР от передающей антенны АС до самого значительного препятствия на трассе	$D_{AC-P(KP\varnothing P)} = \frac{D_{AC-P(KP\varnothing P)\Gamma}}{\cos(\Theta_{KP\varnothing P})}$	м
9.	Длина части радиотрассы АС-КРЭР от передающей антенны АС до лесозащитной полосы	$D_{AC-L(KP\varnothing P)} = \frac{D_{AC-L(KP\varnothing P)\Gamma}}{\cos(\Theta_{KP\varnothing P})}$	м
10.	Длина части радиотрассы АС-КРЭР в лесозащитной полосе	$D_{L(KP\varnothing P)} = \frac{D_{L(KP\varnothing P)\Gamma}}{\cos(\Theta_{KP\varnothing P})}$	м

Таблица 3 – Изменяемые характеристики АС, БС и КРЭР

№ п/п	Параметр	Обозначение	Ед. изм.
1.	Мощность передатчика АС	$P_{AC Tx}$	Вт
2.	Рабочая частота передатчика АС	$F$	МГц
3.	Ширина полосы радиосигнала АС	$\Delta F$	МГц
4.	Коэффициент усиления антенны АС	$G_{AC}$	дБи
5.	Коэффициент защитного действия (КЗД) антенны АС	-	дБ
6.	Высота антенны АС	$h_{ACA}$	м
7.	Коэффициент усиления антенны БС в направлении передатчика АС	$G_{BC}$	дБи
8.	Чувствительность приемника БС	$S_{BC Rx}$	дБм
9.	Высота антенны БС	$h_{BC A}$	м
10.	Коэффициент усиления антенны КРЭР в направлении передатчика АС	$G_{KP\varnothing P}$	дБи
11.	Чувствительность приемника КРЭР	$S_{KP\varnothing P Rx}$	мкВ
12.	Чувствительность приемного тракта КРЭР	$S_{KP\varnothing P}$	мкВ/м
13.	Высота антенны КРЭР	$h_{KP\varnothing P A}$	м

## 2. Примеры значений параметров рельефа местности и технических характеристик АС, БС и КРЭР для математического моделирования затухания радиосигналов на радиотрассах АС-БС и АС-КРЭР

Расчет степени затухания радиосигнала на радиотрассах АС-БС и АС-КРЭР выполнен для примера рельефа, изображенного на рис. 1, при следующих условиях:

1) Погодные условия соответствуют летнему сезону с ясным небом.

2) Противник применяет несколько видов КРЭР:

- мобильный наземный комплекс (НК) РЭР типа *AN/MLQ-44B(V)1 Prophet Enhanced (PE)* (*General Dynamics Mission Systems Inc.*), предназначенный для ведения разведки на удалении 4-6 км от ЛБС. НК РЭР ведет разведку в диапазоне частот 20–15000 МГц и имеет чувствительность приемного тракта от 0,5 мкВ/м для узкополосных сигналов до 5,0 мкВ/м для широкополосных сигналов [4];
- переносной тактический комплекс (ПК) РЭР типа портативного пеленгатора *DDF007 (Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG)* [5], предназначенный для ведения разведки непосредственно на ЛБС, в тылу противника или для выявления диверсионно-разведывательных групп противника в собственном тылу. ПК РЭР

ведет разведку в диапазоне частот 20-6000 МГц и имеет чувствительность приемного тракта (в зависимости от типа применяемой антенны) от 2 до 8 мкВ/м в диапазоне от 20 до 50 МГц, 1 мкВ/м в диапазоне от 50 МГц до 3 ГГц и от 2 до 8 мкВ/м – в диапазоне от 3 до 6 ГГц;

- авиационные комплексы (АК) РЭР к 2030 году должны вести разведку в диапазоне 0,25 – 160 ГГц и иметь чувствительность приемных трактов –200 дБВт/Гц [4, 6].

На вооружении потенциального противника имеются следующие типы АК РЭР:

- комплекс типа *AN/AMQ-15* на разведывательном самолете стратегического и оперативно-тактического назначения *RC-135W «Rivet Joint»* – для ведения разведки на высоте 3 – 11,8 км на минимальном удалении 50 – 100 км от ЛБС;
  - комплекс типа *AN/ASQ-223 (ARL-M COMINT/IMINT System «Crazy Hawk»)* на разведывательном самолете *Bombardier EO-5C* или типа *AN/USD-9 «Improved Guardial V»* на разведывательном самолете *Beechcraft RC-12P «Guardrail»* – для ведения разведки на высоте 3 – 7 км на минимальном удалении 50 – 100 км от ЛБС;
  - комплекс типа *AN/ARQ-33 «Quick Fix I»* на разведывательном вертолете *Bell EH-1H* или типа *AN/ALQ-151 «Quick Fix II»* на разведывательном вертолете *Sikorsky EH-60A* – для ведения разведки на высоте 60 – 180 м на удалении 4 – 8 км от ЛБС;
  - комплекс РЭР на разведывательном БПЛА типа *RQ-5A Hunter* или *RQ-7A Shadow 200* – для ведения разведки на высоте до 3000 м на удалении 5 – 15 км от ЛБС.
- 3) Значения параметров рельефа местности и высоты антенн АС, БС и КРЭР для выбранного примера представлены в табл. 4.
- 4) Значения технических характеристик АС и БС представлены в табл. 5.

Таблица 4 – Пример параметров рельефа местности и высоты антенн АС, БС и КРЭР

Вид комплекса РЭР	Высота антenn и параметры рельефа местности, м																
	$h_{\text{A(AC)}}$	$h_{\text{A(БС)}}$	$h_{\text{П(БС)}}$	$h_{\text{Л(БС)}}$	$D_{\text{AC-БС}} \Gamma_{\min}$	$D_{\text{AC-БС}} \Gamma_{\max}$	$D_{\text{AC-Л(БС)}} \Gamma$	$D_{\text{Л(БС)}} \Gamma$	$h_{\text{A(KРЭР)}}$	$h_{\text{П(KРЭР)}}$	$h_{\text{Л(KРЭР)}}$	$D_{\text{AC-КРЭР}} \Gamma_{\min}$	$D_{\text{AC-КРЭР}} \Gamma_{\max}$	$D_{\text{AC-Л(КРЭР)}} \Gamma$	$D_{\text{AC-Л(КРЭР)}} \Gamma$	$D_{\text{Л(КРЭР)}} \Gamma$	
НК РЭР	2	50	0	15	400	30 305	0	18	20	15	4	15	400	18 883	10	52	20
ПК РЭР										2			400	10 101			
АК РЭР										10 000			50 000	125 000			

Таблица 5 – Пример технических характеристик АС и БС

№ п/п	Рабочая частота АС, МГц	Ширина полосы радиосигнала, МГц	Абонентская станция				Базовая станция (узел связи)			
			Мощность передачи, Вт	Тип антенны	КУ, дБи	КЗД (180±30°), дБ	Чувствительность приемника, дБм	Тип антенны	КУ, дБи	
1	87,5	0,0031	0,1; 1; 4	Направленная	9	16	-113,0	Направленная	9	
				Всенаправленная	2	0				
2	255	0,0125	0,1; 1; 4	Направленная	9	18	-116,0	Направленная	9	
				Всенаправленная	2,5	0				
3	433	0,025	0,1; 1; 4	Направленная	9	18	-116,0	Направленная	9	
				Всенаправленная	2	0				
4	868	0,5	0,1; 1; 4	Направленная	9	18	-116,0	Направленная	9	
				Всенаправленная	2	0				
5	1 350	1,0	0,1; 1; 4	Направленная	9	18	-116,0	Направленная	9	
				Всенаправленная	2	0				
6	2 690	5,0	0,1; 1; 4	Направленная	15,5	19,5	-104,0	Направленная	15,5	
				Всенаправленная	2	0				
7	4 400	10,0	0,1; 1; 4	Направленная	17	30	-104,0	Направленная	12,8	
				Всенаправленная	6	0				
8	5 875	15,0	0,1; 1; 4	Направленная	17	30	-104,0	Направленная	12,8	
				Всенаправленная	6	0				

**3. Оценка результатов моделирования затухания радиосигналов на радиотрассах АС-БС и АС-КРЭР для заданных значений параметров рельефа местности и технических характеристик АС, БС и КРЭР**

В табл. 6, 7 указан результат математического моделирования прохождения радиосигналов АС в направлении КРЭР и БС в условиях рассматриваемого примера рельефа местности.

Фоном в таблицах выделены ячейки, относящиеся к радиосигналам АС, не обнаруживаемым соответствующими типами КРЭР противника, ведущими разведку на расстояниях от ЛБС, установленных тактикой их применения. Значения максимальной дальности скрытной связи между АС и БС в условиях рассматриваемого примера рельефа местности при соответствующих типах антенн, значениях мощности радиопередатчика и частоты радиосигналов АС в табл. 6 и 7 выделены жирным шрифтом.

Таблица 6 – Результаты математического моделирования прохождения радиосигналов АС с всенаправленной антенной в направлении КРЭР и БС

$F_{AC}$ , МГц	$\Delta F$ , МГц	$p_{AC\ Tx} = 0,1$ Вт			$p_{AC\ Tx} = 1$ Вт			$p_{AC\ Tx} = 4$ Вт					
		Макс. даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>всенаправленной антеной</b> , м	Макс. даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>всенаправленной антеной</b> , м	Макс. даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>всенаправленной антеной</b> , м	Макс. даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>всенаправленной антеной</b> , м	Макс. даль- ность связи с БС, м			
		БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР	БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР	БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР
87,5	0,0031	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
255	0,0125	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
433	0,025	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
868	0,5	30305	> 4000	> 400	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
1350	1,0	28900	> 4000	> 400	> 50000	30305	> 4000	> 400	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
2690	5,0	<b>7400</b>	< 4000	< 400	< 50000	15700	< 4000	> 400	> 50000	26800	< 4000	> 400	> 50000
4400	10,0	<b>3850</b>	< 400	< 400	< 50000	9600	< 4000	< 400	> 50000	15100	< 4000	< 400	> 50000
5875	15,0	<b>2650</b>	< 400	< 400	< 50000	<b>6500</b>	< 400	< 400	< 50000	10500	< 400	< 400	> 50000

Таблица 7 – Результаты математического моделирования прохождения радиосигналов АС с направленной антенной в направлении КРЭР и БС

$F_{AC}$ , МГц	$\Delta F$ , МГц	$p_{AC\ Tx} = 0,1$ Вт			$p_{AC\ Tx} = 1$ Вт			$p_{AC\ Tx} = 4$ Вт					
		Макс. Даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>направленной антеной</b> , м	Макс. Даль- ность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>направленной антеной</b> , м	Макс. дальность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>направленной антеной</b> , м	Макс. дальность связи с БС, м	Мин. дальность обнаружения КРЭР радиосигнала от АС с <b>направленной антеной</b> , м	Макс. дальность связи с БС, м			
		БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР	БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР	БС	НК РЭР	ПК РЭР	АК РЭР
87,5	0,0031	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
255	0,0125	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
433	0,025	30305	> 4000	> 400	> 100000	30305	18884	10102	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
868	0,5	30305	< 4000	> 400	> 50000	30305	> 4000	> 400	> 100000	30305	18884	10102	> 100000
1350	1,0	30305	< 4000	> 400	> 50000	30305	< 4000	> 400	> 50000	30305	> 4000	> 400	> 50000
2690	5,0	<b>21600</b>	< 4000	< 400	< 50000	30305	< 4000	> 400	> 50000	30305	< 4000	> 400	> 50000
4400	10,0	<b>10400</b>	< 400	< 400	< 50000	<b>22800</b>	< 400	< 400	< 50000	<b>30305</b>	< 400	< 400	< 50000
5875	15,0	<b>7000</b>	< 400	< 400	< 50000	<b>15100</b>	< 400	< 400	< 50000	<b>25600</b>	< 400	< 400	< 50000

На рис. 2-4 изображены построенные на основе результатов математического моделирования диаграммы затухания радиосигналов, излучаемых АС с направленной антенной, при их прохождении по трассам АС-БС и АС-КРЭР в условиях рассматриваемого примера рельефа местности. В настоящей работе при моделировании учитывается только распространение радиоволн частотой от 30 МГц до 6 Гц в зоне прямой видимости.

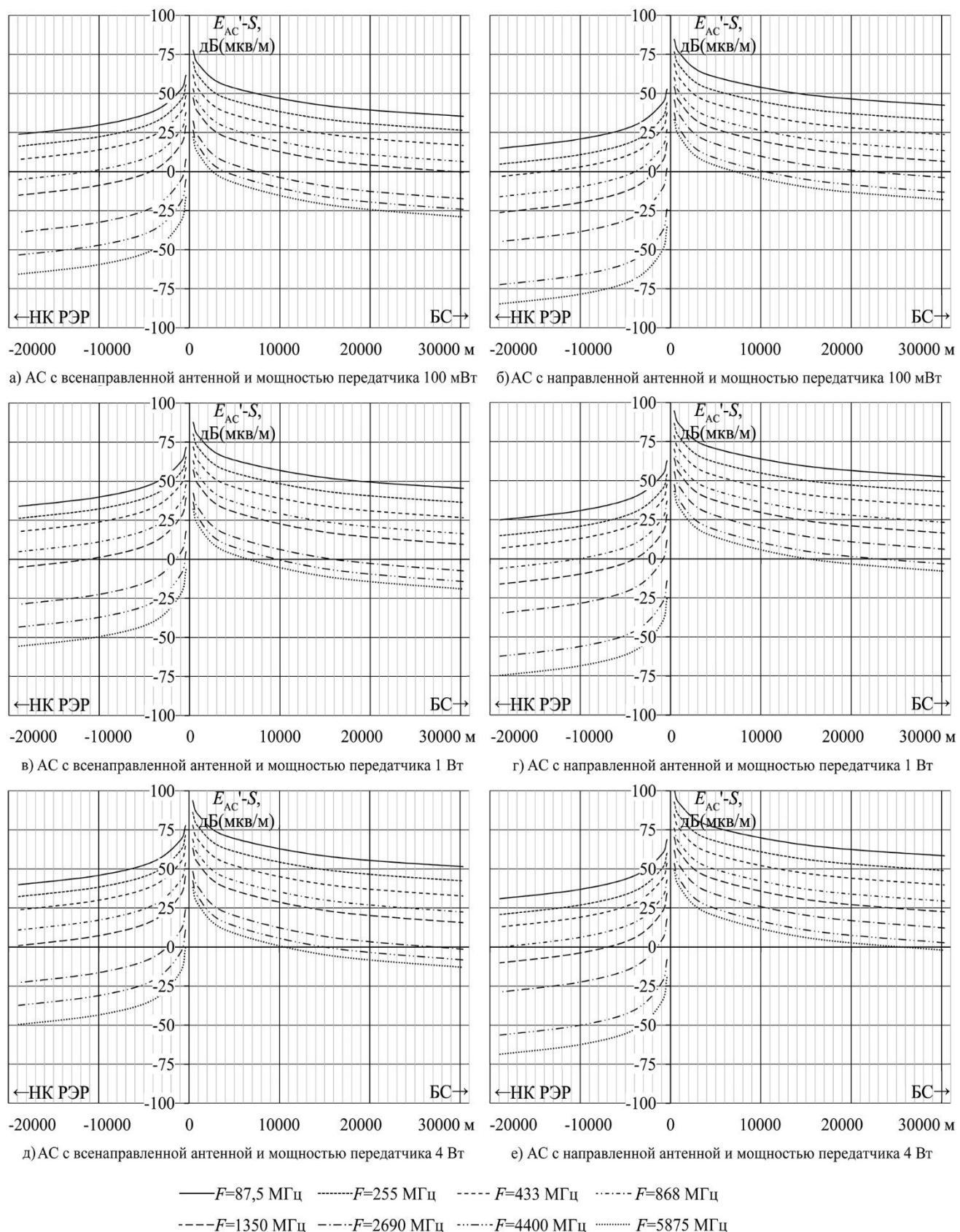


Рис. 2. Диаграммы затухания радиосигналов, излучаемых АС в направлении  
мобильный наземный комплекс РЭР – БС

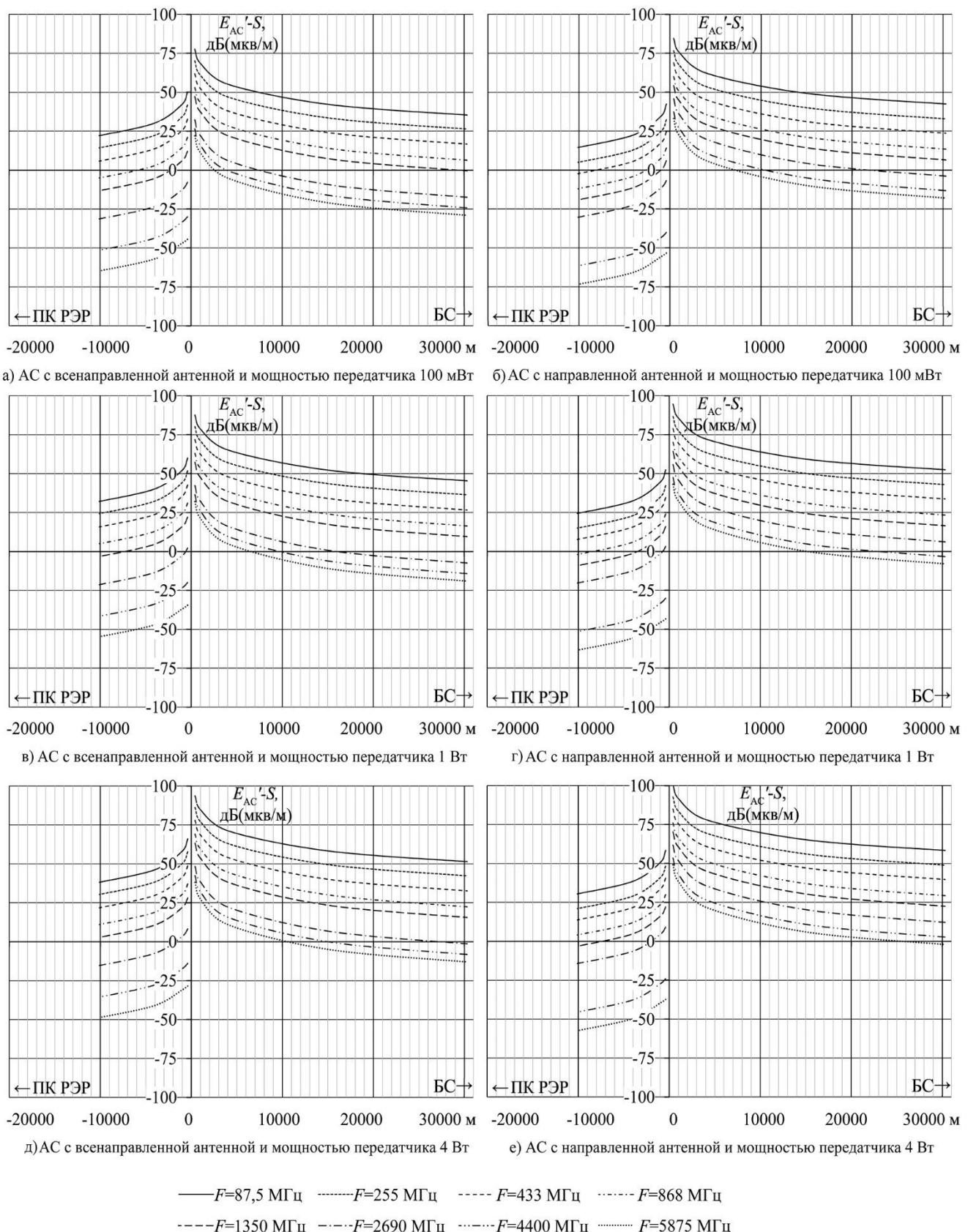


Рис. 3. Диаграммы затухания радиосигналов, излучаемых АС в направлении переносной тактический комплекс РЭР – БС

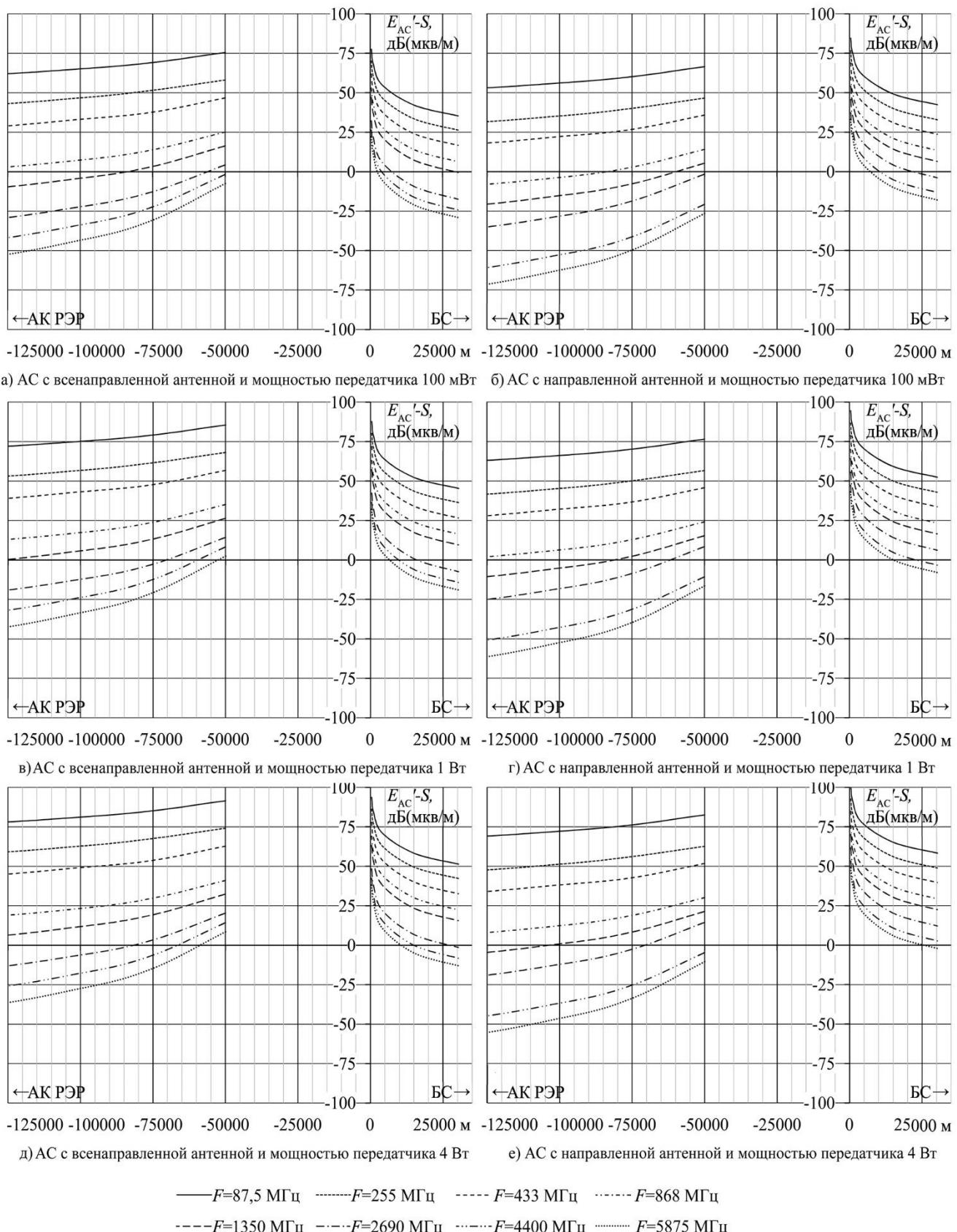


Рис. 4. Диаграммы затухания радиосигналов, излучаемых АС в направлении  
авиационный комплекс РЭР – БС

Анализ результатов, представленных в табл. 6 и 7, показывает следующее:

- 1) Противодействие современных наземных и авиационных комплексов РЭР противника в условиях рассматриваемого примера не позволяет организовывать вблизи ЛБС скрытные сети радиосвязи с выбранными в примере рабочими частотами 87,5, 255, 433, 868 и 1350 МГц.
- 2) Использование в АС всенаправленных антенн теоретически может позволить организовывать на уровне *мсб* скрытные сети радиосвязи вблизи ЛБС в пределах зоны прямой видимости (в идеальных условиях рассматриваемого примера – в диапазоне частот от 2690 до 5875 МГц при мощности передатчиков АС, равной 100 мВт, на частоте 5875 МГц при увеличении мощности передатчиков до 1 Вт). Значения максимальной дальности радиосвязи в этих условиях выделены в табл. 6 жирным шрифтом. Однако, применение в боевых условиях на уровне *мсб* ретрансляторов на летно-подъемных средствах может затруднительным или невозможным из-за их демаскирующих факторов.
- 3) Расчеты показывают, что более эффективным для организации в тактическом звене управления скрытных сетей радиосвязи вблизи ЛБС может стать применение АС с направленными антennами и мощностью излучения от 100 мВт до 4 Вт, обеспечивающих скрытную радиосвязь в диапазоне частот от 4400 до 5875 МГц через многоканальный ретранслятор на летно-подъемном средстве, расположенный на значительном удалении от ЛБС (выделено в табл. 7 жирным шрифтом). При этом следует учитывать высокую вероятность появления дополнительных факторов, усиливающих затухание радиосигнала (дождь, снег, туман, пыль, дополнительные естественные и искусственные препятствия на местности и т. п.).

## Выводы

Проведенная оценка результатов математического моделирования затухания радиосигналов на радиотрассах АС – БС и АС – КРЭР для заданных в примере значений параметров рельефа местности и технических характеристик АС, БС и КРЭР показывает возможность создания скрытных сетей радиосвязи для управления войсками и оружием вблизи ЛБС при использовании АС с направленными антennами и радио-ретрансляторов на летно-подъемных средствах и применении специальных способов радиомаскировки радиопередающих устройств.

Следует отметить, что в ВС США согласно известной сетевой стратегии в качестве основного средства связи подразделений тактического уровня (от батальона и ниже), наряду с терминалами тактической спутниковой связи, должны использоваться сетевые многодиапазонные многофункциональные программно-определяемые радиостанции командной связи. Рабочие частоты этих радиостанций должны включать в т. ч. диапазон *NATO Band IV+* (4,4 – 5,875 ГГц) [7], в котором в соответствии с представленными выше результатами математического моделирования могут быть организованы скрытные сети радиосвязи вблизи ЛБС.

Примерами таких радиостанций могут служить станции широкополосной системы радиосвязи пятого поколения *GRX-8000* (*Elbit Systems C<sup>4</sup>I and Cyber*, Израиль) с мощностью передатчиков до +35 дБм (~ 3 Вт), чувствительностью приемников до -104 дБм, работающие в диапазонах частот *NATO Band III+* (1,35 – 2,7 ГГц) и *NATO Band IV* (4,4 – 5,0 ГГц).

Радиосистема GRX-8000 работает в двух режимах – с фиксированной частотой (*FF*) и перестройкой частоты (*FH*), использует встроенные средства защиты от помех (*ECCM*), и, по утверждению производителя, благодаря усовершенствованным средствам радиоэлектронной борьбы обеспечивает безопасную тактическую связь без помех по протоколам *PtP*, *PtMP* и *IP*.

Представленная в работе математическая модель затухания радиосигналов на радиотрассах АС – БС и АС – КРЭР не является единственным источником для разработки технических требований к перспективным АС и БС, а также наставлений или иных нормативных документов по радиомаскировке источников излучения вблизи ЛБС, но может служить инструментом для их обоснования.

### Литература

1. Турилов В. А. Методика оценки степени затухания радиосигналов на радиотрассах между радиоэлектронными средствами связи и управления и комплексами радиотехнической разведки // Труды XXIII Российской межведомственной НТК «Новые информационные технологии в системах связи и управления» (05 сентября 2024 г.). – Калуга: Ноосфера, 2024. – 466 с. – С. 233-248.
2. Турилов В. А. Пути обеспечения радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 2-16. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-2-16.
3. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2012. – 359 с.
4. Михайлов Р. Л. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд. – СПб.: Наукомкие технологии, 2018. – 131 с.
5. Portable Direction Finder R&S®DDF007. Product Brochure. – Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2016. – 16 р.
6. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Наукомкие технологии, 2020. – 337 с.
7. Акимов А. В., Масалимов А. В., Удалова А. П. Обзор систем связи тактического звена управления вооруженных сил США // Военная мысль. 2023. № 8. С. 146-157.

### References

1. Turilov V. A. Methodology for assessing the radio signals attenuation degree on radio routes between radio electronic communications and control systems and electronic intelligence complexes. Proceedings of the XXIII Russian Interdepartmental Scientific and Technical Conference “New information technologies in communication and management systems” (05.09.2024. Kaluga). Kaluga. publishing house “Noosphere”, 2024, 466 p. Pp. 233-248 (in Russian).
2. Turilov V. A. Ways to ensure the electronic masking of electronic means in the tactical link. Means of communication equipment. 2024. № 3 (167). pp. 2-17 (in Russian).
3. Kupriyanov A. I. Electronic warfare. Moscow. University book publ., 2012. 359 p. (in Russian).
4. Mikhaylov R. L. Electronic warfare in the US Army: a military theoretical work. St. Petersburg. Science-intensive technologies, 2018. 131 p. (in Russian).
5. Portable Direction Finder R&S®DDF007. Product Brochure. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2016. 16 p.
6. Makarenko S. I. Communication system models in deliberate destabilizing influences and intelligence conditions. Monograph. St. Petersburg. Science intensive technologies. 2020. 337 p. (in Russian).
7. Akimov A. V., Masalimov A. V., Udalova A. P. The communications systems of the US Armed Forces tactical management level overview. Military thought. 2023, № 8. Pp. 146-157 (in Russian).

Статья поступила 15 сентября 2025 г.

### Информация об авторе

Турилов Валерий Александрович – кандидат технических наук, доцент. Главный научный сотрудник, АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств (АО «КНИИТМУ»). Область научных интересов: теория и практические методы создания аппаратуры, комплексов и систем связи и обработки информации. Тел.: +7-910-911-59-41. E-mail: turilov\_va@kniitmu.ru.

Адрес: Россия, 248000, г. Калуга, ул. К. Маркса, д. 4.

## Determination of terrain parameters and tactical radio communication means characteristics, allowing to organize a hidden communication network near the combat contact line

V. A. Turilov

**Annotation.** The article aims to confirm the possibility of radio communication equipment electronic camouflage in the tactical control link by using the terrain complex features to attenuate radio signals propagating in the enemy direction to a level that prevents the emission sources location from being detected by electronic intelligence, while ensuring stable communication with the control bodies using radio repeaters on flight lifting equipment located at a considerable distance from the line of combat contact. The purpose of this work is to create a mathematical model for assessing the radio signals attenuation depending on the changing terrain parameters and characteristics of the radiation sources and receivers, and to test the model using a parameters specific example. The modeling uses a method for assessing the radio signals attenuation on radio paths between electronic communication equipment and electronic intelligence systems, based on the ITU-R Recommendations P series provisions, which contains the basic theoretical principles for conducting calculations. The proposed solution novelty lies in the practical tool creation based on well-known theoretical principles that allows to form the requirements to placement and camouflage of the radio communication equipment with specified technical characteristics. The work results include the mathematical model creation for estimating the radio signals attenuation degree depending on the terrain parameters and radiation sources and receivers characteristics. The article presents the mathematical modeling results for specific example of the natural and erected obstacles values parameters, the radio communications equipment characteristics with directional and omnidirectional antennas, radio repeaters on flight lifting equipment, as well as aerial, ground-based and portable (wearable) enemy electronic intelligence systems. The mathematical modeling results confirm the possibility of creating covert radio communication networks for controlling troops and weapons near the troops combat contact line using radio communications equipment and radio repeaters on flight lifting equipment with directional antennas and specified technical characteristics in combination with special camouflage methods of the radio transmitting devices using natural and erected obstacles. The work practical significance lies in the possibility of the created mathematical model using for the technical requirements design to advanced tactical radio communication systems, as well as develop manuals or other regulatory documents on the radio communication equipment camouflage near the troops combat contact line.

**Keywords:** subscriber station, base station, radio signal attenuation, electronic intelligence complex, radio route, land relief, radio communication secrecy.

### Information about the author

Valery Aleksandrovich Turilov – PhD, Docent. Chief researcher, JSC “Kaluga research institute of telemechanical devices” (JSC “KNIITMU”). Field of research: theory and practical methods for creating communication and information processing apparatuses, complexes and systems. Tel.: +7-910-911-59-41. E-mail: turilov\_va@kniitmu.ru

Address: Russia, 248000 Kaluga, 4, K. Marks St.

### Для цитирования:

Турилов В. А. Определение параметров рельефа местности и характеристик тактических средств радиосвязи, позволяющих организовать скрытную сеть связи вблизи линии боевого соприкосновения // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С 2-13. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-2-13.

### For citation:

Turilov V. A. Determination of terrain parameters and tactical radio communication means characteristics, allowing to organize a hidden communication network near the combat contact line. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 2-13 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-2-13.

## Оптимизация функционирования передовых пунктов технического обеспечения как фактор повышения эффективности системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления

Курочка В. С., Колодяжный П. А.

**Аннотация.** В статье выявлены основные проблемы организации восстановления техники связи и автоматизированных систем управления и методы их решения в условиях ведения современных операций. Установлено, что основными техническими характеристиками качества ремонтных органов объединений являются показатели: трудоемкость выполнения определённого вида ремонта на данном типе техники связи и автоматизированных системах управления; цикл ремонта; интенсивность ремонта; фонд рабочего времени. Они определяются аналитически и позволяют оценивать качественные характеристики ремонтных ячеек передовых пунктов технического обеспечения, определять их количество и состав, перечень ремонтных работ и т.д. Цель работы заключается в уточнении и обосновании комплексного подхода к совершенствованию подсистемы восстановления объединений путем оптимизации функционирования передовых пунктов технического обеспечения на основе методов математического моделирования. Новизна работы – заключается в возможности использования уточненного математического аппарата отдельно или в составе автоматизированной системы управления техническим обеспечением связи и автоматизированных систем управ器ия в качестве инструмента поддержки принятия решения при организации восстановления техники связи и автоматизированных систем управления в операции и сформировать рациональный вариант состава сил и средств ремонтных органов объединения. Получены следующие результаты: приведено рациональное обоснование использования методов математического моделирования, с целью определения рационального состава сил и средств передовых пунктов технического обеспечения объединения, в зависимости от складывающейся оперативной обстановки. Представлена схема планирования ремонтов на передовых пунктах технического обеспечения. Предложен способ повышения эффективности функционирования складов средств связи из состава передовых пунктов технического обеспечения за счет использования технологии QR-кодов. Практическая значимость заключается в возможности использования уточненного математического аппарата в работе должностных по техническому обеспечению связи и автоматизированных систем управления в ходе организации функционирования подсистемы восстановления техники связи и автоматизированных систем управления в современных операциях.

**Ключевые слова:** восстановление техники связи, интенсивность ремонта, неисправность, передовой пункт технического обеспечения, техническое обеспечение связи и автоматизированных систем управления, трудоемкость, цикл ремонта, склады средств связи.

### Введение

В условиях современных операций, элементы системы связи, используемые для развертывания системы управления объединения, подвергаются интенсивной эксплуатации, огневому воздействию противника и другим деструктивным факторам, что негативно влияет на обеспеченность войск исправной, боеготовой техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ).

Для поддержания максимально возможной заданной обеспеченности войск работоспособными, готовыми к применению по назначению ТС и АСУ, развернута эшелонированная система технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (ТОС и АСУ) объединения. Важным элементом этой системы является подсистема восстановления, основным компонентом которой выступают передовые пункты технического обеспечения (ППТО). Оптимизация функционирования ППТО позволит значительно повысить эффективность системы ТОС и АСУ объединения.

Восполнение боевых потерь в ТС и АСУ возможно двумя путями:

- за счет подсистемы снабжения, поставкой новых образцов взамен вышедших из строя;

- за счет подсистемы восстановления, проведением комплекса мероприятий (работ), направленных на приведение вышедших из строя образцов ТС и АСУ в готовность к использованию (боевому применению) и возвращение их в строй.

При этом второй путь является более предпочтительным так как, при проведении ремонта, замене подлежат только отказавшие части (блоки, узлы, агрегаты), стоимость которых значительно ниже стоимости всего образца [1]. Основные мероприятия восстановления выполняет развернутая сеть ППТО. Задачами ППТО являются:

- обеспечение войск исправной техникой и имуществом связи;
- ремонт ТС и АСУ сложного текущего и среднего видов ремонта;
- обеспечение деятельности выездных ремонтных бригад (ВРБ) предприятий промышленности (ПП);
- накопление и содержание запасов ТС и АСУ и военно-технического имущества (ВТИ);
- взаимодействие с ПП по вопросам ремонта в рамках государственных контрактов, в том числе капитального, и исполнения гарантитных обязательств.

Оперативное развертывание ППТО в условиях проведения операций, предусматривает создание единого комплекса, интегрирующего ремонтные посты, складские мощности для ТС и АСУ, запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП), ВТИ, а также выездные ремонтные отделения и подразделения охраны.

### **Методы определения рационального количества и состава ремонтных ячеек на ППТО при восстановлении ТС и АСУ**

В современных операциях одной из главных причин снижения доступности работоспособной ТС и АСУ является деструктивное воздействие противника. При этом существуют и другие факторы, приводящие к выходу ТС и АСУ из строя (табл. 1). По этой причине основные усилия органов управления системой ТОС и АСУ должны быть направлены на поиск и использование всех доступных способов скорейшего дообеспечения войск работоспособной, готовой к применению ТС и АСУ. Одним из способов достижения этой цели является оптимизация функционирования ППТО.

Таблица 1 – Перечень основных факторов, приводящих к выходу из строя ТС и АСУ

Виды отказов	Причины отказов
Одиночные	Износ, старение аппаратуры, недостатки конструкции и технологии, ударные нагрузки, перегрузки, ошибочные действия личного состава
Групповые	Преднамеренные воздействия (массированное применение ядерного, высокоточного или обычного оружия; электромагнитное воздействие). Природные явления (грозы, оползни, разливы рек, землетрясения, ураганы, обледенения и т. п.)

В зависимости от возложенных задач и удаленности от линии боевого соприкосновения войск, ППТО могут иметь различный состав сил и средств. Основными элементами могут быть склад средств связи и посты по ремонту: телефонных аппаратов, радиостанций тактического звена управления, *IT*-оборудования, средств проводной связи, аккумуляторных батарей и зарядных устройств, станций спутниковой связи и др. (далее в тексте статьи, для краткости посты ремонта будут именоваться – ремонтными ячейками). Каждая такая ремонтная ячейка укомплектовывается определенным количеством специалистов-ремонтников. Оптимизация количества и состава ремонтных ячеек критически важна, поскольку позволяет рационально распределить ремонтные мощности, сократить сроки восстановления ТС и АСУ, снизить эксплуатационные затраты на содержание ремонтной инфраструктуры и транспортировку агрегатов, вследствие чего – поддерживать требуемый уровень обеспеченности работоспособными, готовыми к применению по назначению ТС и АСУ.

В соответствии с ГОСТ 18322-2016 [2], система технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) представляет собой организованную совокупность взаимосвязанных элементов: исполнителей, технических средств и документации. Ее предназначение – планомерное поддержание и восстановление качества эксплуатируемых изделий. На рис. 1 отображена структурная схема данной системы, иллюстрирующая взаимосвязи между ее компонентами [4].

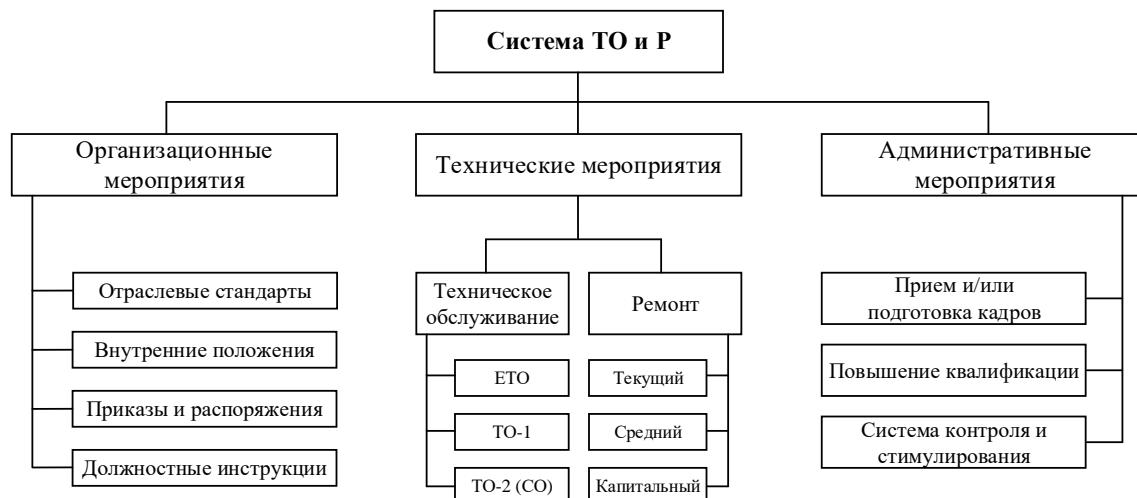


Рис. 1. Структурная схема системы технического обслуживания и ремонта

Для наглядного представления технических мероприятий по восстановлению ТС и АСУ разработана систематизированная классификация видов ремонта табл. 2. Критериями для дифференциации послужили: сложность работ, требуемые ресурсы, место выполнения и глубина восстановления технических характеристик. Выбор конкретного вида ремонтных мероприятий – текущего, среднего или капитального – осуществляется на основе комплексной диагностики технического состояния оборудования с учетом степени повреждения, характера неисправностей и расчетной трудоемкости восстановительных работ. Также на рис. 2 приведены виды технического обслуживания: ежедневное (ETO), ежемесячное (TO-1), годовое (TO-2) и сервисное (CO).

Таблица 2 – Сравнительная характеристика видов ремонта ТС и АСУ

Критерий	Текущий ремонт	Средний ремонт	Капитальный ремонт
Цель работ	Локализация отказов и оперативное восстановление базовой работоспособности	Восстановление эксплуатационных характеристик и тактико-технических показателей	Полное восстановление ресурса и заводских характеристик оборудования
Объём работ	Замена неисправных модулей и блоков из комплектов ЗИП	Демонтаж, дефектация и замена узловых компонентов	Полная разборка, дефектация всех элементов, комплексное восстановление
Место выполнения	Расчёты (экипажи), ППТО, с привлечением ВРБ ПП	ППТО, стационарные мастерские, полевые условия с ВРБ ПП	Специализированные ремонтные предприятия и заводы-изготовители
Технологические особенности	Регулировка и настройка после замены компонентов	Диагностика всех систем, испытания под эксплуатационной нагрузкой	Комплексные проверки, продолжительные испытания на надёжность
Специальные методы	-	-	Перекомплектация из нескольких неисправных образцов
Включаемые работы	-	Все операции текущего ремонта	Все операции среднего ремонта

Стоит отметить, что капитальный ремонт включает в себя весь комплекс работ, предусмотренный для среднего ремонта, и выполняется преимущественно на заводах-изготовителях. В исключительных случаях, при подтвержденной технической разведкой нецелесообразности восстановления отдельных образцов, капитальный ремонт организуется в полевых условиях методом перекомплектации – сборки работоспособных образцов техники из исправных компонентов нескольких поврежденных единиц [3, 4]. В качестве методики планирования ремонтных работ образцов ТС и АСУ, рассмотрим алгоритм которой отражен на структурной схеме, приведенной на рис. 2 [4].

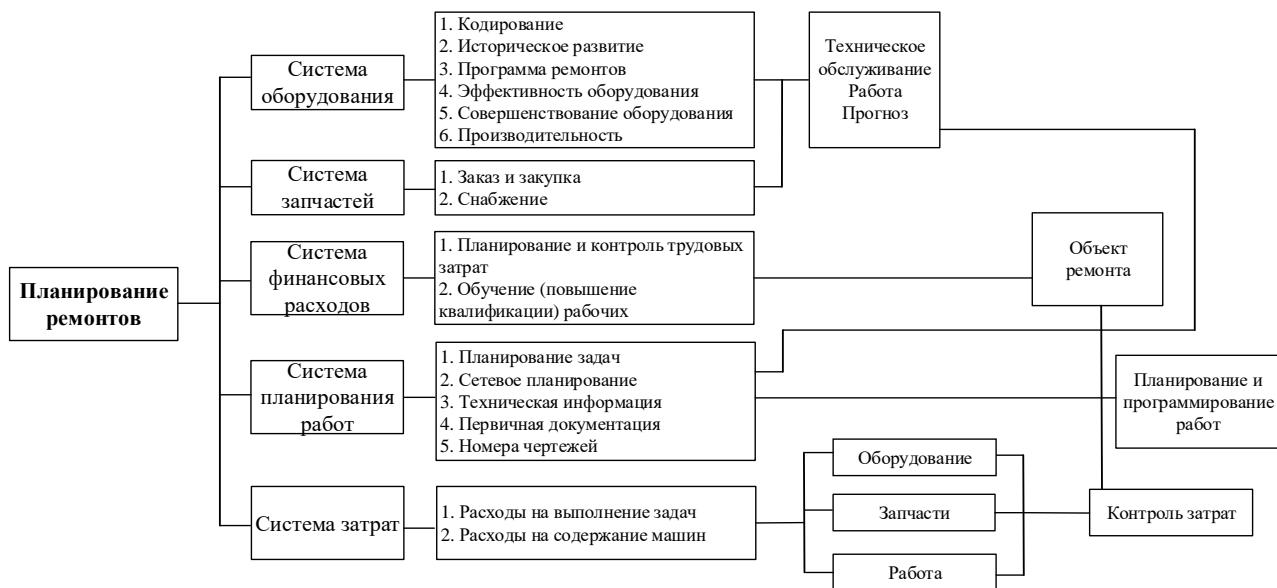


Рис. 2. Вариант структурной схемы планирования ремонтов

Для выполнения капитального ремонта по методу перекомплектации задействуются выездные ремонтные отделения и выездные ремонтные бригады предприятий промышленности. В ситуациях с нехваткой ресурсов данный подход, наравне с агрегатно-участковым восстановлением, распространяется также на проведение среднего ремонта. Дефектное оборудование отправляется на восстановление либо на ППТО, либо на заводские ремонтные базы. После ремонта компоненты поступают для пополнения запасов ЗИП промышленных предприятий, данный подход обеспечивает [4]:

- максимальное сокращение сроков ремонта и простоя ТС и АСУ в неисправном состоянии;
- уменьшение трудозатрат и времени на возвращение ТС и АСУ в строй за счет того, что снятые неисправные агрегаты и механизмы ремонтируются, как правило, на специализированных стационарных и подвижных ремонтных базах заводов изготовителей;
- снижение требований к квалификации ремонтников, непосредственно восстанавливющих работоспособность ТС и АСУ.

Схема технологического процесса ремонта ремонтными ячейками на ППТО представлена на рис. 3.

Эффективность работы ремонтных ячеек определяется их способностью осуществлять качественное и своевременное восстановление вышедшей из строя ТС и АСУ в сроки, обеспечивающие сохранение боеспособности войск. Ключевыми техническими характеристиками, определяющими качество функционирования ремонтных подразделений, являются следующие показатели [4]:

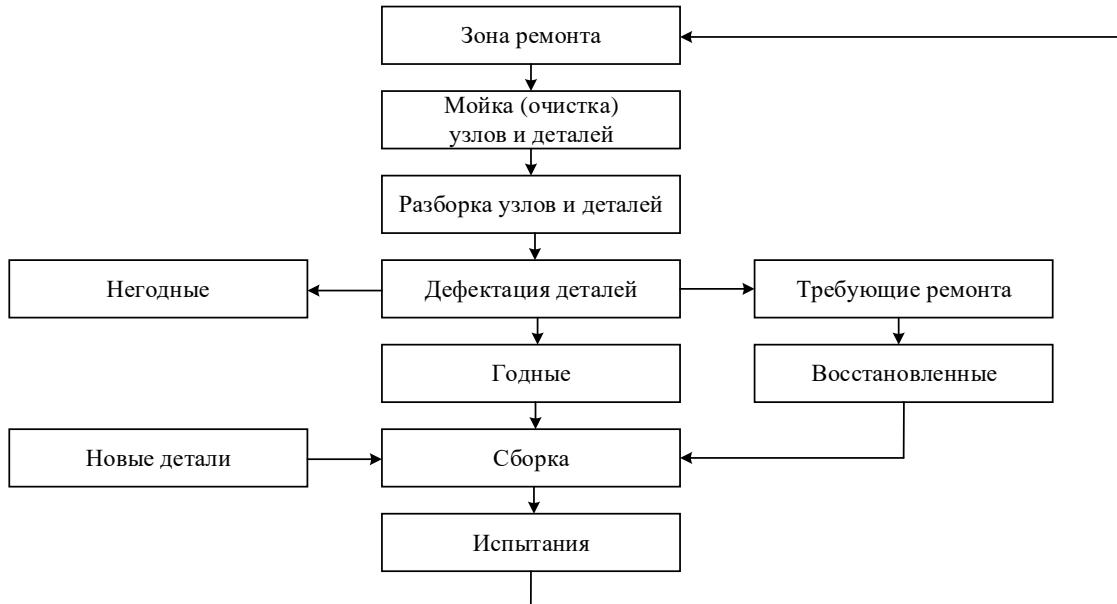


Рис. 3. Схема технологического процесса ремонта ремонтными ячейками ППТО

1) Расчет трудоемкости ремонта  $T$  для заданного типа ТС и АСУ основан на агрегировании времени, необходимого для выполнения всей совокупности технологических операций. Показатель выражается в человеко-часах на единицу ремонтируемой техники и определяется по формуле:

$$T_{tp} = \sum_{i=1}^l \cdot \sum_{j=1}^{z_{pm}} \cdot \sum_{\xi=1}^{z_{po}} t_{poi j \xi},$$

где:  $t_{po}$  – норма времени на одну ремонтную операцию;  $\xi = 1, 2, 3, \dots, z_{po}$  – индекс, имеющий значения от 1 до  $z_{po}$ , где  $z_{po}$  – общее число операций на рабочем месте;  $j = 1, 2, 3, \dots, z_{pm}$  – число рабочих мест на каждом участке технологической линии ремонта;  $i = 1, 2, 3, \dots, l$  – число ремонтных участков на технологической линии ремонта или в ремонтном органе [4].

2) Показатель длительности ремонтного цикла  $T_{cp}$  характеризует минимально необходимое время для восстановления единицы техники. Он складывается из операционных затрат времени на всех этапах ремонта, организованных по принципу кратчайшего технологического пути, и определяется по формуле (в часах на единицу) [4]:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^{l_{kp}} \cdot \sum_{j=1}^{z_{pm}^{kp}} t_{cp i j},$$

где:  $i, j = 1, 2, 3, \dots, l_{kp}$ ;  $z_{pm}^{kp}$  – показатель, определяющий количество этапов в ремонтном процессе, которое ТС и АСУ проходит по самому короткому технологическому маршруту – от начала ремонта до его окончания;  $t_{cp i j}$  – представляет собой продолжительность ремонтного цикла для конкретной позиции в технологической цепи:  $i$  – номер участка,  $j$  – номер рабочего места на этом участке [4].

Количество параллельно работающих участков  $z_{pr}$  определяется как разность между общим количеством рабочих мест (ремонтных участков) в органе  $z_{pm}$  и их минимально необходимым числом для обеспечения кратчайшего технологического маршрута:

$$z_{pr} = z_{pm} - z_{pm}^{kp}.$$

Таким образом, показатель  $z_{pr}$  напрямую влияет на длительность ремонтного цикла  $T_{cp}$ : чем больше параллельно функционирующих мест, тем короче цикл и выше производительность ремонтного подразделения. Сам ремонтный цикл  $T_{cp}$  представляет собой

среднее время восстановления единицы техники в данном органе и может рассматриваться как математическое ожидание длительности цикла.

Анализ выявленной зависимости позволяет утверждать, что производительность ремонтного органа имеет прямую корреляцию с числом параллельно функционирующих участков  $Z_{\text{пп}}$ . Основным следствием увеличения данного параметра является снижение общей длительности ремонтного цикла  $T_{\text{пп}}$ , что непосредственно ведет к росту операционной эффективности подразделения. Показатель  $T_{\text{пп}}$ , будучи средним временем восстановления единицы техники, применяется в качестве математического ожидания длительности цикла и служит ключевой метрикой для планирования и оценки работы ремонтной службы.

3) Интенсивность ремонта  $\mu$  – это параметр, количественно характеризующий скорость выполнения восстановительных работ в ремонтной ячейке, на участке или рабочем месте. Она определяется как величина, обратная средней продолжительности ремонтного цикла:

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{пп}}}.$$

Таким образом, параметр  $\mu$  описывает поток восстановления техники в рамках рассматриваемого ремонтного органа [4].

4) Под фондом рабочего времени  $\Phi_{\text{pb}}$  понимаем совокупный ресурс времени (в человеко-часах), доступный ремонтному подразделению при заданной организации труда и штатной численности личного состава. Данный фонд рассчитывается по формуле для различных плановых интервалов: смены, суток, недели, месяца или года [4]:

$$\Phi_{\text{pb}} = \left( t_{\text{пд}} \cdot K_{\text{пс}} \cdot \Delta \cdot N_{\text{рем}} \frac{100 + \Pi_{\text{пп}}}{100} - T_{\text{обс}} \right) \cdot \frac{100 + \Pi_{\text{пв}}}{100},$$

где:  $t_{\text{пд}}$  – длительность рабочей смены в часах;  $K_{\text{пс}}$  – количество рабочих смен в течение суток;  $\Delta$  – количество рабочих дней в расчетном периоде;  $N_{\text{рем}}$  – численность мастеров и рабочих в одной смене;  $\Pi_{\text{пп}}$  – средний уровень потерь рабочего времени (%);  $T_{\text{обс}}$  – время на обслуживание оборудования ремонтной ячейки и его профилактические ремонты;  $\Pi_{\text{пв}}$  – ожидаемый процент перевыполнения норм выработки специалистами-ремонтниками [4].

Величина фонда рабочего времени характеризует потенциальные возможности ремонтной ячейки по выполнению работ.

Представленная система показателей служит основой для оценки качественных параметров ремонтных ячеек и последующей оптимизации их количества и внутренней структуры. Определение трудоемкости ремонтных операций является первоочередной задачей и требует наличия детализированных перечней работ для ремонтов различной сложности: текущего, среднего и капитального. Формирование этих перечней должно базироваться на анализе прогнозируемых видов повреждений и отказов ТС и АСУ, а также учитывать фактическую обеспеченность ремонтной базы. Ключевыми факторами здесь выступают наличие специализированного оборудования, контрольно-измерительных приборов и аппаратуры (КИА), технологической оснастки, инструмента, приспособлений и запасов запчастей ЗИП [4].

Непосредственное нормирование трудоемкости осуществляется эмпирическим путем – методом хронометражных замеров времени, затрачиваемого на каждую операцию в реальных условиях ремонта. Полученные таким образом временные нормы на отдельные работы (ремонтные операции) одновременно устанавливают и нормы выработки для личного состава.

На заключительном этапе проводится статистическая обработка данных хронометража, в результате которой определяются расчетные (нормативные) трудозатраты на каждый вид работ. Это позволяет агрегировать и получить суммарные нормы времени на проведение всего объема работ в рамках текущего, среднего и капитального ремонта для конкретного типа ТС и АСУ.

Исходными данными для планирования ресурсов (рабочих мест, участков и личного состава) служат перечни ремонтных работ и установленные средние нормы трудозатрат.

На основе этой информации формируются локальные таблицы, регламентирующие затраты на все виды ремонтов (текущий, средний, капитальный) для каждого образца техники. Критическим ограничением при этом выступают предельные сроки ремонта. Таким образом, оптимизация времени восстановления ТС и АСУ заключается в таком рациональном планировании технологических операций, которое одновременно удовлетворяет этим нормативным требованиям, которое должно обеспечивать [5]:

- сбалансированное распределение трудозатрат между рабочими местами и ремонтными участками;
- параллельное выполнение работ в пределах одного участка и между различными участками.

Следует отметить, что показатель трудоемкости отражает лишь объем трудозатрат в человеко-часах, но не определяет фактическую продолжительность восстановительного процесса. Временные параметры выполнения ремонтных работ непосредственно характеризуются продолжительностью циклов соответствующих видов ремонта: текущего, среднего и капитального.

Продолжительность цикла восстановления ТС и АСУ формируется под влиянием двух ключевых факторов: оптимальной последовательности операций и совокупной трудоемкости работ. Эти параметры рассчитываются для каждого рабочего места, ремонтного участка и ППТО в целом на основе анализа кратчайшего технологического маршрута при стандартных условиях выполнения операций одним специалистом на единице оборудования. Следовательно, цикл ремонта на  $j$ -м месте  $t_{\text{цп}j}$  равен [4]:

$$t_{\text{цп}j} = \sum_{\xi=1}^{z_{\text{по}}^{\text{кп}}} t_{\text{по}\xi},$$

Параметр  $z_{\text{по}}^{\text{кп}}$  – число операций, входящих в минимальный по продолжительности технологический маршрут на рабочем месте, а  $t_{\text{по}\xi}$  – время выполнения  $\xi$ -й операции из этого маршрута.

Оптимальная технология ремонта требует согласования: номенклатура работ  $z_{\text{по}}^{\text{кп}}$ , выполняемых одним человеком, должна быть идентична набору операций кратчайшего пути  $z_{\text{по}}^{\text{кп}}$ . Если на рабочем месте с индексом  $j$ -м задействовано  $N_{\text{рем}j}$  ремонтников, то цикл ремонта для этого места вычисляется по формуле

$$t_{\text{цп}j} = \frac{t_{\text{тр}j}}{N_{\text{рем}j}},$$

где  $t_{\text{тр}j}$  – трудоёмкость ремонта на  $j$ -м рабочем месте.

Следовательно, длительность цикла проведения текущего, среднего или капитального ремонта для указанного типа техники вычисляется по формуле [4]:

$$T_{\text{цп}}^{\text{тк}} = \sum_{i=1}^l t_{\text{цп}i} = \sum_{i=1}^l \cdot \sum_{j=1}^{z_{\text{рм}}} \frac{t_{\text{тр}j}}{N_{\text{рем}j}},$$

где  $z_{\text{рм}}$  – количество рабочих мест, задействованных на  $j$ -м ремонтном участке;  $l$  – общее число технологических участков, специализирующихся на ремонте данного типа ТС и АСУ в рамках рассматриваемого подразделения (бригады, цеха, органа)

Индексы «т», «с», «к» рассчитывается: соответственно, для текущего ( $T_{\text{цп}}^{\text{т}}$ ), среднего ( $T_{\text{цп}}^{\text{с}}$ ) и капитального ( $T_{\text{цп}}^{\text{к}}$ ) ремонтов [4].

Продолжительность ремонтного цикла ТС и АСУ является ключевым показателем, определяющим период неработоспособности техники. Величина  $T_{\text{рц}}$  служит интегральной технической характеристикой, отражающей эффективность как отдельной ремонтной ячейки, так и всей системы восстановления ППТО в целом.

Нормативы продолжительности циклов для всех видов ремонтов (текущего, среднего и капитального) устанавливаются на основе:

- экспериментальных данных, полученных методом хронометража технологических операций;
- статистического анализа производственных показателей действующих ремонтных мастерских ППТО объединения.

Данный подход обеспечивает формирование объективных временных нормативов, соответствующих реальным производственным возможностям ремонтных подразделений. Расчет требуемой численности ремонтного персонала для  $i$ -й ремонтной ячейки осуществляется на основе интегрального учета двух ключевых параметров: нормативной трудоемкости и плановой продолжительности ремонтного цикла, что выражается следующей зависимостью:

$$N_{\text{рем}i} = \sum_{j=1}^{z_{\text{рм}}} N_{\text{рем}j} = \sum_{j=1}^{z_{\text{рм}}i} \frac{t_{\text{рп}j}}{t_{\text{цп}j}},$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots, z_{\text{рм}}$  – число рабочих мест в ремонтной ячейке;  $N_{\text{рем}j}$  – число рабочих на  $j$ -м рабочем месте.

Общее число ремонтников на ППТО определяется по формуле:

$$N_{\text{ремППТО}} = \sum_{i=1}^l N_{\text{рем}i},$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, l$  – число ремонтных ячеек [4].

На основании сформированных номенклатур работ для текущего, среднего и капитального ремонтов определяются ключевые параметры процесса восстановления технических средств, представленные в табл. 3.

Таблица 3 – Ключевые параметры процесса восстановления техники, определяемые на основе сформированных перечней работ

№ пп	Ключевой параметр	Содержательное описание параметра
1	Трудоёмкость восстановления	Суммарная временная оценка, необходимая для выполнения полного комплекса восстановительных операций
2	Материально-техническая база	Номенклатурный перечень требуемого оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры, технологической оснастки, инструмента и запасных частей
3	Технология восстановления	Обоснованная последовательность и методы выполнения ремонтных операций.
5	Длительность ремонтного цикла	Нормативная продолжительность полного цикла восстановления единицы техники
6	Нормирование труда	Установленные нормы выработки для различных категорий ремонтного персонала
7	Производственная интенсивность	Показатель, характеризующий мощность восстановительного потока по видам ремонтов
8	Кадровый потенциал	Перечень требуемых специальностей, уровень их квалификации и расчетная производительность труда
5	Длительность ремонтного цикла	Нормативная продолжительность полного цикла восстановления единицы техники

Таким образом, качество и полнота разработки ремонтных перечней определяют эффективность всей системы восстановления техники связи и АСУ. Данные перечни служат базисом для организации ремонтного производства, расчета производственных мощностей и оптимизации работы ремонтных ячеек передовых пунктов технического обеспечения.

## Предложения по совершенствованию функционирования склада средств связи в составе ППТО

В современных условиях проведения войсковых операций, характеризующихся их высокой динамичностью, на первый план выходит требование к минимизации сроков доведения материальных средств до войск. Одним из основных способов выполнения этого требования является технологическая модернизация процессов планирования и обеспечения, обусловленная общим трендом на технологизацию военной сферы.

Анализ опыта специальной военной операции (СВО) демонстрирует значительное расширение номенклатуры применяемых ТС и АСУ. В настоящее время парк техники воинских формирований включает не только штатные образцы военного назначения, но и средства связи двойного применения. Указанная тенденция, усугубляемая возрастающей интенсивностью информационного обмена в системах управления, приводит к постоянному росту номенклатурного перечня средств связи.

Достаточно сложным является процесс объективного непрерывного учета наличия и состояния ТС и АСУ, находящейся в войсках и на складах всех уровней, в режиме реального времени.

Организация обеспечения войск ТС и АСУ характеризуется высокой вероятностью ошибок, обусловленных человеческим фактором. Практика современных боевых действий подтверждает, что оперативность и обоснованность управленческих решений должностных лиц ТОС и АСУ, наряду с эффективной работой системы учета, являются критически важными факторами для:

- бесперебойного снабжения соединений техническими средствами;
- устойчивого функционирования систем связи войсковых формирований.

Сложившаяся ситуация требует разработки комплексных мер по совершенствованию системы ТОС и АСУ включая:

- внедрение автоматизированных систем поддержки принятия решений;
- создание защищенных от человеческих ошибок учетных механизмов;
- разработку стандартизованных процедур управления снабжением.

Данные меры позволят минимизировать риски сбоев в системе обеспечения и повысить устойчивость управления войсками в современных операциях

В настоящее время существует огромное количество современных технологий, которые помогут оптимизировать организацию учета и снабжения ТС и АСУ. В рамках использования новых подходов к обработке информации и снижению рисков, связанных с ошибками личного состава внедрение *QR*-кодов позволит повысить эффективность процессов учёта и снабжения за счёт автоматизации идентификации и отслеживания ТС и АСУ [6].

*QR*-код (от англ. *Quick Response code* – «быстрый отклик») – представляет с собой матричный двумерный штрих-код, состоящий из чёрных модулей, расположенных в квадратной сетке на белом фоне. Он предназначен для быстрого считывания и декодирования информации с помощью фотокамер или специализированных сканеров.

В данном случае, применение *QR*-кодов откроет возможности для:

- идентификации ТС и АСУ путём маркировки уникальными кодами, содержащими полные данные о характеристиках, истории эксплуатации и ссылками на документацию;
- автоматизации учёта за счёт мгновенного считывания кодов мобильными устройствами для получения актуальной информации о ТС и АСУ (принадлежность к воинской части и материально ответственному лицу, количество и состояние экземпляров);

- мониторинга технического состояния ТС и АСУ и прослеживаемости цепочки поставок через интеграцию с блокчейн-технологиями, где каждый QR-код служит криптографическим хэшем для фиксации этапов жизненного цикла ТС и АСУ [6].

В общем случае, создание единого реестра графических кодов обеспечивает сквозную прослеживаемость всех ТС и АСУ от производства до боевого применения, исключая ошибки учёта и несанкционированные изменения данных.

### **Заключение**

Проведенное исследование позволило разработать подходы к повышению эффективности функционирования ППТО – важнейшего элемента системы ТОС и АСУ в условиях современных операций. Внедрение научно обоснованной методики расчета количественного и качественного состава ремонтных ячеек позволит существенно повысить возможности ППТО в области восстановления ТС и АСУ, вышедших из строя вследствие боевых повреждений и технических отказов.

Внедрение QR-кодов и единой системы базы данных складов средств связи в рамках системы ТОС и АСУ позволит совершенствовать процессы обеспечения войск. Мгновенное сканирование QR-кодов обеспечит достоверный мониторинг наличия и перемещения ТС и АСУ во всех звеньях управления в реальном масштабе времени, что позволит сократить временные затраты, минимизировать ошибки ручного ввода данных и уменьшить потребность в привлечении личного состава для выполнения логистических операций.

Таким образом, предложенные подходы имеют потенциал для значительного повышения эффективности ТОС и АСУ в условиях современных операций.

### **Литература**

1. Дросс В. А., Фатянова Е. В., Губская О. А., Писковитин В. Е. Головин А. Г. Определение рационального количества личного состава для обслуживания и ремонта техники связи и АСУ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 108-111. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-108-111.
2. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
3. Агеев Е. В., Грашков С. А. Техническое обслуживание и ремонт машин в АПК: учебное пособие. Курск: Курская ГСХА, 2019. 185 с.
4. Родионов Ю. В., Ломовских А. Е., Свиридов А. А., Январёв В. С., Север А. В., Рыбин Г. В. Методы определения количества и состава ремонтных бригад при восстановлении техники // Наука в Центральной России. 2023. Т. 66. № 6. С. 123-134.
5. Кравченко И. Н., Корнеев В. М., Захарова М. С., Ахметов Т. А. Методика выбора критериев оптимизации при формировании машинно-тракторных парков // Вестник Московского государственного агротехнологического университета имени В.П. Горячкина. 2016. № 4(74). С. 41-46.
6. Курочка В. С., Бурлаков А. А., Ковалев В. В., Николаев В. Б. Пути совершенствования системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления воинских формирований с использованием технологий блокчейн и QR-кодов в условиях современных операций // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2025. № 3-4 (201-202). С. 93-100.

### **References**

1. Dross V.A., Fatyanova E.V., Gubskaya O.A., Piskovitin V. E., Golovin A.G. *Opredelenie ratsional'nogo kolichestva lichnogo sostava dlya obsluzhivaniya i remonta tekhniki svyazi i ASU* [Determining the rational number of personnel for maintenance and repair of communication and automated control systems]. *Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, No. 7, pp. 108-111 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-108-111.

2. GOST 18322-2016 *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniya* [System of maintenance and repair of equipment. Terms and definitions]. Moscow. Standartinform Publ., 2017. 16 p. (in Russian).
3. Ageev E. V., Grashkov S. A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont mashin v APK: uchebnoe posobie* [Technical maintenance and repair of machines in the agro-industrial complex: textbook]. Kursk. Kursk State Agricultural Academy Publ., 2019. 185 p. (in Russian).
4. Rodionov Yu. V., Lomovskikh A. E., Sviridov A. A., Yanvarev V. S., Sever A. V., Rybin G. V. *Metody opredeleniya kolichestva i sostava remontnykh brigad pri vosstanovlenii tekhniki* [Methods for determining the number and composition of repair teams during equipment restoration]. *Science in the Central Russia*, 2023, V. 66, no. 6, pp. 123-134 (in Russian).
5. Kravchenko I. N., Korneev V. M., Zakharova M. S., Akhmetov T. A. *Metodika vybora kriteriev optimizatsii pri formirovaniии mashinno-traktornyykh parkov* [Methodology for selecting optimization criteria when forming machine and tractor fleets]. *Bulletin of the Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin*, 2016, No. 4(74). Pp. 41-46 (in Russian).
6. Kurochka V. S., Burlakov A. A., Kovalev V. V., Nikolaev V. B. *Puti sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizirovannykh sistem upravleniya voinskikh formirovaniy s ispol'zovaniem tekhnologii blockchain i QR-kodov v usloviyakh sovremennykh operatsii* [Ways to improve the technical support system for communication and automated control systems of military formations using blockchain and QR codes in modern operations]. *Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*, 2025, no. 3-4 (201-202), pp. 93-100 (in Russian).

**Статья поступила 21 сентября 2025 г.**

### **Информация об авторах**

*Курочки Владимир Сергеевич* – кандидат военных наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации. Область научных интересов: оптимизация функционирования систем связи объединений. Тел.: +7 (812) 247-95-42. SPIN-код: 2576-7619. РИНЦ Author ID: 1094039. E-mail: Uprava223@mail.ru.

*Колодяжный Петр Алексеевич* – слушатель. Слушатель кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации. Область научных интересов: оптимизация систем технического обеспечения связи и АСУ объединений. Тел.: +7 (812) 247-98-42. SPIN-код: 5310-0067. РИНЦ Author ID: 1180745. E-mail: petr2020.sev@mail.ru.

Адрес: Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

### **Optimization of the functioning of advanced technical support points as a factor increasing the efficiency of the technical support system for communication and automated control systems**

V. S. Kurochka, P. A. Kolodyazhny

***Annotation.** The article identifies the main problems in organizing the restoration of communications equipment and automated control systems and proposes methods for their solution in the context of modern military operations. To assess the quality and plan the activities of repair units within combined arms formations, key technical and economic indicators are used: labor intensity of repair types for specific equipment and automated control systems, repair cycle duration, work intensity, and working time fund. Their*

*analytical calculation serves as the basis for evaluating the productivity of repair cells at forward technical support points, determining the required number of such points, their organizational structure, and the list of repair operations performed. The aim of the work is to clarify and substantiate a comprehensive approach to improving the restoration subsystem of formations by optimizing the functioning of forward technical support points using methods of mathematical modeling. The novelty of the work lies in the possibility of using the refined mathematical apparatus either independently or as part of an automated control system for technical support of communications and automated control as a decision support tool when organizing the restoration of equipment and automated control systems during an operation and forming a rational composition of forces and means for the repair units of the formation. The following results were obtained: a rational justification for the use of mathematical modeling methods is provided to determine the rational composition of forces and means of the formation's FTSP, depending on the evolving operational situation. A repair planning scheme for forward technical support points is presented. A method is proposed to improve the efficiency of communication equipment warehouses within forward technical support points through the use of QR code technology. The practical significance lies in the possibility of using the refined mathematical apparatus by personnel responsible for technical support of communications and automated control systems in organizing the functioning of the equipment and automated control systems restoration subsystem during modern operations.*

**Keywords:** restoration of communications equipment, repair intensity, malfunction, advanced technical support for communications and automated control systems, labor intensity, repair cycle, communications equipment warehouses.

### Information about the authors

Vladimir Sergeevich Kurochka – Candidate of Military Sciences, Associate Professor. Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education "Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny" of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Associate Professor at the Department of Technical Support of Communications and Automation. Research interests: optimization of communication systems operation for military formations. Tel.: +7 (812) 247-95-42. SPIN-code: 8342-9156. RSCI Author ID: 707198. E-mail: Uprava223@mail.ru.

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3.

Petr Alekseevich Kolodyazhny – Student (Master's program). Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education "Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny" of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Student of the Department of Technical Support of Communications and Automation. Research interests: optimization of technical support systems for communications and automated control systems (ACS) of military formations. Tel.: +7 (812) 247-98-42. SPIN-code: 5310-0067. RSCI Author ID: 1180745. E-mail: petr2020.sev@mail.ru.

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tikhoretsky pr., 3.

#### Для цитирования:

Курочка В. С., Колодяжный П. А. Оптимизация функционирования передовых пунктов технического обеспечения как фактор повышения эффективности системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 14-25. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-14-25.

#### For citation:

Kurochka V. S., Kolodyazhny P. A. Optimization of the functioning of advanced technical support points as a factor in increasing the efficiency of the technical support system for communications and automated control systems. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 14-25 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-14-25.

## Приближенный метод расчета электромагнитных полей СДВ диапазона

Акулов И. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н.

**Аннотация.** В работе проведен сравнительный численный анализ современных строгих методов прогнозирования параметров электромагнитного поля, влияющих на распространение радиоволн в сверхдлинноволновом диапазоне и предложенного авторами приближенного метода их расчета на основе геофизических факторов на освещенных радиотрассах. Цель работы: приближенное описание параметров электромагнитного поля более простыми зависимостями, чем многопараметрические строгие решения с представлением расчетных примеров для конкретных радиотрасс. Методы расчета на каждой трассе выполнены строгими методами для четырех сезонов: зима, весна, лето, осень и средней солнечной активности, имевшей место в 2021 году с заданным значением излученной мощности источника в 1 кВт. Новизна работы заключается в нахождении более простых расчетных выражений и методики по сравнению со строгими классическими методами и формулой Остина. Результаты работы заключаются в том, что приведена приближенная формула расчета электрического поля для полностью освещенных радиотрасс сверхдлинноволнового диапазона, практическая значимость которой заключается в том, что она имеет погрешность не более 4 дБ по отношению к результатам строгого решения. И хотя данная формула не обладает возможностями на сегодня точностями прогнозирования полей, но может быть рекомендована для предварительных оценок ожидаемых характеристик радиотехнических систем. А иногда, при анализе качественных зависимостей, эта аппроксимация является предпочтительной, поскольку содержит результаты усреднения на многих радиотрассах, а благоприятные для работы радиотехнических систем на освещенных трассах частоты находятся в сравнительно небольшой окрестности частоты 20 кГц.

**Ключевые слова:** диапазон сверхдлинных волн, метод квадратичной регрессии, напряженность поля, распространение радиоволн, суточный ход амплитуды электрического поля, формула Остина.

### Введение

В работе авторов [1] был выполнен численный анализ геофизических факторов, влияющих на распространение радиоволн сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона частот. Анализ был проведен на основании современных методов прогнозирования параметров электромагнитного поля, которые в дальнейшем будем называть строгими методами [2]. Было показано, что распространение радиоволн СДВ диапазона на освещенных трассах отличается некоторой стабильностью относительно изменений параметров среды. Это дает надежду приближенно описать поле на таких трассах более простыми зависимостями, чем многопараметрические строгие решения. Проанализируем указанную ситуацию более детально. Для этого рассмотрим преимущественно морские трассы для трех источников поля, расположенных на территории России: высокоширотный и среднеширотные источники в западной части страны и в восточной (см. табл. 1). Длина трассы выбрана равной 8 Мм.

Таблица 1 – Исходные данные для анализируемых СДВ трасс

Обозначение трассы	Координаты источника (ш, д) – град, (“-“ – ю.ш., з.д.)	Азимут трассы, град	Конечная точка трассы, (ш, д) – град, (“-“ – ю.ш., з.д.)	Время освещенности трассы, ч (мск)
1_4	(64, 40)	270	(16, -42)	15
2_4	(45, 39)	270	(13, -38)	15
3_2	(48, 135)	90	(13, -147)	4
3_3	(48, 135)	180	(-24, 135)	7

### Результаты моделирующего эксперимента

Суточный ход амплитуды поля на частоте 20 кГц в конечных точках трасс приведен на рис. 1. Данная частота здесь выбрана в связи с тем, что ее окрестность, как будет показано ниже, является наиболее благоприятной для работы радиотехнических систем на освещенных трассах. Далее будут рассмотрены и другие частоты анализируемого диапазона 10 – 30 кГц. Расчеты на каждой трассе выполнены строгими методами для четырех сезонов: зима (1) – 22 декабря, весна (2) – 22 марта, лето (3) – 22 июня, осень (4) – 22 сентября и средней солнечной активности, имевшей место в 2021 году. Здесь и далее задавалась излученная мощность источника, равная 1 кВт.

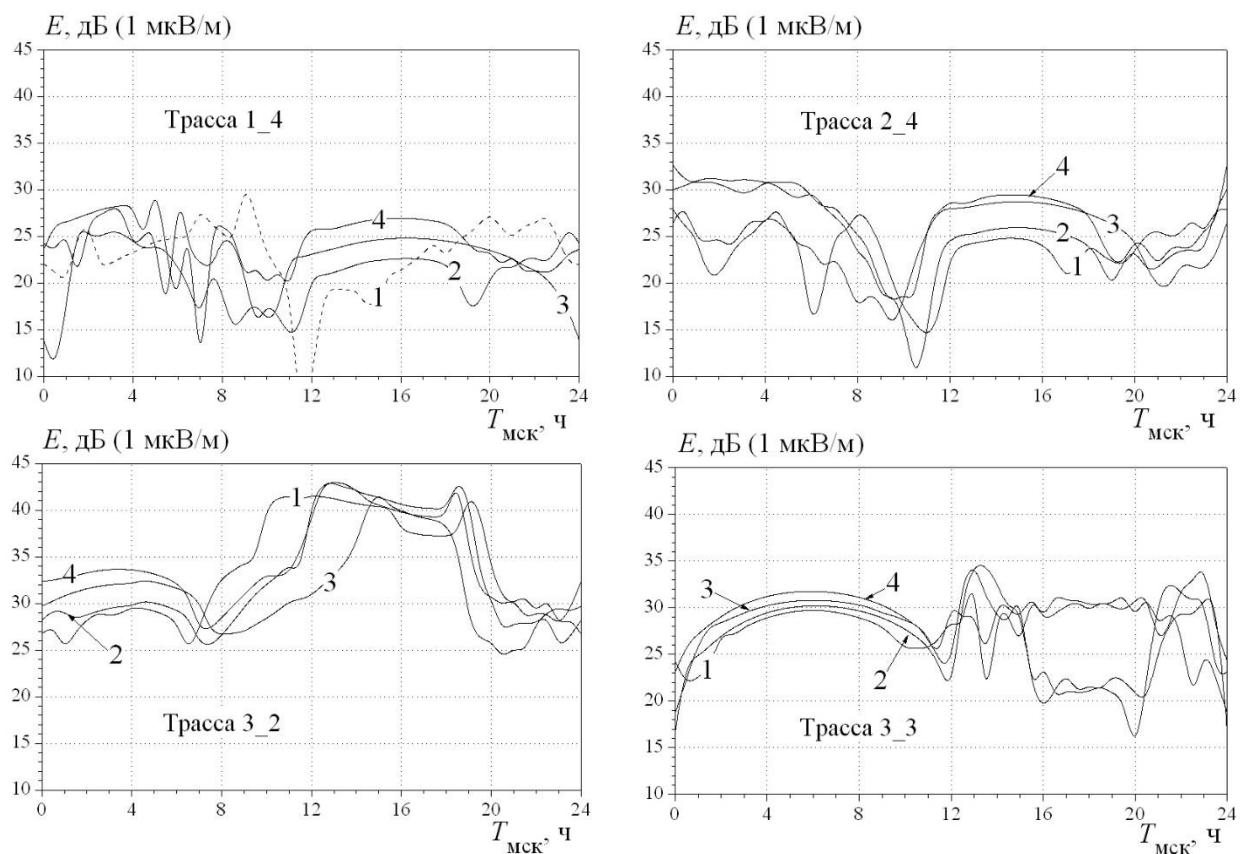


Рис. 1. Суточный ход амплитуды поля на частоте 20 кГц в конечных точках радиотрасс

Анализ графиков показал, что явно выделяются временные интервалы, когда вся трасса освещена. Кривые для этих интервалов имеют характерный вид «плато», и поле в этих условиях относительно стабильно. Среднее московское время, когда трасса освещена, приведено в правом столбце табл. 1. Для высоколатитурной трассы 1\_4 такой участок в зимнее время отсутствует, суточный ход напряженности поля в этих условиях показан на рис. 1 пунктиром.

В целом для всех рассматриваемых трасс и времен года вариации поля в дневной период не превышают 10 дБ. Это позволяет надеяться на возможность представления поля в таких условиях более простыми зависимостями, чем строгое описание, основанное на волноводной модели [1, 2].

На радиотрассах одинаковой освещенности можно использовать результат решения базовой задачи о распространении волны в однородном по расстоянию волноводном канале Земля – ионосфера [2]. Для анализа поля на больших расстояниях наиболее эффективным является метод нормальных волн. В этом случае вертикальная компонента электрического

поля  $E(R)$  на расстоянии  $R$  от источника излучения в виде вертикального электрического диполя представляется в виде бесконечного ряда (суммы мод) [3]

$$E(R) = E_0(R) W(R); \quad (1)$$

$$W(R) = \frac{\theta}{\sqrt{\sin \theta}} \sum_{m=1}^{\infty} \Lambda_m \exp[i(v_m - ka)\theta], \quad (2)$$

где  $E_0(R)$  – поле над плоской бесконечно проводящей земной поверхностью;  $W(R)$  – функция ослабления сферического волноводного канала Земля – ионосфера;  $\theta = R/a$  – расстояние между источником и приемником в угловой мере ( $a = 6,37$  Мм радиус Земли);  $\Lambda_m$  – коэффициенты возбуждения нормальных волн;  $v_m$  – собственные числа задачи (комплексные параметры, определяющие фазовую скорость и коэффициент затухания различных нормальных волн);  $k$  – волновое число в воздухе.

При записи функции ослабления в виде (2) использованы асимптотические представления функций Лежандра. В диапазоне СДВ эти представления справедливы, если точка наблюдения удалена от источника и от его антипода на расстояния более 20 – 100 км.

Если характеристикой источника является излучаемая мощность  $P_\Sigma$ , то в волновой зоне (при  $kR \gg 1$ )

$$|E_0(R)|_{[MKB/M]} = \frac{300 \sqrt{P_{\Sigma[kBm]}}}{R_{[Mm]}}. \quad (3)$$

В дневных условиях на расстояниях, больших 1 – 1,5 Мм, распространение волны преимущественно одномодовое ( $m = 1$ ) [1, 2]. Из формулы (1) следует, что модуль функции ослабления отдельной моды связан, в основном, с мнимой частью собственного числа, поэтому

$$|W(R)| = \frac{\theta}{\sqrt{\sin \theta}} W_1(R), \quad (4)$$

где выделена часть модуля функции ослабления, не содержащая геометрического множителя, а именно

$$W_1(R) = |\Lambda_1| \exp(-\operatorname{Im} v_1 \theta). \quad (5)$$

Представим также функцию  $W_1(R)$  в виде

$$W_1(R) = \exp[\beta(f) - \alpha(f)R], \quad (6)$$

где введенные коэффициенты  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$  связаны со строгими параметрами задачи  $\Lambda_1$  и  $v_1$  следующим образом

$$\Lambda_1 = \exp \beta(f); \operatorname{Im} v_1 = a \alpha(f), \quad (7)$$

т. е. параметр  $\beta(f)$  определяет коэффициент возбуждения первой моды, а параметр  $\alpha(f)$  является коэффициентом ее затухания.

Представление (6) замечательно тем, что, во-первых, оно соответствует модели строгого решения в одномодовом приближении, а во-вторых, логарифм функции  $W_1(R)$  является линейной функцией относительно расстояния  $R$ , т. е.

$$\ln W_1(R) = \beta(f) - \alpha(f)R. \quad (8)$$

Функция  $W_1(R)$  может быть вычислена на массиве заданных расстояний  $R_i$  строгими методами по результатам расчета модуля напряженности поля  $|E(R)|$ .

Из формул (1), (3) и (4) следует

$$W_1(R_i) = \frac{R}{300\sqrt{P_\Sigma}} \frac{\sqrt{\sin \theta_i}}{\theta_i} |E(R_i)|. \quad (9)$$

По вычисленному массиву значений  $\ln W_1(R_i)$  коэффициенты  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$  целесообразно определять методом линейной регрессии.

Таким образом, в областях параметров задачи, где применимо одномодовое приближение, возможна следующая аппроксимация модуля поля с помощью двух параметров – аппроксимационных коэффициентов  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$

$$|E(R)| = \frac{300\sqrt{P_\Sigma}}{R} \frac{\theta}{\sqrt{\sin \theta}} \exp[\beta(f) - \alpha(f)R]. \quad (10)$$

Формула (10) следует из приведенных соотношений (1), (3), (4) и (6). Указанные коэффициенты могут быть определены на основании расчетов поля по строгому методу с использованием линейной регрессии.

Аппроксимация (10) в 1980-х годах была предложена в Санкт-Петербургском государственном университете. Эти результаты, к сожалению, не были опубликованы. Выполненная в настоящее время проверка показала, что полученные тогда значения коэффициентов  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$  не обеспечивают удовлетворительное совпадение с результатами расчетов современными строгими методами.

Из рис. 1 следует, что минимум поля в дневных условиях с уровнем 25 dB имеет место для трассы 2\_4 зимой, а максимум с уровнем 34 dB – на трассе 3\_2 осенью. Для этих экстремальных условий по описанной методике были вычислены аппроксимационные коэффициенты  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$ , частотный ход которых показан на рис. 2 пунктиром. Зависимость поля на этих трассах от расстояния, вычисленные по формуле (10), представлены на рис. 3 пунктиром, а результаты вычисления по строгим методам – сплошными линиями. Хорошее совпадение соответствующих кривых, особенно для больших расстояний, свидетельствует об удачном выборе аппроксимационной зависимости (10), что является следствием применимости одномодового приближения на освещенных трассах.

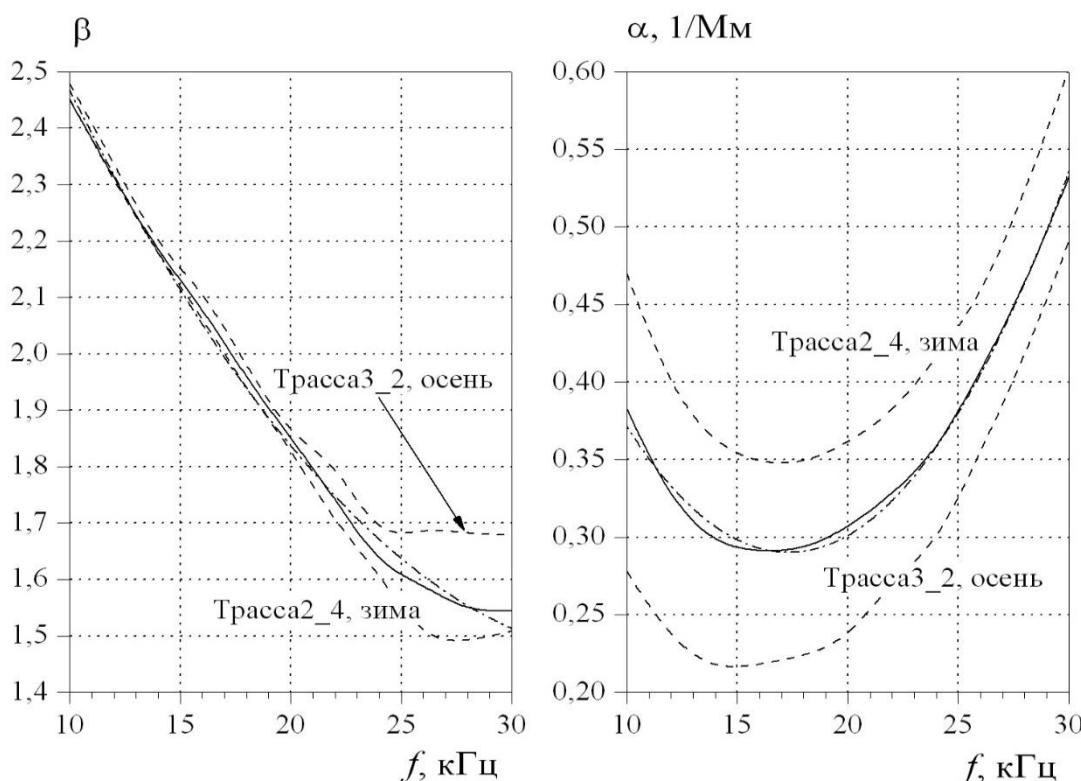


Рис. 2. Частотный ход аппроксимационных коэффициентов  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$   
на заданных трассах

Вместе с тем аппроксимации на конкретных трассах имеют мало практической пользы, поскольку для определения коэффициентов  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$  необходимо иметь заранее вычисленные по строгому методу значения амплитуды поля на каждой рассматриваемой трассе. Поэтому были вычислены параметры  $\beta(f)$  и  $\alpha(f)$  для 15 геофизических условий, показанных на рис. 1 (за исключением зимы для трассы 1\_4), и выполнено их усреднение. Эти результаты показаны на рис. 2 сплошными линиями. Здесь же штрих-пунктиром приведены результаты приближения этих зависимостей, полученные методом квадратичной регрессии, а именно

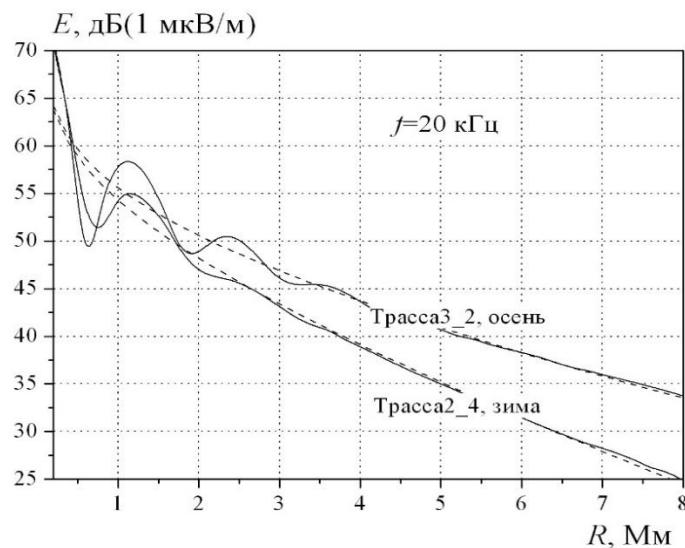


Рис. 3. Зависимость электрического поля от расстояния на заданных трассах

$$\alpha(f) = a_{\alpha 0} + a_{\alpha 1}f + a_{\alpha 2}f^2, \quad \beta(f) = a_{\beta 0} + a_{\beta 1}f + a_{\beta 2}f^2, \quad (11)$$

что может быть полезно при проведении практических расчетов.

Значения соответствующих коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов квадратичной регрессии выражения (11)

$a_{\alpha 0}$	$a_{\alpha 1}$	$a_{\alpha 2}$	$a_{\beta 0}$	$a_{\beta 1}$	$a_{\beta 2}$
0,746	-0,0529	0,00153	3,418	-0,11	0,00157

На рис. 4 пунктиром представлены результаты расчетов напряженности поля для нескольких частот, вычисленные по формуле (10) с аппроксимацией, приведенной в табл. 2.

Здесь же сплошными линиями показаны результаты расчетов поля по строгой методике для указанных выше экстремальных условий.

Расчеты, выполненные по массивам точек для рассмотренных трасс и условий, показали, что среднеквадратическое отклонение приближенных результатов от результатов, полученных строгими методами, составляет не более 3-4 дБ. Эта же оценка имеет место и для других трасс, не включенных в описанный анализ. На этом же рисунке штрих-пунктиром приведены и результаты расчетов по формуле Остина. Эти результаты уже существенно отличаются от точных значений.

Предложенная аппроксимация поля СДВ диапазона для полностью освещенных трасс не обладает возможными на сегодня точностями прогнозирования полей, но она может быть рекомендована для предварительных оценок ожидаемых характеристик радиотехнических систем. А иногда при анализе качественных зависимостей эта аппроксимация является предпочтительной, поскольку она содержит результаты усреднения на многих трассах.

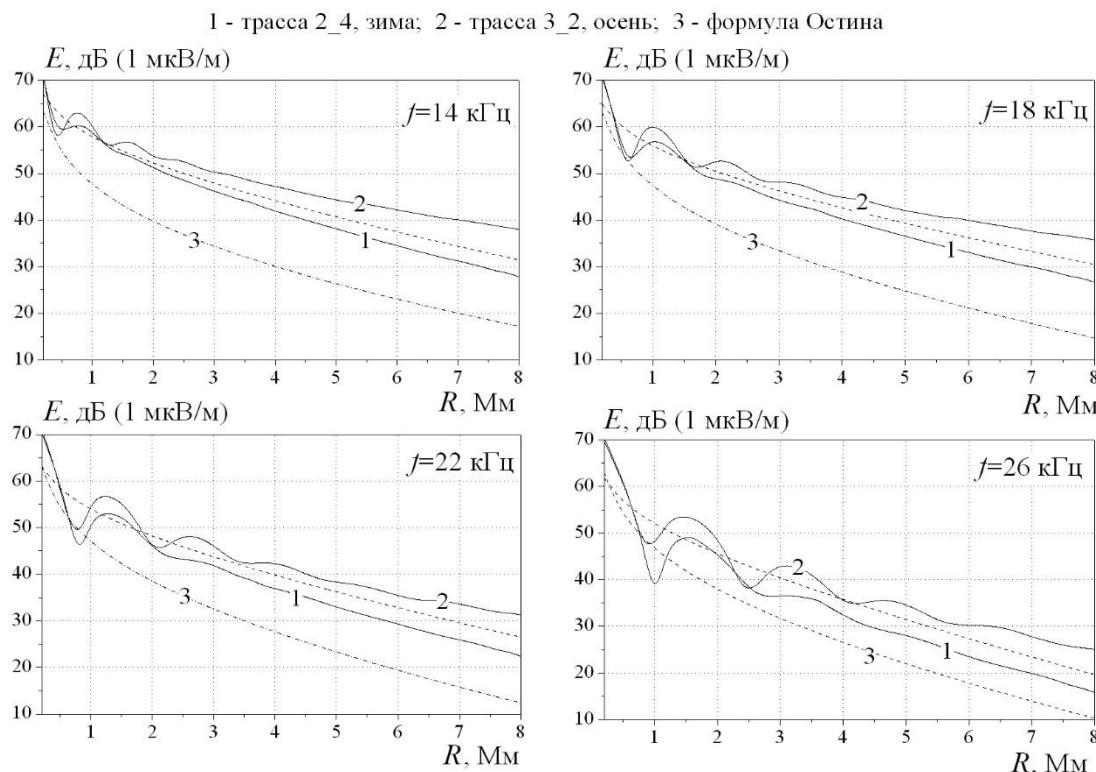


Рис. 4. Результаты расчетов напряженности поля для заданных радиотрасс

Рассмотрим, например, частотную зависимость отношения сигнала/шум  $h(f)$ .

Из формулы (10) следует

$$h(f) = \frac{E(f, R)}{E_n(f)} = \frac{300\sqrt{P_\Sigma(f)}}{R E_n(f)} \frac{\theta}{\sqrt{\sin \theta}} \exp[\beta(f) - \alpha(f)R], \quad (12)$$

где  $E_n(f)$  – напряженность поля шумов в точке приема.

В диапазоне СДВ основной помехой радиоприему является естественный электромагнитный фон. Из анализа данных МСЭ [4] следует, что частотная зависимость этого фона хорошо аппроксимируется степенной функцией

$$E_n(f) = E_{n1} f^{-v_n}, \quad (13)$$

где параметр  $v_n$  в зависимости от координаты точки наблюдения, времени суток и сезона может принимать значения из интервала [1, 2].

Частотная зависимость излученной мощности определяется коэффициентом полезного действия передающей антенны  $\eta(f)$ , который также может быть представлен степенной функцией

$$\eta(f) = \eta_1 f^{v_\eta}. \quad (14)$$

Для одной из отечественных радиостанций  $\eta_1 = 0,1$ , а  $v_\eta = 0,63$ . Естественно, что  $P_\Sigma(f) = P_0 \eta(f)$ , где  $P_0$  – подведенная к антенне мощность.

Введем теперь в рассмотрение некоторую частоту  $f_0$  и составим отношение  $\delta h(f) = h(f)/h(f_0)$ . Из формул (12) – (14) следует

$$\delta h(f) = \left( \frac{f}{f_0} \right)^{0,5v_\eta+v_n} \exp\{[\beta(f) - \beta(f_0)] - [\alpha(f) - \alpha(f_0)]R\}. \quad (15)$$

Формула (15) определяет изменение параметра сигнал/шум относительно его значения на частоте  $f_0$ , и она удобна тем, что в ней отсутствуют множители, не зависящие от частоты. Результаты расчетов по формуле (15) приведены на рис. 5. Сейчас в задачу не входит вычисление абсолютных значений, поэтому искомые значения  $\delta h(f)$  нормированы к их максимальному значению на вычисленном массиве, а именно  $\delta h_r(f_i) = \delta h(f_i)/\max h(f_i)$ . Поэтому максимальные значения искомой величины равны единице, и вычисленные результаты не зависят от выбора частоты  $f_0$ .

Характерно, что при указанных самых общих предположениях, имеют место максимумы на определенных частотах. Назовем эти частоты благоприятными. Естественно, они выше на больших расстояниях и при больших значениях параметра  $v_n$ . В этих условиях более острыми являются и максимумы анализируемой функции. Благоприятные частоты находятся в сравнительно небольшой окрестности частоты 20 кГц. Вместе с тем ошибка в выборе частоты на несколько килогерц не приводит к существенному уменьшению отношения сигнал/шум в точке приема.

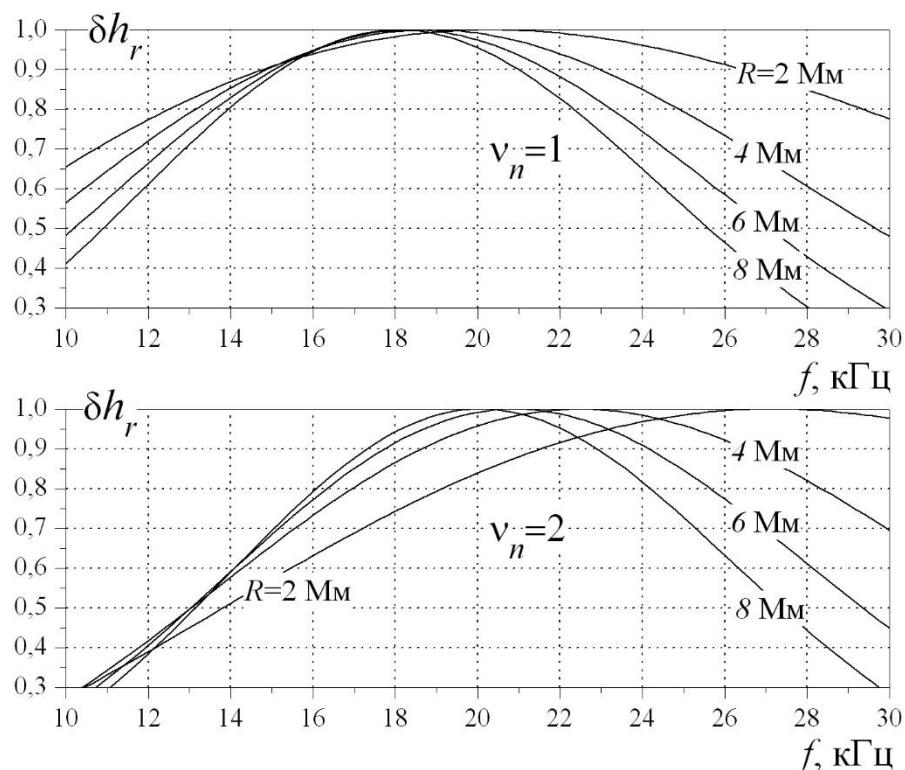


Рис. 5. Результаты расчетов по формуле (15)

Эти качественные результаты справедливы для всех освещенных трасс. Количественные энергетические оценки для конкретных ситуаций необходимо, конечно, выполнять на базе расчетов по строгим методикам.

Что касается вычисления поля СДВ диапазона на неосвещенных и смешанных трассах, то здесь, видимо, надо отказаться от попыток разработки несложных приближенных методик. В этих условиях имеют место существенные нерегулярности, что было проиллюстрировано на рис. 1. Учесть все условия можно только на основе решения многопараметрической задачи. Такая задача уже имеет программные реализации, и на современной вычислительной технике время расчета уже доведено до приемлемых значений [1, 2].

## Выводы

1) Предложенная приближенная формула поля СДВ диапазона для полностью освещенных трасс имеет погрешность не более 4 дБ по отношению к результатам строгого решения и может быть рекомендована для предварительных оценок ожидаемых характеристик радиотехнических систем.

2) Благоприятные для работы радиотехнических систем на освещенных трассах частоты находятся в сравнительно небольшой окрестности частоты 20 кГц. Вместе с тем ошибка в выборе частоты на несколько килогерц не приводит к существенному уменьшению отношения сигнал/шум в точке приема.

3) На неосвещенных и смешанных трассах имеют место существенные нерегулярности поля в СДВ диапазоне, и здесь, видимо, необходимо отказаться от попыток разработки несложных приближенных методик, содержащих небольшое число исходных параметров.

## Литература

1. 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.
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. Рекомендации МСЭ-Р Р.372-11(09/2016). Радиошум.

## References

1. Akulov V. S., Bisyarin M. A., Ugrik L. N., Petrov A. N. Analysis of factors influencing the propagation of radio waves of the shift band. Means of Communication Equipment. 2025. № 2 (170). pp. 85-98 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-2-85-98.
2. Makarov G. I., Novikov V. V., Rybachev S. T. Propagation of radio waves in the Earth-ionosphere waveguide channel and in the ionosphere. Moscow. Nauka Publ., 1994. 151 p. (in Russian).
3. Orlov A. B., Azarnin G. V. The main patterns of propagation of shift band signals in the Earth–ionosphere wave channel (Review of experimental work). Problems of diffraction and wave propagation. Leningrad. LSU Publ., 1970, v. 10, pp. 3-107 (in Russian).
4. ITU Recommendations-R. R.372.13 (09/2016). Radio noise (in Russian).

**Статья поступила 12 августа 2025 г.**

## Сведения об авторах

*Акулов Валерий Семёнович* – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий ВМФ, 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.

*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.

*Петров Андрей Николаевич* – Начальник научно-исследовательского отделения. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии»

(ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: разработка систем телекоммуникаций специального назначения. Тел.: +7(812)448-96-58. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

## An approximate method for calculating electromagnetic fields in the ultra-long wave range

I. S. Akulov, L. N. Ugrik, A. N. Petrov

**Annotation.** The paper provides a comparative numerical analysis of modern rigorous methods for predicting electromagnetic field parameters affecting the propagation of radio waves in the ultra-long wavelength range and the approximate method proposed by the authors for calculating them based on geophysical factors on illuminated radio paths. **The purpose of the work:** an approximate description of the parameters of the electromagnetic field using simpler dependencies than multiparametric rigorous solutions with the presentation of computational examples for specific radio paths. **The calculation methods** on each track are performed using strict methods for four seasons: winter, spring, summer, autumn and the average solar activity that took place in 2021 with a set value of the radiated source power of 1 kW. **The novelty of the work** lies in finding simpler calculation expressions and techniques in comparison with strict classical methods and the Austin formula. **The results of the work** are that an approximate formula for calculating the electric field for fully illuminated ultra-long-wavelength radio paths is given, **the practical significance** of which lies in the fact that it has an error of no more than 4 dB in relation to the results of a strict solution. Although this formula does not have the accuracy of field prediction possible today, it can be recommended for preliminary estimates of the expected characteristics of radio engineering systems. And sometimes, when analyzing qualitative dependencies, this approximation is preferable, since it contains the results of averaging on many radio paths, and frequencies favorable for the operation of radio engineering systems on illuminated routes are in a relatively small neighborhood of the frequency of 20 kHz.

**Keywords:** ultra-long wave range, quadratic regression method, field strength, radio wave propagation, diurnal amplitude of electric field, Ostin formula.

### Information about the authors

*Valery Semenovich Akulov* – 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.

*Larisa Nikolaevna Ugrik* – 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.

*Andrey Nikolaevich Petrov* – is the Head of the research department. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: development of special purpose telecommunications systems. Tel.: +7(812)448-96-58. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

### Для цитирования:

Акулов В. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н. Приближенный метод расчета электромагнитных полей СДВ диапазона // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 26-34. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-26-34.

### For citation:

Akulov V. S., Ugrik L. N., Petrov F. N. An approximate method for calculating electromagnetic fields in the ultra-long wave range. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 26-34 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-26-34.

## ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.91

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-35-40

### Фазовый фильтр движущегося навигационного приемника импульсно-фазовой радионавигационной системы

Иванов Д. В., Путилин А. Н.

**Аннотация:** Рассмотрены аспекты реализации алгоритма приема сигналов станций цепи импульсно-фазовых радионавигационной системы «Чайка» в движущемся навигационном приемнике. Динамическая коррекция измерений навигационных параметров в приемнике является необходимой составной частью обеспечения его устойчивой работы. Рассмотрена реализация альфа-бета фильтра как упрощенная версия фильтра Калмана, достаточная для решения рассматриваемой задачи. Найдены оптимальные параметры фильтра, обеспечивающие решение навигационной задачи на минимальной длине выборки принимаемого сигнала. **Целью работы является:** исследование вариантов построения алгоритма демодуляции и обработки сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы для определения координат движущегося навигационного приемника. **Новизна работы** состоит в оценке необходимых временных периодов для достоверного детектирования сигналов навигационных станций и вычисления погрешности в определении навигационных параметров. **Получены следующие результаты:** выполнено моделирование функционирования движущегося навигационного приемника, проведено обоснование порядка обработки сигнала в его демодуляторе, определены оптимальные параметры фазового фильтра навигационных измерений. **Практическая значимость** состоит в возможности обеспечения устойчивой работы навигационного приемника импульсно-фазовой радионавигационной системы «Чайка» в движении.

**Ключевые слова:** детектор сигнала, движущийся навигационный приемник, оптимизация параметров альфа-бета фильтра, фазовый фильтр Калмана.

### Введение

В работе [1] рассматривалась программная реализация алгоритма демодуляции сигналов станций цепей импульсно-фазовых радионавигационных сигналов (ИФРНС) «Чайка» в неподвижном навигационном приемнике. Для движущегося приемника необходима дополнительная реализация фильтра, корректирующего полученные измерения.

Для определения псевдодальности от станций цепи ИФРНС до навигационного приемника (НП) в соответствии с ГОСТ Р 53168-2008 [2] вычисляется время прихода земной волны по несущей – *Time Of Arrival (TOA)*, как время перехода фазы импульса через ноль через 30 мкс с момента его начала, что соответствует трем периодам сигнала с частотой 100 кГц. На вход НП приходит смесь сигналов станций ИФРНС, шума и помех, что может вызвать смещение измеряемого *TOA*, в том числе ошибку в определении номера периода сигнала станции. Ошибка в определении номера периода приводит к переключению измеряемой псевдодальности на соседнюю фазовую дорожку [3]. Для частоты 100 кГц её ширина составляет 2996 м. Также имеет место девиация скорости распространения земной радиоволны между НП и станцией ИФРНС которая определяется распределением диэлектрической проницаемости и проводимости подстилающей поверхности в первой зоне Френеля, а также её рельефом. Это вызывает девиацию точности измерения времени прихода земной волны до 4 мкс, что соответствует ошибке в измерении псевдодальности до  $L_{\text{ош}} = 4e^{-6} * 2.99691162e^8 \text{ м/с} = 1200 \text{ м}$ . Вычисление дифференциальных поправок и коррекция ошибок определения псевдодальности возможна за счет измерения не связанного с несущей частотой параметра передаваемых сигналов, а также за счет накопления принимаемых периодических сигналов.

В качестве второго измеряемого параметра используют время прихода волны по огибающей *Half-Cycle-Peak-Ratio* (*HCPR*), [4-6]. Оно определяется как момент равенства производной от огибающей сигнала известной константе, определяющей время половины цикла огибающей. Разность между *TOA* и *HCPR* называют *Envelope-to-Cycle Discrepancy* (*ESD*). По значению *ECD* можно оценить псевдодальность (хотя бы с точностью до фазовой дорожки), поскольку эта зависимость определяется только типом подстилающей поверхности.

Практика показывает, что достоверное измерение *HCPR* на периоде повторения групп импульсов *General Repeat Interval* (*GRI*) требует отношения сигнал/шум (*signal/noise ratio – SNR*) более 18-20 дБ, тогда как достоверное измерение *TOA* возможно при *SNR* выше минус 6 дБ. В соответствии с ГОСТ Р 54025 [7, 8] навигационный приемник должен функционировать при *SNR* выше минус 10 дБ. Для этого значения *SNR* грубая оценка требуемого времени накопления периодического навигационного сигнала (увеличение *SNR* на 3 дБ при удвоении времени накопления) составляет для измерения *TOA* – не более 4-х циклов *GRI*, а для измерения *HCPR* – не более 9 циклов. Для европейской цепи станции ИФРНС «Чайка» с *GRI* 8000 это соответствует 0,32 с и 41 с. Реальное требуемое время накопления сигналов всегда будет меньше этих значений.

### Представление сигналов цепи ИФРНС на фазовой плоскости

На рис. 1 представлена фазовая плоскость комплексного сигнала на входе НП с отметками сигналов различных станций ИФРНС. Каждая точка – квадратуры сигнала станции с выхода коррелятора на одной *GRI* без накопления (суммирования). Принадлежность отметок станциям обозначена цветом. Место записи сигнала – Санкт-Петербург. Оранжевый цвет – сигналы станции Петрозаводск, зеленый – Брянск (ведущая станция цепи), голубой – Слоним, фиолетовый – Самара, синий – Симферополь. Уровень шума на входе НП определяется дисперсией облака точек одного цвета относительно его среднего положения (математического ожидания). Средние амплитуды групп сигналов станций определяют энергию сигнала станции, а следовательно, и *SNR* для каждой станции, поскольку уровень шума для всех станций одинаков.

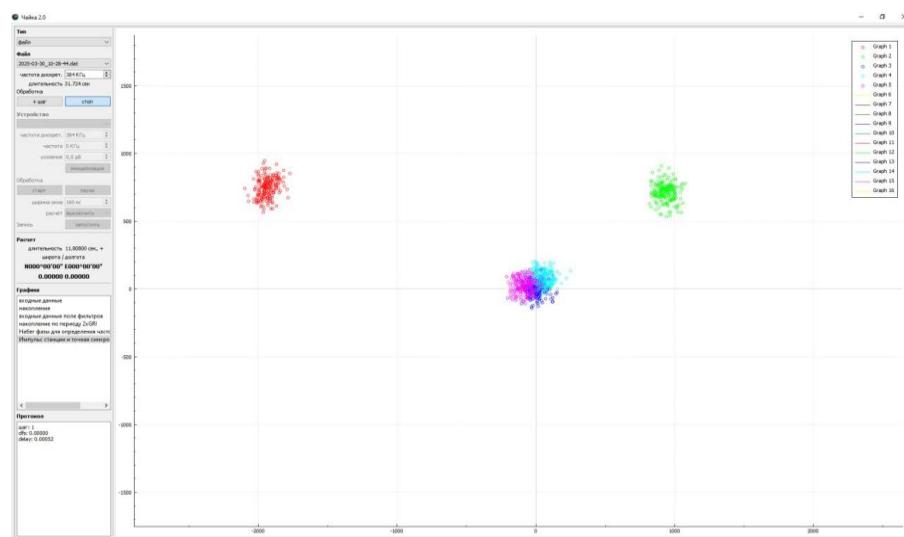


Рис. 1. Фазовая плоскость комплексного сигнала на входе НП с отметками сигналов различных станций ИФРНС

При отсутствии компенсации ухода частоты опорного генератора НП для неподвижного приемника наблюдается осцилляция (в виде кругового смещения) точек одного цвета вокруг начала координат осей со скоростью, определяемой набегом частоты в опорном генераторе НП. Направление движения точек определяет положительный (против часовой

стрелки) или отрицательный (по часовой стрелке) набег частоты. Подстройка сдвига частоты опорного генератора обеспечивает остановку вращения у неподвижного НП.

Сигнал к НП приходит по двум путям: земной и ионосферной волнами. Земная волна всегда опережает ионосферную минимум на 40 мкс, поэтому определение псевдодальности происходит всегда только по земной волне. Для исключения ложного детектирования сигнала по ионосферной волне, которое дает неверное определение псевдодальности, паттерн сигнала в корреляционном приемнике [2] обрезается с 40-й мкс, поскольку задержка прихода ионосферной волны всегда больше 40 мкс, что соответствует разности хода в 12 км. Как правило, ионосферный сигнал превосходит по мощности сигнал земной волны (за исключением ближней зоны передающей станции). Поэтому для компенсации набега частоты и грубого (предварительного) вычисления псевдодальности для корректного вычисления поправок по *ECD* может и должен использоваться сигнал ионосферной волны. Компенсация набега частоты делает возможным накопление принимаемых сигналов для увеличения *SNR*, как указано выше.

Суммирование сигналов станций с периодом *GRI* кратно увеличивает их энергию и позволяет вычислить математическое ожидание положения комплексного сигнала станции на фазовой плоскости. Разрешение набега фазы увеличивается, что обеспечивает прирост точности определения псевдодальности. Сигналы станций с низким *SNR* располагаются ближе к началу координатных осей. Набег фазы конкретной станции определяется кратностью длине волны расстояния до передатчика в земном луче, а при сложении земного и ионосферного лучей – текущей фазой суммы. В случае отсутствия движения НП набег фазы может меняться из-за изменения фазы ионосферных лучей, но очень медленно.

У движущегося НП дополнительно появляется допплеровский сдвиг частоты, определяемый угловой скоростью его сближения или удаления с той или иной станцией. В этом случае сигналы различных станций начнут поворачиваться в различные стороны или оставаться на месте в случае движения НП вокруг одной из станций ИФРНС, что обеспечит нулевую скорость сближения/удаления. При наличии движения НП набеги фазы сигналов различных станций ИФРНС начнут двигаться в различные стороны, в зависимости от удаления или приближения к ним. Выборочные значения сдвига частоты несущего колебания (Гц) от скорости сближения/удаления от станции ИФРНС приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость значений сдвига частоты несущего колебания (Гц) от скорости сближения/удаления навигационного приёмника от станции ИФРНС

Сдвиг частоты несущего колебания, Гц	Скорость сближения, м/с
0,5	1500
0,1	300
0,05	150
0,01	30
0,005	15
0,001	3

При наличии в полосе сигнала ИФРНС на входе приемника гармонической помехи центр вращения точек смещается в координаты, соответствующие энергии и текущей фазе помехи. При совпадении частоты помехи и частоты опорного генератора НП центр вращения будет неподвижен, при несовпадении – начнет осциллировать по кругу в сторону набега частоты помехи относительно частоты опорного генератора НП. Измерение параметров осцилляции принципиально позволяет компенсировать гармоническую помеху в полосе сигнала.

### Фазовые фильтры сигнала в навигационном приемнике

В НП должен быть реализован контур грубой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а также пять контуров точной ФАПЧ. ФАПЧ грубой подстройки определяет начало

периода *GRI* с точностью до задержки ионосферной волны, корректирует сдвиг частоты опорного генератора, что изменяет положения отсчетов принимаемого сигнала в периоде *GRI*. Для вычисления корреляции используется эталонный сигнал на интервале 110 мс от начала, захватывающим время прихода ионосферной волны. Грубая фазовая автоподстройка компенсирует набег опорного генератора приемника, общий для всех станций. В силу большой энергетики принимаемого сигнала, обусловленной обработкой суммы сигналов земной и ионосферной волн от всех станций на всем периоде сигнала, данный набег будет вычислен быстро и надежно. Контура точной ФАПЧ работают с сигналов каждой станции персонально. Для вычисления корреляции используется эталонный сигнал только на интервале существования земной волны – 30 мс от начала. Навигационные параметры *TOA*, *ECD*, *HCPR* определяются только на этом интервале. Дополнительный набег частоты для каждой станции будет различным и определится допплеровским смещением в зависимости от скорости изменения расстояния между НП и соответствующей станцией.

Фазовый фильтр реализуется как альфа-бета фильтр [9], являющийся вариантом фильтра Калмана для системы с двумя переменными состояния: положением  $x_k$  и скоростью  $v_k$ . В данном случае имеется ввиду текущий набег частоты и скорость его изменения. Предполагаем, что скорость остается постоянной в течение небольшого промежутка времени между измерениями  $\Delta T$ . Тогда динамика изменения состояний рассматриваемой системы описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} X_k &\equiv X_{k-1} + \Delta T * V_{k-1}, \\ V_k &\equiv V_{k-1}, \\ R_k &\equiv x_k - X_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X_k$ ,  $V_k$ ,  $R_k$  – предсказания положения, скорости и ошибки прогнозирования,  $k$  – шаг между измерениями,  $\Delta T = 2 * GRI$  (как вариант).

Для нормировки оценок используют коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Тогда (1) примет вид:

$$\begin{aligned} X_k &\equiv X_{k-1} + \alpha R_k, \\ V_k &\equiv V_{k-1} + (\beta / \Delta T) R_k. \end{aligned} \quad (2)$$

Для обеспечения сходимости фильтра  $\alpha$  и  $\beta$  выбирают в интервале от 0 до 1. Большее значение дает быструю реакцию при отслеживании смены состояния, меньшие значения снижают шум оценки. Альфа-бета фильтр может быть оптимизирован по различным критериям. Среднеквадратичную ошибку прогнозирования минимизируют следующие параметры [9]:

$$\begin{aligned} \alpha &= (\sigma_c / \sigma_{\text{ш}}) \Delta T^2, \\ \beta &= 2(2-\alpha)-4(1-\alpha)^{1/2}, \end{aligned}$$

где  $\sigma_c$  и  $\sigma_{\text{ш}}$  – дисперсии сигнала и шума, соответственно. В этом случае  $R = (4+\alpha-(8\alpha+\alpha^2)^{1/2})/4$ ,  $\alpha = 1 - R^2$ . Таким образом, оптимизация параметров фильтра требует оценки энергии (дисперсии) сигнала и шума на входе НП. Для этой оценки достаточной представляется выборка длиной 9 двойных периодов *GRI* (см. выше).

Другим способом вычисления является рекурсия. В соответствии с [9] определяем коэффициенты следующим образом

$$\begin{aligned} \alpha &= 2(2k-1)/(k^2+k), \\ \beta &= 6/(k^2+k). \end{aligned}$$

При росте  $k$  коэффициенты уменьшаются. Вес новых измерений падает. При достижении  $k = 9$  расчет останавливается. Далее используются вычисленные коэффициенты. Для цепи *GRI* 8000 длина импульсной характеристики фильтра составит 0,72 с = 80 мс \* 2 \* 9. Оптимальные значения параметров фильтра в этом случае  $\alpha = 0,378$ ;  $\beta = 0,067$ .

Оба способа определения параметров фильтра требуют ограничения интервала, на котором статистические характеристики (для первого варианта это  $\sigma_c$  и  $\sigma_{\text{ш}}$ , для второго это 9 интервалов *GRI*) входного процесса стационарны, но длина интервала достаточна для их достоверного определения.

## Заключение

Алгоритм вычисления положения абонентского приемника описан в [1]. В отличие от рассматриваемой в данной работе задачи процедура уточнения координат при движении абонентского приемника реализуется при помощи фильтра Калмана. При моделировании работы движущегося приемника использовались записи как от имитатора навигационных сигналов цепи ИФРНС, так и реальные записи. Для устойчивой работы НП, определяемой выполнением требований ГОСТ Р 54025 [7], оказалось достаточным использование рассмотренного в данной работе альфа-бета фильтра без перехода к более сложно реализуемым вариантам калмановской фильтрации, позволяющим обрабатывать ошибки измерений с распределением, отличным от гауссовского. Необходимым условием является настройка коэффициентов фильтра, два варианта которой рассмотрены в данной работе. Для практического использования они дают одинаковый эффект. Анализ записей реальных сигналов производился с помощью модели программного обеспечения демодулятора ИФРНС, выполненной на языке программирования *Python*, использована библиотека с открытым исходным кодом *NumPy*. Использовались сигналы *GRI* 8000 – Европейской цепи с периодом повторения 80 мс.

## Литература

1. Иванов Д. В., Путилин А. Н., Сыроветник Д. С., Царик И. В. Программная реализация демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 28-36. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-28-36.
2. ГОСТ Р 53168-2008 Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2020.
3. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. – Москва: Советское Радио, 1979. 280 с.
4. Pelgrum W. J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.
5. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000, 36, 290-291.
6. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors, MDPI, 2020, 20, 2329.
7. ГОСТ Р 54025 (МЭК 61075:1991) Система радионавигационная «Чайка». Приемные устройства. Требования к техническим характеристикам. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2011.
8. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships – Minimum performance standards – Methods of testing and required test results.
9. Brookner E. Tracking and Kalman Filtering Made Easy, Wiley-Interscience 1<sup>st</sup> edition, 1998.

## References

1. Ivanov D. V., Putilin A. N., Syrovetnik D. S., Tsarik I. V. Software implementation of a demodulator for signals of a pulse-phase radio navigation system. Means of Communication Equipment, 2024, no. 4 (168), pp. 28-36 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-28-36.
2. GOST R 53168-2008. Radio navigation system "Chaika". Signals of transmitting stations. Technical requirements. Moscow. Standartinform, 2020 (in Russian).
3. Kinkulkin I. E., Rubtsov V. D., Fabric M. A. Phase method for determining coordinates. Moscow, Sovetskoe Radio, 1979 (in Russian).
4. Pelgrum W. J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.
5. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000, 36, 290-291.
6. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors, MDPI, 2020, 20, 2329.
7. GOST R 54025 (IEC 61075:1991) Chaika radionavigation system. Receiving devices. Performance requirements. Test methods and required test results. Moscow. Standardinform, 2011 (in Russian).

8. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships — Minimum performance standards — Methods of testing and required test results
9. Brookner E. Tracking and Kalman Filtering Made Easy, Wiley-Interscience 1st edition, 1998.

Статья поступила 12 сентября 2025 г.

### Информация об авторах

*Иванов Денис Владимирович* – Кандидат физико-математических наук. Начальник лаборатории. ООО «Фирма «НИТА». Область научных интересов: передача, прием и обработка информации. Тел.: +7(911)000-90-11. E-mail: DenisIvanov2004@mail.ru.

*Путилин Алексей Николаевич* – Доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник научно-технического центра ПАО «Интелтех». Область научных интересов: передача данных по радио, системы множественного доступа. Тел.: +7(812)448-19-01. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

## Phase filter of a moving navigation receiver of a pulse-phase radio navigation system

D. V. Ivanov, A. N. Putilin

**Annotation:** Aspects of the implementation of the algorithm for receiving signals from stations in the system "Chaika" pulse-phase radio navigation signal chain in a moving navigation receiver are considered. Dynamic correction of measurements of navigation parameters in the receiver is a necessary component of ensuring its stable operation. The implementation of the alpha-beta filter is considered as a simplified version of the Kalman filter, sufficient to solve the problem under consideration. Optimal filter parameters have been found to ensure the solution of the navigation problem at the minimum sampling length of the received signal. The purpose of the work is to study the options for constructing an algorithm for demodulation and signal processing of a pulse-phase radio navigation system for determining the coordinates of a moving navigation receiver. The novelty of the work consists in estimating the necessary time periods for reliable detection of navigation station signals and calculating the error in determining navigation parameters. The following results were obtained: the simulation of the functioning of a moving navigation receiver was performed, the order of signal processing in its demodulator was justified, and the optimal parameters of the phase filter of navigation measurements were determined. The practical significance lies in the possibility of ensuring the stable operation of the navigation receiver of the pulse-phase radio navigation system "Chaika" in motion.

**Keywords:** signal detector, moving navigation receiver, optimization of alpha-beta filter parameters, Kalman phase filter.

### Information about the authors

*Denis Vladimirovich Ivanov* – Ph.D. of Physical and Mathematics Sciences. Head of Laboratory. NITA Firm LLC. Research interests: transmission, reception and processing of information. Tel.: +7(911)000-90-11. E-mail: DenisIvanov2004@mail.ru.

*Alexey Nikolaevich Putilin* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Chief Researcher of the Scientific and Technical Center of PJSC Inteltech. Research interests: radio data transmission, multiple access systems. Tel.: +7(812)448-19-01. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru.

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

### Для цитирования:

Иванов Д. В., Путилин А. Н. Фазовый фильтр движущегося навигационного приемника импульсно-фазовой радионавигационной системы // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 35-40. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-35-40.

### For citation:

Ivanov D. V., Putilin A. N. Phase filter of a moving navigation receiver of a pulse-phase radio navigation system. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 35-40 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-35-40.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 004.45

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-41-50

**Векторизация методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений на процессорной архитектуре RISC-V**

Шемаев К. Е., Ребдев П. А., Степина Н. О.

**Аннотация.** Архитектура RISC-V представляет собой открытую и расширяемую процессорную архитектуру, которая активно набирает популярность в различных областях высокопроизводительных вычислений благодаря своей гибкости и производительности. Актуальность исследования обусловлена растущим распространением данной платформы и необходимостью разработки для нее оптимизированных вычислительных алгоритмов. Одной из ключевых технологий, используемых в высокопроизводительных вычислениях, является векторизация, позволяющая выполнять одну операцию над несколькими данными одновременно. Целью данной работы является исследование возможностей и оценка эффективности применения векторных расширений для оптимизации математических алгоритмов на данной архитектуре. В фокусе исследования — адаптация численных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений, критически важных для научного моделирования и инженерных расчетов. Научная новизна исследования заключается в систематическом изучении и адаптации данных методов под процессорную архитектуру RISC-V с использованием векторных расширений, что ранее не было предметом широкого анализа. В ходе работы были модифицированы базовые алгоритмы на уровне исходного кода с применением интринсиков и ассемблерных вставок, задействованы различные методики векторизации циклов и операций над массивами. Для оценки результатов было проведено экспериментальное исследование производительности на симуляторе или аппаратной платформе, поддерживающей векторные расширения. Результаты показали, что векторные версии алгоритмов демонстрируют статистически значимый прирост производительности, который составил от 20 % до 70 % по сравнению с классическими скалярными реализациями, в зависимости от типа задачи и размера данных. Практическая значимость работы подтверждается возможностью непосредственного применения разработанных оптимизированных алгоритмов в различных сферах высокопроизводительных вычислений. К ним относятся задачи машинного обучения, научные симуляции, обработка сигналов и другие области, требующие интенсивной обработки больших массивов данных. Полученные результаты и методики могут быть использованы для дальнейшего развития и создания специализированных библиотек численных методов, ориентированных на поддержку процессорной архитектуры RISC-V, способствуя ее интеграции в высокотехнологичные вычислительные системы.

**Ключевые слова:** векторизация, векторные расширения, высокопроизводительные вычисления, обыкновенные дифференциальные уравнения, оптимизация алгоритмов, производительность, процессорная архитектура RISC-V, численные методы.

**Введение**

RISC-V (*Reduced Instruction Set Computing – Five*) – процессорная архитектура, отличающаяся от классических архитектур, таких как ARM и x86, тем, что является открытой и свободной для использования и распространения. Процессоры с архитектурой RISC имеют ряд преимуществ перед процессорами с CISC (*Complex Instruction Set Computing*) [2]. Процессоры RISC обычно имеют более простую и эффективную архитектуру, что позволяет выполнять инструкции быстрее. Также следует отметить расширяемость данной архитектуры. RISC-V содержит базовый набор из 39 инструкций, однако есть возможность добавлять различные расширения. В данной статье авторов интересует прежде всего векторное расширение RISC-V, поскольку оно довольно часто применяется для решения задач HPC (*High Performance Computing*).

Основу высокопроизводительных вычислений составляет обработка больших объемов данных, зачастую с использованием методов линейной алгебры и математического моделирования. Для увеличения качества результатов вычислений требуется увеличение объема входных данных. В результате временные затраты на выполнение расчетов становятся ограничивающим фактором [3].

С другой стороны, такого рода вычисления очень хорошо поддаются параллелизации на уровне данных. Входные данные таких задач представлены в виде большого вектора данных. Чтобы ускорить вычисления с векторами, производители процессоров добавили в архитектуры специальные *SIMD* (*Single Instruction Multiple Data*) инструкции, которые позволяют работать за одну инструкцию сразу с несколькими элементами, рис. 1 [4].

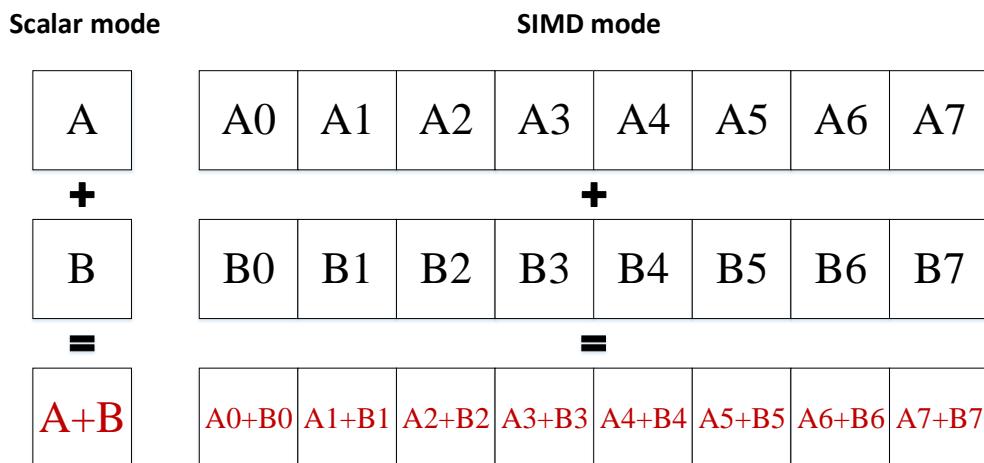


Рис. 1. Сравнение скалярных и векторных инструкций

Основной проблемой при обработке данных являются задержки при выборке инструкций из памяти. Если операции скалярные, то процессор тратит больше времени на их загрузку, чем на выполнение. Параллелизация *SIMD* помогает бороться с задержками, и чем больше степень параллелизации, тем производительнее вычисления.

### *SIMD* и её реализация на *RISC-V*

Технология *SIMD* реализуется в *RISC-V* за счёт векторного расширения (*RVV*) [5].

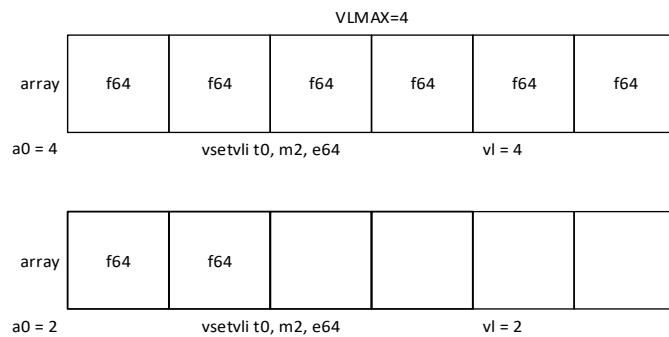
Расширение включает 32 векторных регистра. Каждый регистр имеет ширину *VLEN* в битах. Векторные регистры можно объединять в группы. Такая группировка управляет параметром *LMUL*, который принимает значения *m1*, *m2*, *m4*, *m8*, где число показывает количество регистров в группе.

Также есть значение *VLMAX*, которое определяет максимальное количество обрабатываемых элементов в одном регистре (группе). Ширина обрабатываемых элементов определяется через *SEW* (*Single Element Width*), параметр, который принимает значения *e8*, *e16*, *e32*, *e64*, где число означает размер одного элемента векторного регистра в битах. Таким образом:

$$VLMAX = \frac{VLEN * LMUL}{SEW}. \quad (1)$$

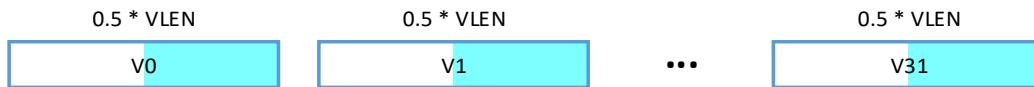
$$vl = \min(VLMAX, a0). \quad (2)$$

Конфигурация векторных регистров и параметров задается с помощью инструкции *vsetvli* (рис. 2), например:

Рис. 2. Пример *vsetvli* – конфигурации регистров

Реализация SIMD на *RISC-V* имеет ряд преимуществ по сравнению с *x86* и *ARM*:

- можно динамически изменять ширину векторного регистра во время выполнения программы путем изменения конфигурации с помощью команды *vsetvli*. То есть, можно изменить *LMUL* и *SEW*, тем самым изменив *VLMAX*.
- можно частично загрузить регистр (рис. 3). *LMUL* может принимать значения *mf2*, *mf4*, *mf8*, что позволяет использовать часть векторного регистра. Это может быть полезно для снижения энергопотребления, поскольку векторные регистры довольно требовательны.

Рис. 3. Конфигурация регистров при *LMUL = mf2*

### Выбор алгоритмов на основе анализа библиотек вычислительной математики

Распределенные вычисления используют алгоритмы линейной алгебры и численные методы вычислительной математики. В связи с растущей популярностью архитектуры процессора *RISC-V* инженеры со всего мира начали модифицировать библиотеки для реализации SIMD, такие как *OpenBLAS* (алгоритмы линейной алгебры) [5].

Для сравнения возьмем самые популярные библиотеки высокопроизводительных вычислений: *OpenBLAS*, *boost.uBLAS*, *boost.Math*, *Eigen*, *GSL*, *LAPACK*, и используем следующие условия: поддержка на машинах *RISC-V*, включая алгоритмы линейной алгебры, доступность векторизации, наличие численных методов.

Сравнительный анализ представлен в табл. 1:

Таблица 1 – Сравнительный анализ библиотек математических алгоритмов

	Поставщик	Открытость кода	Поддержка <i>RISC-V</i>	Линейная алгебра	Векторизация	Численные методы
<i>OpenBLAS</i>	<i>OpenMathLib</i>	да	да	да	да	нет
<i>boost.uBLAS</i>	<i>boostorg</i>	да	да	да	нет	нет
<i>boost.Math</i>	<i>boostorg</i>	да	да	нет	нет	да
<i>Eigen</i>	<i>libeigen</i>	да	да	да	да/нет	нет
<i>GSL</i>	<i>GNU</i>	да	да	да	нет	да
<i>LAPACK</i>	<i>Netlib</i>	да	да	да	да	нет

Как видно из таблицы, основная проблема состоит в том, что ни одна библиотека не поддерживает векторизацию и численные методы одновременно. Исходя из этого, ставится задача оптимизации этих методов посредством векторизации данных.

При выборе конкретных алгоритмов, которые можно оптимизировать, следует учитывать возможности и набор инструкций *RVV*. Например, цикл, в котором массив заполняется значениями функций, не может быть векторизован, поскольку в *RVV* нет инструкции, вызывающей внешнюю функцию. Как следствие, следует выбирать алгоритмы, в которых все данные уже хранятся в массивах на момент начала выполнения, и над этими данными необходимо выполнять различного рода математические операции. При этом отличными кандидатами на оптимизацию являются методы Рунге-Кутты и Рунге-Кутты-Фельберга для решения систем однородных дифференциальных уравнений (ОДУ) [6].

### Описание подхода использования векторизации в коде

Подход заключается в модификации циклов для обработки массивов путем применения векторных инструкций вместо скалярных [7]. Эта модификация сокращает количество итераций в циклах в  $v/l$  раз, как показано на рис. 4, где  $v/l$  – длина векторного регистра в элементах, выражение (2).

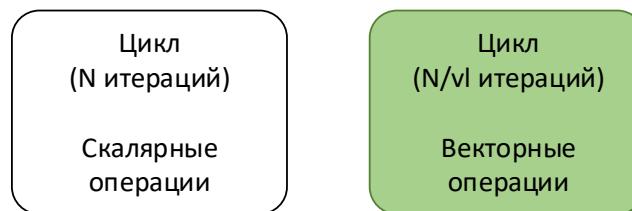


Рис. 4. Схема подхода оптимизации алгоритмов на уровне кода

Необходимо учитывать вид векторизации, чтобы сохранить всю функциональность кода. Существует 3 способа векторизации:

- автовекторизация (во время компиляции) [8];
- встроенные функции *RVV* (в коде) [9];
- ассемблерные вставки (в коде) [10].

Автовекторизация на уровне компилятора подходит для простых операций, например, суммирование массивов, но в *RISC-V* работает только с *RVV* версией 1.0. Поскольку *Lichee Pi 4A* использует несовместимую версию *RVV* 0.7.1, этот метод не подходит для нашего исследования на данном стенде. Ассемблерные вставки обеспечивают максимальный контроль над векторными операциями, но значительно усложняют код. Оптимальным решением стали интринсики – встроенные функции, сочетающие производительность ассемблера с удобством высокоуровневого программирования. Они позволяют явно задавать векторные операции, оставаясь в рамках языка *C/C++*, что особенно важно при работе с *RVV* 0.7.1 (рис. 5).

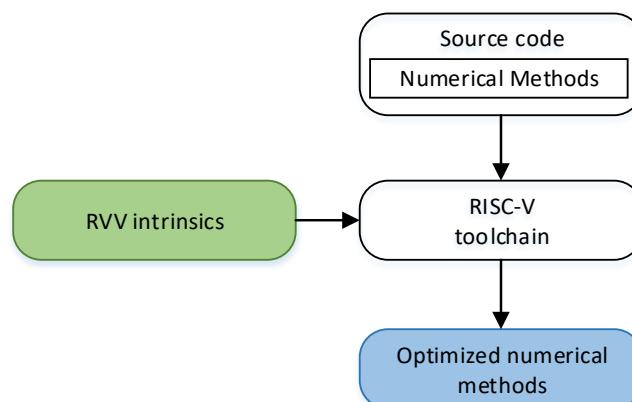


Рис. 5. Схема подхода оптимизации алгоритмов на уровне выполнения

## Реализация подхода использования векторизации в коде

Наше решение представляет собой реализацию 3 методов [11-13]:

- Рунге-Кутта 2-й степени (*rk2*);
- Рунге-Кутта 4-й степени (*rk4*);
- Рунге-Кутта-Фельберга (*rkf45*).

Для экспериментов и сравнительного анализа производительности мы реализовали 2 версии для каждого метода – с векторизацией и без нее. Для версии с векторизацией необходимо было подключить заголовочный файл *riscv-vector.h*, содержащий определения функций внутренних функций *RVV*.

В скалярной версии алгоритма циклы выглядят как в листинге 1.

```
for (int i = 0; i < n; i++){
    y[i] += hs * (k1[i] + 2 * k2[i] + 2 * k3[i] + k4[i]);
}
```

Листинг 1. Цикл “*for*” со скалярными инструкциями

Поскольку все данные уже находятся в массивах и нам нужно только выполнить над ними операции сложения и умножения, мы можем полностью векторизовать этот цикл, как показано в листинге 2:

```
// Инициализация, делается 1 раз
vfloat64m4_t k1_vec = vfmv_v_f_f64m4(0, vlmax);
vfloat64m4_t k2_vec = vfmv_v_f_f64m4(0, vlmax);
...
double * k1_p, *k2_p, *k3_p, *k4_p, *y_p, *temp_y_p;

for(size_t vl; temp_n > 0; temp_n -= vl, y_p+=vl, k1_p+=vl, k2_p+=vl, k3_p+=vl, k4_p+=vl)
{
    vl = vsetvl_e64m4(temp_n);

    k1_vec = vle_v_f64m4(k1_p, vl);

    y_vec = vle_v_f64m4(y_p, vl);

    sum_k = vfadd_vv_f64m4(k1_vec, k4_vec, vl);
    sum_k = vfmacc_vf_f64m4(sum_k, 2, k2_vec, vl);
    sum_k = vfmacc_vf_f64m4(sum_k, 2, k3_vec, vl);
    y_vec = vfmacc_vf_f64m4(y_vec, hs, sum_k, vl);

    vse_v_f64m4(y_p, y_vec, vl);
}
```

Листинг 2. Цикл “*for*” с использованием векторных инструкций

Описание интрансикнов [14]:

*vfloat64m4\_t* – векторный тип данных, который хранит векторный регистр с данными типа *float64* и параметром *LMUL = ms4*.

*vfmv\_v\_f\_f64m4* – инициализирует векторный тип данных значениями *float64*.

*vle\_v\_f64m4* – загружает значения из памяти в векторный тип данных по указателю на *float64*.

*vfmacc\_vf\_f64m4* – выполняет умножение векторного типа на скаляр *float64*, результат умножения складывается с векторным типом (аккумулятором), результат сложения возвращается и остается в аккумуляторе.

Похожим образом мы разворачиваем все циклы в наших алгоритмах. Размер кода значительно увеличивается, но в данном случае это необходимая мера для повышения производительности.

### Результаты вычислительного эксперимента по замеру производительности

Целью эксперимента является сравнение производительности двух решений – с векторизацией и без нее. Перед проведением эксперимента необходимо подготовить среду таким образом, чтобы каждое снятие метрики было максимально независимым и воспроизводимым. В качестве метрики принимается время выполнения алгоритма. Алгоритм выполняется 100 раз для каждого метода и вычисляется среднее время выполнения.

Подготовка среды для эксперимента включает в себя несколько компонентов. Требуется привести среду выполнения в такое состояние, чтобы каждый запуск программы происходил в одинаковых условиях для корректного сравнения [15].

Процессор спроектирован таким образом, что его частота может меняться в зависимости от нагрузки. Она увеличивается при интенсивном использовании и уменьшается во время простоя. Для корректного воспроизведения тестирования производительности необходимо зафиксировать частоту процессора. В нашем случае процессор *T-Head TH1520 (4x XuanTie C910)* имеет определенный набор частот: 300 МГц, 800 МГц, 1,5 ГГц, 1,85 ГГц. Мы зафиксировали частоту на уровне 800 МГц.

На графиках ниже (рис. 6-8) показан процентное соотношение времени выполнения двух версий алгоритмов (*scalar/RV*). Графики приведены для каждого алгоритма при различных *N*, где *N* – количество уравнений в системе ОДУ.

$$N = 2^k = 1, \dots, 9. \quad (3)$$

Для эксперимента было взято *LNMUL=4*, что позволяет использовать 8 векторных регистров одновременно.

Из графиков можно сделать вывод, что при  $N < 8$  скалярная версия алгоритмов выигрывает в производительности. Это объясняется тем, что при *LMUL=4* длина векторного регистра составляет *LMUL\*VLEN* бит. Длина одного элемента *SEW* составляет 64 бита (*float64*). Тогда длина в *vl* элементах равна:

$$vl = \frac{LMUL*VLEN}{SEW} = \frac{512}{64} = 8(\text{бит}). \quad (4)$$

Таким образом, весь регистр используется только тогда, когда  $N \geq 8$ . А когда *N* начинает превышать это значение, векторное расширение начинает расширяться и его производительность начинает превышать скалярную версию.



Рис. 6. Прирост производительности метода Рунге-Кутты 2 степени

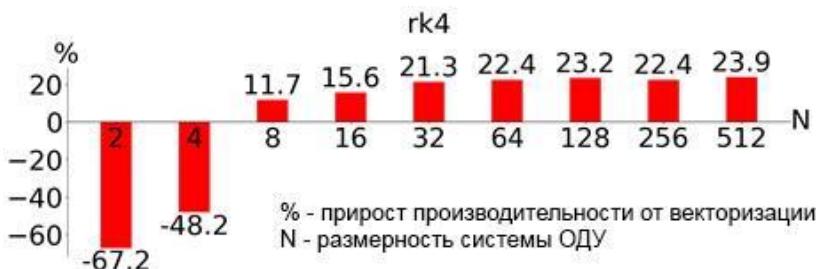


Рис. 7. Прирост производительности метода Рунге-Кутты 4 степени

Также на рис. 8 показано зелёным цветом, что с определённого значения  $N$  прирост производительности начинает замедляться. Происходит это ввиду того, что начинают использоваться все векторные регистры, то есть векторное расширение работает на полную мощность. Имеется 32 регистра длиной 128 бит, следовательно все они могут уместить 64 элемента, как видно из выражения (5):

$$N_{\max} = \frac{32 * VLEN}{SEW} = \frac{32 * 128}{64} = 64. \quad (5)$$

И поскольку операции преимущественно бинарные, то на каждый операнд отводится 32 места, отсюда получаем  $N = 32$ , количество уравнений в системе, после которого прирост замедляется.



Рис. 8. Прирост производительности метода Рунге-Кутты-Фельберга

### Заключение

Подводя итог, можно сказать, что векторизация данных в алгоритмах дает прирост производительности. В среднем для  $rk2$  (рис. 6) при  $N \geq 8$  около 20 %, для  $rk4$  (рис. 7) – 22 %, а для  $rkf45$  (рис. 8) – 75 %. Такое ускорение для  $rkf45$  обусловлено использованием всех векторных регистров, так как эта программа имеет большую степень точности по сравнению с  $rk2$  и  $rk4$ , поэтому она более трудоемка. Оптимизация методом векторизации с использованием интринсиков зависит от алгоритма, как в случае с *OpenCV*. Для максимального ускорения необходимо, чтобы векторное разложение использовалось по максимуму, т. е. использовались все регистры. В противном случае данные оптимизации покажут отрицательный прирост из-за накладных расходов на объявление, инициализацию векторных типов данных и вызов векторных функций.

Необходимо также отметить, что стенд, использованный для проведения данного исследования, пока еще относительно слаб в отношении векторного расширения. Он содержит всего лишь 32 векторных регистра шириной 128 бит.

### Литература

1. Coluccio A., Ieva A., Riente F. RISC-Vlim, a RISC-V Framework for Logic-in-Memory Architectures // Electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 19. – P. 2990. – DOI:10.3390/electronics11192990.
2. Tokhi M. O. CISC, RISC and DSP processors in real-time signal processing and control / M. O. Tokhi, M. A. Hossain // Microprocessors and Microsystems. – 1995. – Vol. 19, No. 5. – P. 291-300.

3. Лялин Д. С., Мамадалиев Ш. Р., Никифоров И. В., Устинов С. М. Проектирование системы мониторинга и расчета метрик для эффективного использования ресурсов центров обработки данных // Современные технологии в теории и практике программирования: Сборник материалов конференции, Санкт-Петербург, 26 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". – 2022. – С. 194-197.

4. Беляев И. А. Высокопроизводительный векторный мультиформатный умножитель для процессоров цифровой обработки сигналов // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 8. – С. 31-36. – DOI:10.21778/2218-5453-2019-8-31-36.

5. Зайцева К. А., Пузикова В. В., Соколов А. Д. О проблемах использования библиотеки OpenBLAS в продуктизированном коде на RISC-V // Труды ИСП РАН. 2025. Т. 35. Вып. 5. С. 91.

6. Adit N., Sampson A. Performance Left on the Table: An Evaluation of Compiler Autovectorization for RISC-V // IEEE Micro. – 2022. – Vol. 42, Issue 5. – DOI:10.1109/MM.2022.3184867.

7. Волокитин В.Д., Козинов Е.А., Кустикова В.Д., Линев А.В., Мееров И.Б. Практический пример запуска ядер с привязкой к памяти на процессорах RISC-V // Технологии параллельных вычислений. Пакт 2023. Конспекты лекций по информатике. 2023. Том 14098. Стр. 51-65.

8. Jing G.F., Ye P.H., Tao Q.M. Evaluation of Compilers' Capability of Automatic Vectorization Based on Source Code Analysis // Scientific Programming. 2021. Vol. 2021. 15 p. DOI: 10.1155/2021/3264624.

9. Chen C. et al. Xuantie-910: A commercial multi-core 12-stage pipeline out-of-order 64-bit high performance RISC-V processor with vector extension: Industrial product // 2020 ACM/IEEE 47th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2020. P. 52–64.

10. Perotti M., Cavalcante M., Wistoff N., Andri R., Cavigelli L., Benini L. A "New Ara" for Vector Computing: An Open Source Highly Efficient RISC-V V 1.0 Vector Processor Design // 2022 IEEE 33rd International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP). IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ASAP54787.2022.00017.

11. Patsidis K., Nicopoulos C., Ch. Sirakoulis G., Dimitrakopoulos G. RISC-V2: A Scalable RISC-V Vector Processor // 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9181071.

12. Schlägl M., Stockinger M., Große D. A RISC-V "V" VP: Unlocking Vector Processing for Evaluation at the System Level // 2024 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2024. DOI: 10.23919/DATEx58400.2024.10546838.

13. Lee J.K.L. et al. Test-driving RISC-V Vector hardware for HPC // arXiv preprint arXiv:2304.10319. 2023.

14. Голубев Д.Е., Шагалова П.А. Разработка расширения clang-tidy для автоматического преобразования векторных оптимизаций библиотеки OpenCV // 10-я научная конференция "ECB и электронные модули": Сборник тезисов. С. 1474-1475. 2024.

15. Шеремет С. С., Мадьяров Г. С., Никифоров И. В., Степина Н. О. / Система резервного восстановления программной инфраструктуры на экспериментальном стенде с RISC-V // Современные технологии в теории и практике программирования : Сборник материалов научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – С. 357-359.

## References

- Coluccio A., Ieva A., Riente F. / RISC-Vlim, a RISC-V Framework for Logic-in-Memory Architectures [et al.]. Electronics, 2022, V. 11, no. 19, pp. 2990. DOI 10.3390/electronics11192990. EDN BKRKIA.
- Tokhi M. O., Hossain M. A. CISC, RISC and DSP processors in real-time signal processing and control. Microprocessors and Microsystems, 1995, v. 19, no. 5, pp. 291-300.
- Lyalin D. S., Mamadaliev Sh. R., Nikiforov I. V., Ustinov S. M. *Proektirovaniye sistemy monitoringa i rascheta metrik dlya effektivnogo ispol'zovaniya resursov centrov obrabotki dannyx*. [Designing a monitoring and metrics system for efficient use of data center resources]. Sovremennyye tekhnologii v teorii i praktike programmirovaniya: Sbornik materialov konferencii [Modern technologies in programming theory and practice: Conference proceedings]. Sankt-Peterburg, 26 April, 2022. St-Peterburg. Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Sankt-Peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo Publ., 2022, pp. 194-197 (in Russian).

4. Belyaev I. A. *Vysokoproizvoditel'nyj vektornyj multiformatnyj umnozhitel' dlya processorov cifrovoj obrabotki signalov* [High-performance vector multiformat multiplier for digital signal processors]. *Voprosy radioelektroniki*. 2019, no. 8, pp. 31-36 (in Russian). DOI 10.21778/2218-5453-2019-8-31-36.
5. Zaytseva K. A., Puzikova V. V., Sokolov A. D. On Problems in OpenBLAS Library Usage in Productized Code on RISC-V. *Trudy ISP RAN*, 2025, v. 35, is. 5, pp. 91–106 (In Russian).
6. Adit N., Sampson A. Performance Left on the Table: An Evaluation of Compiler Autovectorization for RISC-V. *IEEE Micro*, 2022, v. 42, is. 5. DOI: 10.1109/MM.2022.3184867.
7. Volokitin V. D., Kozinov E. A., Kustikova V. D., Liniov A. V., Meyerov I. B. Case Study for Running Memory-Bound Kernels on RISC-V CPUs. *Parallel Computing Technologies. PaCT 2023. Lecture Notes in Computer Science*, 2023, v. 14098, pp. 51-65 (in Russian).
8. Jing G. F., Ye P. H., Tao Q. M. Evaluation of Compilers' Capability of Automatic Vectorization Based on Source Code Analysis. *Scientific Programming*, 2021, v. 2021, 15 p. DOI: 10.1155/2021/3264625.
9. Chen C. et al. Xuantie-910: A commercial multi-core 12-stage pipeline out-of-order 64-bit high performance RISC-V processor with vector extension: Industrial product. *2020 ACM/IEEE 47th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. IEEE, 2020, pp. 52-64.
10. Perotti M., Cavalcante M., Wistoff N., Andri R., Cavigelli L., Benini L. A "New Ara" for Vector Computing: An Open Source Highly Efficient RISC-V V 1.0 Vector Processor Design. *2022 IEEE 33rd International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ASAP54787.2022.00017.
11. Patsidis K., Nicopoulos C., Ch. Sirakoulis G., Dimitrakopoulos G. RISC-V2: A Scalable RISC-V Vector Processor. *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9181071.
12. Schlägl M., Stockinger M., Große D. A RISC-V "V" VP: Unlocking Vector Processing for Evaluation at the System Level. *2024 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE, 2024. DOI: 10.23919/DATEx58400.2024.10546838.
13. Lee J.K.L. et al. Test-driving RISC-V Vector hardware for HPC // arXiv preprint arXiv:2304.10319. 2023.
14. Golubev D. E., Shagalova P. A. *Razrabotka rasshireniya clang-tidy dlya avtomaticheskogo preobrazovaniya vektornykh optimizatsii biblioteki OpenCV* [Development of a clang-tidy extension for automatic transformation of OpenCV library vector optimizations]. *10-ya nauchnaya konferentsiya «EKB i Elektronnye Moduli»: Sbornik tezisov* [10th Scientific Conference "ECB and Electronic Modules": Abstracts]. 2024, pp. 1474-1475 (in Russian).
15. Sheremet S. S., Magyarov G. S., Nikiforov I. V., Stepina N. O. Backup recovery system for software infrastructure on an experimental stand with RISC-V. *Modern technologies in theory and practice of programming. Proceedings of the scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*, St. Petersburg, POLYTECH PRESS, 2025, pp. 357-359 (in Russian).

**Статья поступила 3 октября 2025 г.**

### **Информация об авторах**

**Шемаев Кирилл Евгеньевич** – программист высшей школы программной инженерии института компьютерных наук и кибербезопасности. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Тел.: +79643689420. E-mail: shemaev.kirill@yandex.ru.

**Реббев Павел Александрович** – лаборант учебной лаборатории «Технологии программирования Yadro-Политех» института компьютерных наук и кибербезопасности. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Тел.: +79110142008. E-mail: pavreb1235321@gmail.com.

**Степина Надежда Олеговна** – ассистент, аспирант высшей школы программной инженерии, института компьютерных наук и кибербезопасности. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Тел.: +79312765622. E-mail: gubenko\_no@spbstu.ru. SPIN: 7752-0931.

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 лит. Б.

## Vectorization of methods for solving ordinary differential equations on the risc-v processor architecture

K. E. Shemaev, P. A. Rebdev, N. O. Stepina

**Annotation.** The RISC-V architecture is an open and extensible processor architecture that is actively gaining popularity in various areas of high-performance computing due to its flexibility and performance. The relevance of the research is due to the growing spread of this platform and the need to develop optimized computational algorithms for it. One of the key technologies used to improve data processing efficiency is vectorization, which allows performing a single operation on multiple data simultaneously. The purpose of this work is to explore the possibilities and evaluate the effectiveness of using vector extensions to optimize mathematical algorithms on this architecture. The research focuses on the adaptation of numerical methods for solving ordinary differential equations, which are critically important for scientific modeling and engineering calculations. The scientific novelty of the research lies in the systematic study and adaptation of these methods to the RISC-V processor architecture using vector extensions, which had not previously been the subject of extensive analysis. In the course of the work, the basic algorithms at the source code level were modified using intrinsics and assembler inserts, and various techniques for vectorizing loops and operations on arrays were used. To evaluate the results, an experimental performance study was conducted on a simulator or a hardware platform that supports vector extensions. The results showed that vector versions of the algorithms demonstrate statistically significant performance gains ranging from 20% to 70% compared to classical scalar implementations, depending on the type of task and the size of the data. The practical significance of the work is confirmed by the possibility of direct application of the developed optimized algorithms in various fields of high-performance computing. These include machine learning tasks, scientific simulations, signal processing, and other areas that require intensive processing of large amounts of data. The results and techniques obtained can be used for further development and creation of specialized libraries of numerical methods focused on supporting the RISC-V processor architecture, facilitating its integration into high-tech computing systems.

**Keywords:** vectorization, vector extensions, high performance computing, ordinary differential equations, algorithm optimization, vectorization, performance, RISC-V processor architecture, numerical methods.

### Information about the authors

*Kirill Evgenievich Shemaev* – programmer, Graduate School of Software Engineering, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Tel.: +79643689420. E-mail: shemaev.kirill@yandex.ru.

*Pavel Alexandrovich Rebdev* – laboratory assistant, Yadro-Polytech Programming Technologies Training Laboratory, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Tel.: +79110142008. E-mail: pavreb1235321@gmail.com.

*Nadezhda Olegovna Stepina* – assistant, postgraduate student, Graduate School of Software Engineering, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Tel.: +79312765622. E-mail: gubenko\_no@spbstu.ru. SPIN: 7752–0931.

Address: Russia, 195251, Saint-Petersburg, Politehnicheskaya str., 29 letter B.

### Для цитирования:

Шемаев К. Е., Ребдев П. А., Степина Н. О. Векторизация методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений на процессорной архитектуре RISC-V // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 41-50. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-41-50.

### Reference for citation:

Shemaev K. E., Rebdev P. A., Stepina N. O. Vectorization of methods for solving ordinary differential equations on the risc-v processor architecture. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 41-50 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-41-50.

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

УДК 621.394.343

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-51-62

**Повышение эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом**

Одоевский С. М., Зизевский В. А., Симонова К. О.

**Аннотация.** Эффективность функционирования мультисервисной транспортной сети связи существенно зависит от согласованности распределения поступающего мультимедийного трафика с распределением доступных канальных ресурсов. Долговременное выделение фиксированных канальных ресурсов для отдельных типов трафика (потоков данных) в расчете на их максимальную (пиковую) скорость передачи приводит к неэффективному расходованию сетевых ресурсов и ограничивает возможности динамической балансировки трафика. Целью работы является разработка модели и методики оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом мультисервисной транспортной сети связи с целью повышения эффективности функционирования указанной сети по трем взаимосвязанным обобщенным показателям эффективности: минимальной достижимой задержки, максимальной допустимой интенсивности входного трафика и минимальной необходимой пропускной способности. Методы исследования: имитационное моделирование сетевых механизмов обработки самоподобного мультимедийного трафика в устройствах коммутации мультисервисной сети, методы аппроксимации статистических зависимостей показателей качества обслуживания самоподобного трафика от его параметров, аналитическое моделирование механизмов распределения трафика по нескольким маршрутам в различных направлениях связи при использовании общих канальных ресурсов, методы решения оптимизационных задач с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями управляемых параметров. Новизна: использовано новое математическое выражение для аппроксимации статистических зависимостей средней задержки от контролируемых параметров самоподобного трафика и управляемых параметров распределения потоков данных и канального ресурса, что позволило упростить решение задачи оптимизации указанных распределений для всей сети путем сведения её к итерационному решению отдельных задач с выпуклыми целевыми функциями известными методами для отдельных участков сети. Результаты: получены аналитические зависимости средней задержки (показателя качества обслуживания трафика) от нагрузки при использовании механизмов распределения трафика по нескольким маршрутам в различных направлениях связи при использовании общих канальных ресурсов. Практическая значимость: полученные результаты исследований могут быть использованы для повышения эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет предлагаемой оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом.

**Ключевые слова:** балансировка мультимедийного трафика, мультисервисная транспортная сеть связи, распределение канального ресурса, эффективность функционирования сети связи.

**Введение**

Современные пакетные транспортные сети связи способны, используя общую канальную инфраструктуру, передавать разнородный мультимедийный трафик (ММТ) – голос, видео, данные и другие сервисы – с разной и изменяющейся текущей скоростью передачи, что позволяет называть такие сети мультисервисными транспортными сетями связи (МТСС), образующими основу сетей следующего поколения NGN (*Next Generation Network*) [1]. Отличительной особенностью мультимедийного трафика является группирование пакетов или, иначе говоря, пачечность трафика, количественно характеризуемая всплесками интенсивности пакетов, что является одним из проявлений свойства самоподобия [2], которое присуще данному типу трафика, особенно при наличии в его составе видеотрафика [3]. Как следствие, прежний подход, характерный для первичных сетей, к долговременному выделению фиксированных

канальных ресурсов (КР) для отдельных типов трафика (потоков данных – ПД) в расчете на их максимальную (пиковую) скорость передачи приводит в МТСС к нерациональному (неэффективному) расходованию сетевых ресурсов и ограничивает возможности динамической балансировки трафика при пульсациях его интенсивности.

Качество обслуживания различных типов трафика внутри МТСС сложно оценивать по конечным субъективным показателям качества телекоммуникационных услуг, как например, услуг видеосвязи [3], поэтому для этой цели используются традиционные для систем массового обслуживания (СМО) показатели задержек и потерь пакетов [4,5], а также доступности виртуальных каналов с необходимой пропускной способностью [6]. На отдельных участках МТСС трафик отдельных направлений связи, особенно в сетях специального назначения, может передаваться в обезличенном виде, обрабатываясь в устройствах коммутации пакетов в общем потоке мультимедийных данных в интересах множества различных направлений связи. При этом возникает вопрос, насколько эффективной является обработка ММТ в устройствах коммутации МТСС при использовании тех или иных сетевых механизмов, и какая обработка будет наиболее эффективной с точки зрения эффективности функционирования МТСС в целом?

В качестве обобщенного показателя эффективности функционирования МТСС может использоваться некоторая свертка частных показателей качества обслуживания трафика в отдельных направлениях связи, в частности показателей задержек и/или потерь пакетов. При заданной интенсивности пакетов и пропускной способности используемых маршрутов можно считать, чем меньше задержки и/или потери пакетов, тем лучше и, соответственно, тем эффективнее функционирует МТСС. Достоинством такой оценки эффективности является естественный характер причинно-следственных связей (условия функционирования → сетевые механизмы → качество обслуживания = показатель эффективности), удобный как для расчетов по прямым формулам, вытекающим из соответствующих моделей СМО, так и для контрольных измерений в реальной сети. Удобным в вычислительном смысле в данном случае является и решение оптимизационных задач поиска наилучших сетевых механизмов (наилучших значений управляемых параметров) по критерию минимума выбранного обобщенного показателя задержек и/или потерь пакетов.

При заданных требованиях к показателям задержек и/или потерь пакетов, что обычно и бывает на практике, сетевые механизмы в МТСС нацеливаются на выполнение этих требований в изменяющихся условиях функционирования (воздействия дестабилизирующих факторов). При этом в качестве обобщенного показателя эффективности целесообразно использовать некоторую контролируемую меру условий функционирования МТСС, характеризующую их максимальное допустимое мешающее или минимальное необходимое помогающее воздействие, при котором требования к качеству обслуживания трафика еще выполняются, если они выполнялись до оптимизации, или уже выполняются, если они не выполнялись. В первом случае улучшение показателя эффективности характеризует максимальный запас устойчивости к возможным изменениям условий функционирования (в виде максимального запаса на всплеск трафика), а во втором – минимально необходимую компенсацию воздействия дестабилизирующих факторов (в виде минимального необходимого дополнительного канального ресурса).

С точки зрения эффективности функционирования МТСС в качестве меры мешающего воздействия условий функционирования можно рассматривать суммарную интенсивность общего ММТ, а в качестве меры помогающего воздействия – суммарную пропускную способность доступных маршрутов. При выполнении заданных требований к качеству обслуживания ММТ можно считать, чем выше максимальная допустимая суммарная интенсивность ММТ (при заданной пропускной способности доступных маршрутов) или чем ниже минимальная необходимая пропускная способность доступных маршрутов (при заданной интенсивности ММТ), тем эффективнее функционирует МТСС. Достоинством такой оценки эффективности является возможность её использования в качестве контролируемой меры допустимых изменений условий функционирования, на которые могут влиять соответствующие сетевые механизмы ограничения нагрузки и резервирования канальных ресурсов. Для расчета

указанных показателей эффективности необходимо решать обратные оптимизационные задачи по отношению к причинно-следственным связям и прямым формулам, вытекающим из соответствующих моделей СМО [7].

В настоящей статье рассматриваются модель и методика оптимизации балансировки ММТ совместно с управлением КР МТСС с целью повышения эффективности функционирования указанной сети по указанным взаимосвязанным обобщенным показателям эффективности путем решения прямой задачи оптимизации совместного распределения ПД и КР по критерию минимума обобщенного показателя задержки с пересчетом к двум обратным обобщенным показателям максимально допустимой суммарной интенсивности входного трафика и минимального достаточного суммарного канального ресурса МТСС.

## **1. Модель балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом мультисервисной транспортной сети связи**

Разработанную математическую модель балансировки мультимедийного трафика (потоков данных – ПД) совместно с управлением пропускной способностью (канальным ресурсом – КР) мультисервисной транспортной сети связи можно охарактеризовать совокупностью следующих заданных (контролируемых) параметров структуры сети, входного трафика, управляемых параметров распределения КР и ПД, а также показателей качества обслуживания:

$A = \{a_i\}$  – узловая основа МТСС,  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – количество узлов;

$B = \{b_r\}$  – сетка линий (ребер) МТСС, характеризующих доступный сетевой канальный ресурс  $C = \{c_r\}$ , с заданной (контролируемой) пропускной способностью (канальным ресурсом – КР) каждой линии  $c_r$ ,  $r = \overline{1, R}$ ,  $R$  – количество линий;

$\Lambda = \{\lambda_k\}$  – заданные (контролируемые) входные потоки данных (мультимедийный трафик) между корреспондирующими парами узлов (КПУ) (соответствующих заданным направлениям связи), в единицах интенсивности транспортных протокольных блоков данных (ПБД) (кадров или пакетов) объемом  $V$  бит,  $k = \overline{1, K}$ ;

$Z = (Z_{\text{кр}}, Z_{\text{пд}})$  – управляемые параметры распределения КР и ПД,  $Z_{\text{кр}} = \{\gamma_{rl}\}$  – доли КР линий  $r = \overline{1, R}$ , выделяемых для образования путей  $l = \overline{1, L}$ ,  $Z_{\text{пд}} = \{\alpha_{km}\}$  – доли ПД между КПУ  $k = \overline{1, K}$ , выделяемые для передачи ПД по маршрутам  $m = \overline{1, M}$ ;

$Q = (\{\tau_k, p_{\text{пот},k}, p_{\text{св},k}\}, T)$  – показатели качества обслуживания ПД между КПУ  $= \overline{1, K}$ ,  $\tau_k$  – среднее время задержки ПБД,  $p_{\text{пот},k}$  – вероятность потери ПБД (из-за перегрузок или ошибок в канале),  $p_{\text{св},k}$  – вероятность своевременной доставки ПБД за время, не превышающее максимальную допустимую задержку  $\tau_{\text{доп},k}$ ,  $T$  – обобщенный показатель сетевой задержки ПБД между всеми КПУ.

Разработанная математическая модель МТСС отражает согласованное двухуровневое управление канальным ресурсом на нижнем уровне и потоками данных на верхнем уровне, впервые предложенное в [8].

На первом (нижнем) уровне в соответствии с управляемыми параметрами  $Z_{\text{кр}} = \{\gamma_{rl}\}$  из КР ребер (линий) сети  $C = \{c_r\}$ ,  $r = \overline{1, R}$ , выделяются цифровые каналы (ЦК) с пропускной способностью  $G = \{g_{rl}\}$ ,  $g_{rl} = c_r \cdot \gamma_{rl}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , и формируются прямые (односкачковые, проходящие через одно ребро/линию) или транзитные (многоскакковые, проходящие через цепочку ребер/линий с промежуточной кроссовой коммутацией на транзитных узлах) пути  $\pi_l = \{b_r | r \in R_l\}$ , соединяющие пары узлов  $A_l = \{a_i, a_j | i, j \in N_l\}$  с кросс-мультплексорами/коммутаторами (на нижнем уровне) и транзитно-оконечными маршрутизаторами (на верхнем уровне);

На втором (верхнем) уровне в соответствии с управляемыми параметрами  $Z_{\text{пд}} = \{\alpha_{km}\}$  из входных ПД  $\Lambda = \{\lambda_k\}$  между КПУ  $A_k = \{a_i, a_j | i, j \in N_k\}$ , выделяются внутрисетевые потоки данных с интенсивностью  $D = \{d_{km}\}$ ,  $d_{km} = \lambda_k \cdot \alpha_{km}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , и направляются по прямым (односкачковым, проходящим по одному пути/ЦК) или транзитным (многоскакковым, проходящим через цепочку путей/ЦК с промежуточной пакетной коммутацией на транзитных узлах с маршрутизаторами)

маршрутам  $\Pi_m = \{\pi_l | l \in L_m\}$ , соединяющим КПУ  $A_k = A_m = \{a_i, a_j | i, j \in N_m = N_k\}$  с мультиплексорами /коммутаторами (на нижнем уровне) и оконечными маршрутизаторами (на верхнем уровне).

Допустимые значения управляемых долей ПД  $\{\alpha_{km}\}$  и КР  $\{\gamma_{rl}\}$  и должны удовлетворять условиям:

$$\sum_{m \in M_k} \alpha_{km} = 1, \forall k = \overline{1, K}, \quad \sum_{l \in L_r} \gamma_{rl} = 1, \forall r = \overline{1, R}, \quad (1)$$

$$0 \leq \alpha_{km} \leq 1, \forall k = \overline{1, K}, \forall m = \overline{1, M}, \quad 0 \leq \gamma_{rl} \leq 1, \forall r = \overline{1, R}, \forall l = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где  $M_k$  – множество маршрутов между  $k$ -й КПУ,  $L_r$  – множество путей в ребре  $r$ .

Каждый отдельный маршрут  $m$  используется только одной КПУ  $km$ , но он может совпадать с другими маршрутами  $m \in M_l$  на отдельных участках с одинаковыми путями  $l$ . При этом интенсивность ПД  $d_l$  в ЦК пути  $l$  зависит от интенсивности входных ПД  $\{\lambda_k\}$  между КПУ  $k \in \{km\}$  и долей ПД  $\{\alpha_{km}\}$ , направляемых по маршрутам  $m \in M_l$ , проходящим по ЦК пути  $l$ :

$$d_l = \sum_{m \in M_l} \lambda_{km} \cdot \alpha_{km}.$$

На разных участках одного маршрута  $\Pi_m$  могут использоваться пути  $\pi_l$  с разными пропускными способностями ЦК  $\{g_l\}$ . В то же время на разных участках одного пути  $\pi_l$  должны использоваться ребра  $\{b_r | r \in R_l\}$ , выделяющие для данного пути ЦК  $\{g_{rl}\}$  с одинаковой пропускной способностью. В рамках формализованной модели, допускающей произвольные сочетания долей КР  $\{\gamma_{rl}\}$  в пределах ограничений (1) и (2) условию выравнивания пропускной способности участков одного пути  $\pi_l$ , проходящим по разным ребрам  $\{b_r | r \in R_l\}$ , соответствует следующее выражение, определяющее пропускную способность пути  $g_l$ :

$$g_l = \min_{r \in R_l} g_{rl} = \min_{r \in R_l} (C_r \cdot \gamma_{rl}).$$

Для количественной оценки конкретных вариантов путей и маршрутов, а также распределемых между ними долей КР и ПД по показателям  $Q = (\{\tau_k, p_{\text{пот},k}, p_{\text{св},k}\}, T)$  служат соответствующие математические выражения, являющиеся моделями зависимостей указанных показателей от рассмотренных выше управляемых параметров распределения КР и ПД, а также контролируемых параметров входных ПД и параметров доступных сетевых КР.

В качестве основного частного показателя качества обслуживания ПД между КПУ МТСС  $k = \overline{1, K}$ , в модели выступает средняя задержка  $\tau_k$  доставки транспортных ПБД (пакетов/кадров), от которой зависят другие два показателя  $p_{\text{пот},k}$  – вероятность потери пакетов и  $p_{\text{св},k}$  – вероятность своевременной доставки.

При использовании между КПУ  $k$  нескольких маршрутов  $|M_k| > 1$  с разделением ПД  $\lambda_k$  на доли  $\{\alpha_{km}\}$ ,  $m \in M_k$ , общая задержка  $\tau_k$  будет определяться задержками в каждом маршруте  $\tau_{km}$  и способом разделения/объединения долей потоков. Обычно в пакетных сетях подразумевается статистическое разделение/объединение долей потоков, при котором общая задержка  $\tau_k$  вычисляется как средневзвешенная задержка в каждом маршруте  $\tau_m$  с весами, соответствующими долям потоков  $\alpha_{km}$  [9-11]:

$$\tau_k = \sum_{m \in M_k} \tau_m \cdot \alpha_{km}. \quad (3)$$

Однако в рассматриваемой транспортной сети с двухуровневой коммутацией возможны и другие способы разделения/объединения долей потоков, согласованные с разделением долей КР, причем не только в концевых коммутационных устройствах, но и внутри сети между промежуточными коммутационными устройствами.

Отличительной особенностью устройств пакетной коммутации (в отличие от кроссовой) является «приостановка» коммутируемых пакетов на время их обработки в коммутаторе (маршрутизаторе) перед дальнейшей передачей. Эта особенность позволяет вычислять общую задержку  $\tau_m$  передачи ПБД по маршруту  $m$  как сумму задержек  $\tau_l$ ,  $l \in L_m$ , между соседними устройствами пакетной коммутации, количество которых соответствует количеству путей  $|L_m|$  на маршруте  $m$ :

$$\tau_m = \sum_{l \in L_m} \tau_l.$$

Задержка передачи ПБД  $\tau_l$  по ЦК пути  $l$  определяется суммой четырех слагаемых:

$$\tau_l = \tau_{l,\text{расп}} + \tau_{l,\text{ком}} + \tau_{l,\text{кан}} + \tau_{l,\text{ож}}. \quad (4)$$

где  $\tau_{l,\text{расп}}$  – задержка распространения сигнала,  $\tau_{l,\text{ком}}$  – задержка коммутации,  $\tau_{l,\text{кан}}$  – задержка в канале передачи,  $\tau_{l,\text{ож}}$  – задержка из-за ожидания в очереди на передачу.

Задержка распространения сигнала  $\tau_{l,\text{расп}}$  зависит в основном от физической длины пути  $R_{l,\text{расп}}$  и от скорости  $C_{l,\text{ЭМВ}}$  распространения электромагнитных волн (ЭМВ) по используемой физической среде передачи:  $\tau_{l,\text{расп}} = R_{l,\text{расп}} / C_{l,\text{ЭМВ}}$ .

Задержка коммутации  $\tau_{l,\text{ком}}$  определяется производительностью устройства коммутации  $S_l$ , приведенной к входу ЦК рассматриваемого пути  $l$ . Если производительность  $S_l$  задана в пак/с с размером пакета, соответствующим размеру транспортного ПБД, то задержка коммутации будет равна  $\tau_{l,\text{ком}} = 1/S_l$ .

Задержка в канале передачи  $\tau_{l,\text{кан}}$  определяется объемом (размером)  $V$  передаваемого ПБД (кадра, пакета) и скоростью передачи  $g_l$  в ЦК пути  $l$ :  $\tau_{l,\text{кан}} = V/g_l$ .

Задержка из-за ожидания в очереди на передачу  $\tau_{l,\text{ож}}$  существенно зависит от соотношения интенсивности ПБД  $\lambda_l$ , поступающих на вход ЦК пути  $l$ , и интенсивности обслуживания ПБД в данном ЦК  $\mu_l$ , равной обратной величине задержки в канале передачи  $\tau_{l,\text{кан}}$  и прямо пропорциональной скорости передачи (канальному ресурсу)  $g_l$  в ЦК пути  $l$ :  $\mu_l = 1/\tau_{l,\text{кан}} = g_l/V$ . Отношение интенсивности ПБД  $\lambda_l$ , на входе ЦК к интенсивности обслуживания ПБД в ЦК  $\mu_l$  принято называть нагрузкой на данный ЦК  $\rho_l = \lambda_l/\mu_l$ . Из-за случайности моментов прихода очередных ПБД время ожидания в очереди на передачу является случайной величиной, из-за чего в расчетах обычно используют различные вероятностные и усредненные характеристики указанного времени [4,5,12].

В случае пренебрежимо малой величины первых двух слагаемых в (4) используется упрощенная формула расчета средней задержки  $\tau_{l,\text{кан}} = \tau_{l,\text{ож}}$  в пути  $l$ , которая зависит от интенсивности направляемого в него трафика  $\lambda_l$ , влияющего на время ожидания в очереди  $\tau_{l,\text{ож}} = \tau_{l,\text{кан}} \cdot q(\rho_l)$ ,  $\rho_l = \lambda_l/\mu_l$ , на входе каждого пути по-разному в зависимости от статистических характеристик входных потоков, влияющих на относительное время ожидания  $q(\rho_l)$ , и длительностей обслуживания (передачи) отдельных пакетов  $\tau_{l,\text{кан}}$ . Статистическая зависимость относительного среднего времени ожидания  $q(\rho_l)$  от нагрузки  $\rho_l = \lambda_l/\mu_l$  на основании [13] аппроксимируется в модели следующей формулой:

$$q(\rho_l) = \frac{c \cdot (\rho_l - \rho_0)^a}{(1 - \rho_l)^b}, \quad (5)$$

где  $\rho_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры аппроксимации, зависящие от типа и параметров распределений длительности интервалов времени между моментами прихода очередных пакетов  $G_{\text{вх}}$  и длительности их обслуживания  $G_{\text{вых}}$ , используемых в общепринятых обозначениях рассматриваемых моделей узлов коммутации МТСС как одноканальных систем массового обслуживания (СМО) с ожиданием в виде  $G_{\text{вх}}/G_{\text{вых}}/1$ . При этом в качестве основных учитываемых параметров распределений  $G_{\text{вх}}$  и  $G_{\text{вых}}$  выступают значения среднего времени  $\tau_{\text{вх}}$  и  $\tau_{\text{об}}$ , используемые для задания интенсивностей  $\lambda_l = 1/\tau_{\text{вх},l}$ ,  $\mu_l = 1/\tau_{\text{об},l}$  и, соответственно, нагрузки  $\rho_l = \lambda_l/\mu_l$  в формуле (5). В качестве дополнительного параметра распределений  $G_{\text{вх}}$  учитывается параметр Хёрста  $H$ , а в роли различных типов распределений в рассматриваемых моделях СМО, для которых в [13] получены зависимости приведенных параметров аппроксимации от параметра Хёрста  $H$ , в роли  $G_{\text{вх}}$  выступают распределения Вейбулла (*W–Weibull*), Парето (*P–Pareto*), логнормальное распределение (*L–Lognormal*), а в роли  $G_{\text{вх}}$  – экспоненциальное (*M–Markovian*) и детерминированное (*D–Deterministic*) распределения.

Интенсивность пакетов  $\lambda_l$  на входе отдельного пути  $l$  в МТСС зависит от параметров управления (балансировки) ПД  $\{\alpha_{km}\} | m \in M_l$ , а интенсивность обслуживания  $\mu_l$  – от параметров

управления КР  $\{\gamma_{rl}\}$   $|r \in R_l$ . При этом в случае возникновения перегрузки, когда по причине изменений внешних ПД  $\Lambda$  или сетевых КР  $C$  на некотором пути  $l$  оказывается  $\lambda \approx \mu_l$  и  $\tau_l \rightarrow \infty$ , можно снизить задержку до приемлемой величины или путем снижения интенсивности ПД на входе данного пути, или путем увеличения КР данного пути. Тот же результат можно получить и при некоторых других сочетаниях управляемых параметров ПД и КР. Наилучший вариант зависит от общесетевых критериев и дополнительных ограничений.

В качестве общесетевого критерия в модели используется обобщенный показатель среднесетевой задержки  $T$ , выступающий в роли основного обобщенного показателя эффективности функционирования МТСС и критерия эффективности при сравнении и оптимизации различных распределений (вариантов балансировки) ПД и КР.

Исходными данными для расчета обобщенного показателя  $T$  выступают результаты расчетов средней задержки  $\{\tau_k\}$  (3) во всех информационных направлениях между всеми КПУ  $k = \overline{1, K}$ . Другие показатели своевременности и достоверности при расчете обобщенного показателя  $T$  в явном виде не учитываются, поскольку все они косвенно с ним связаны монотонной зависимостью и общими исходными данными о входных ПД, сетевых КР и об используемых в сети распределениях ПД и КР. В качестве основного способа свертки частных показателей средних задержек между всеми КПУ  $\{\tau_k\}$  в обобщенный показатель среднесетевой задержки  $T$  предлагается использовать взвешенное усреднение:

$$T = \sum_{k=1}^K \beta_k \cdot \tau_k, \quad 0 \leq \beta_k \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \beta_k = 1, \quad (6)$$

В качестве весовых коэффициентов  $\{\beta_k\}$  формулы (6) могут использоваться коэффициенты, пропорциональные важности (приоритетности) тех или иных КПУ по отношению друг к другу. Такие коэффициенты не являются однозначными и должны назначаться должностным лицом, принимающим решение в системе управления МТСС. В сетях общего пользования с пакетной коммутацией объективной мерой важности отдельных информационных направлений выступают объемы циркулирующей в них информации, пропорциональные интенсивности передаваемых ПД, в роли которых в рассматриваемой модели МТСС выступают интенсивности входных ПД между КПУ  $\Lambda = \{\lambda_k\}$ . При этом

$$\beta_k = \lambda_k / \sum_{k=1}^K \lambda_k.$$

Варианты усредняющей свертки, подобные (6), скрывают разброс задержек между отдельными КПУ. Поэтому в модели предлагается также использовать (для сравнения) нелинейную свертку «на наихудший случай», позволяющую получить гарантируемую сетевую задержку, справедливую для любой отдельной КПУ

$$T = \max_{k=1, K} \tau_k. \quad (7)$$

Выражение (7) по аналогии с выражением (6) может быть дополнено учетом коэффициентов важности и/или нагрузки  $\beta_k$ .

Таким образом, в разработанную математическую модель МТСС с совместной балансировкой ПД и КР входят все параметры и показатели, а также все основные функциональные выражения, описывающие взаимосвязь указанных параметров и показателей, необходимые для анализа возможных вариантов распределения (балансировки) КР и ПД и оценки эффективности функционирования МТСС при различных параметрах входных ПД и сетевых КР, зависящих от внешних дестабилизирующих факторов.

Разработанная модель позволяет выявлять случаи предпочтительного использования тех или иных сочетаний совместной балансировки мультимедийных ПД и КР с целью последующей оптимизации использования сетевых ресурсов и повышения эффективности функционирования МТСС, в частности, с помощью рассмотренной далее методики.

## 2. Методика оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом мультисервисной транспортной сети связи

Задача оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом относится к классу задач оптимизации пропускных способностей и потоков линий связи на телекоммуникационной сети, в которой переменными (управляемыми) параметрами являются как пропускные способности линий связи, так и потоки в них [14]. Данную задачу в [14] предлагается разбить на следующие подзадачи:

- определение оптимальных пропускных способностей при заданных потоках;
- определение оптимальных потоков при заданных пропускных способностях;
- совместная оптимизация потоков и пропускных способностей на сети связи.

Впервые задачу определения пропускных способностей каналов на сети связи детально исследовал Клейнрок [12]. При этом для получения точных аналитических результатов он прибегнул ко многим упрощениям, в частности, к допущению, что все потоки являются простейшими и все узлы коммутации представляются моделями СМО М/М/1.

Задача оптимального распределения потоков на сети связи может решаться различными методами нелинейного программирования, в частности методом последовательных приближений. Сначала выбирается некоторый допустимый поток, затем он последовательно, используя итерационную процедуру, улучшается, приближаясь к оптимальному. Данный метод носит название «девиации потока», а также называется по фамилиям его авторов методом (алгоритмом) Франк-Вульфа [10, 11].

Указанный метод нелинейного программирования Франк-Вульфа (девиации потока) численно решает задачу оптимизации целевой функции путем малых изменений (девиаций) в путевых потоках и может быть использован как для решения задачи оптимального распределения ПД на уровне коммутации пакетов, так и для оптимизации распределения КР на уровне коммутации каналов. Однако применение метода Франк-Вульфа возможно при условиях, когда целевая функция является выпуклой монотонной функцией при линейных ограничениях [12, 15]. Поэтому его применение для одновременной оптимизации распределений и ПД, и КР не позволит учесть обнаруженный при моделировании выпукло-вогнутый характер целевой функции средневзвешенного времени сетевой задержки [7]. Подобный вывод о том, что задача совместной оптимизации потоков данных и пропускных способностей каналов в отличие от задач оптимизации только потоков или только пропускных способностей имеет большое число локальных оптимумов, отмечается также в [14]. Для решения таких задач в [14] предлагается использовать комбинацию методов оптимизации распределений ПД и КР для получения локально-оптимальных решений задачи, задаваясь каким-либо начальным распределением ПД или КР, и затем из этих решений выбирается лучшее, которое принимается качестве приближения к глобальному оптимуму. Данный эвристический метод решения задачи не гарантирует нахождения глобального оптимума, но дает решения, достаточно близкие к нему.

На основании отмеченных выше особенностей задач совместной оптимизации распределений ПД и КР для оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом мультисервисной транспортной сети связи была разработана методика, которая включает три итерационные последовательности вычислений, из которых первая используется для оптимизации распределения КР при заданном (фиксированном) распределении ПД, вторая – для оптимизации распределения ПД при заданном (фиксированном) распределении КР, а третья с при совместной оптимизации распределений КР и ПД, причем последняя (третья) последовательность включает в качестве отдельных этапов вычислений первые две.

Результаты моделирования процессов передачи ПД в МТСС с разными вариантами последовательно-параллельных путей и маршрутов позволили выделить основные типовые фрагменты сети, обобщающие встречающиеся ситуации передачи трафика в двухуровневой сети с распределением КР на нижнем уровне и распределением ПД на верхнем. Причем обнаруженные

свойства выпукло-вогнутого поведения целевой функции позволили сформировать типовые шаблоны решений оптимизационной задачи, предлагаемой к учету в алгоритме (итерационной последовательности) совместной оптимизации распределений КР и ПД.

Анализ частных оптимальных решений позволил определить последовательность действий для поиска совместного оптимального решения, которое, в зависимости от варианта типового фрагмента сети при передаче ПД может быть получено путем сведения задачи оптимизации распределения КР и ПД к итерационной последовательности оптимизации распределения КР при заданном распределении ПД или распределения ПД при заданном распределении КР или совместной оптимизации распределений КР и ПД путем перебора типовых шаблонов оптимальных решений для типовых фрагментов ПТСС. Для решения типовых задач распределения КР и ПД предлагается использовать известные методы оптимизации распределений КР и ПД (включая отмеченные выше [10-15]) с учетом новой интерпретации целевой функции (6) и (7) с учетом (5) и управляемых параметров (1), (2).

Решение задачи совместной последовательной оптимизации заключается в поиске оптимальных значений  $\{\gamma_{rl}^*\}$  с использованием итерационного алгоритма оптимизации распределения КР при заданных (контролируемых) ПД  $\{\alpha_{km}\}$ . На очередном шаге итераций, приравнивая найденные значения долей КР исходным (заданным) долям  $\{\gamma_{rl}\} = \{\gamma_{rl}^*\}$ , находятся оптимальные значения интенсивностей ПД с использованием итерационного алгоритма оптимизации распределения ПД  $\{\alpha_{km}^*\}$ . Затем процесс поиска решения повторяется заново для обновленных значений  $\alpha_{km}^*$  с целью поиска новых значений долей КР  $\{\gamma_{rl}^{**}\}$  и для полученных новых значений КР  $\{\gamma_{rl}^{**}\}$  с целью поиска новых значений  $\{\alpha_{km}^{**}\}$  по указанным алгоритмам. Итерации распределения долей КР, а затем долей ПД продолжаются до тех пор, пока их значения не перестанут изменяться, т. е. установится состояние равновесия между оптимизируемыми параметрами. Полученные значения долей КР и долей ПД будут оптимальным решением задачи совместной оптимизации для частной задачи совместного поиска управляемых параметров  $\alpha$  и  $\gamma$ . Схема алгоритма, реализующего совместную оптимизацию распределений КР и ПД методом последовательного приближения к оптимальным значениям представлена на рис. 1. Пояснения к основным блокам алгоритма:

В блоках 2, 5, 11.3, 12.3 и 20 выполняется расчет обобщенного показателя задержки в соответствии с формулами (6), (7) и (5) в математической модели балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом МТСС.

В блоках 8 и 9 определяются типовые фрагменты сети с допустимыми сочетаниями маршрутов и путей с учетом дополнительных ограничений и формирование упорядоченного множества шаблонов типовых оптимальных решений  $\{A_i\}_n$  по распределению долей КР и ПД с сокращенным набором невырожденных (не равных 0 или 1) искомых переменных  $\{\alpha\}$  и  $\{\gamma\}$ .

В блоке 11.2 реализуется итерационная последовательность оптимизации распределения КР при заданном распределении ПД в соответствии с очередным шаблоном  $A_i$  или очередным результатом оптимизации распределения (балансировки) ПД.

В блоке 12.2 реализуется итерационная последовательность оптимизации распределения ПД при заданном распределении КР в соответствии с очередным шаблоном  $A_i$  или очередным результатом оптимизации распределения КР.

В блоках 14 и 15 после очередных итераций уточняется решение прямой задачи минимизации обобщенного показателя задержки  $T^*$  при заданных (контролируемых) параметрах пропускной способности  $C_1$  и потоков данных  $\Lambda_1$ , а в блоках 18 и 19 уточняется решение обратных задач определения максимального допустимого входного трафика  $\Lambda_1$  и минимально необходимого канального ресурса  $C_1$  при заданных требованиях к задержке  $T_{\text{тр}}$ .

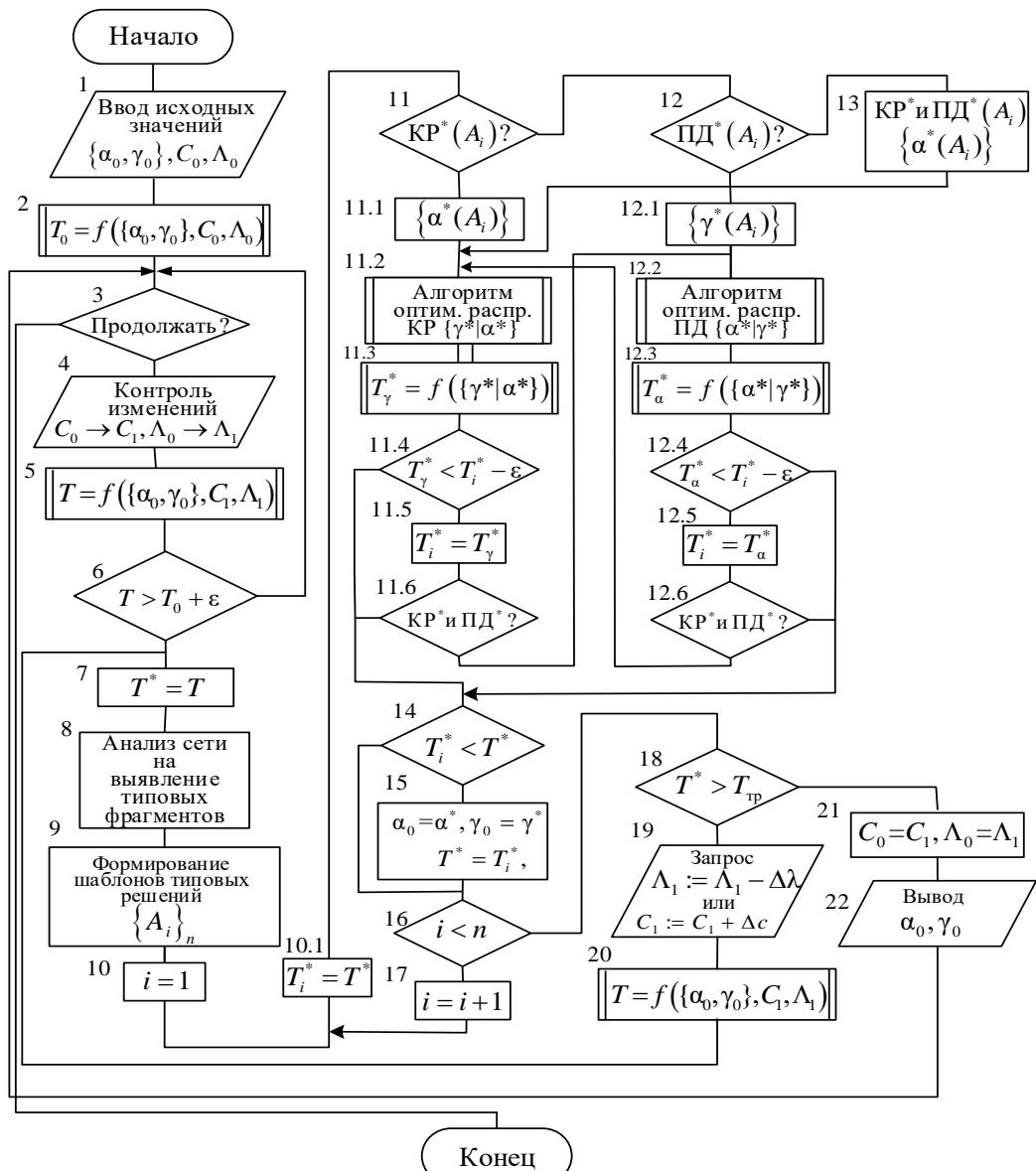


Рис. 1. Схема алгоритма, реализующего методику оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом МТСС

## Выводы

В настоящей статье представлены модель и методика оптимизации балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом мультисервисной транспортной сети связи с целью повышения эффективности функционирования указанной сети по трем взаимосвязанным обобщенным показателям эффективности путем решения прямой задачи оптимизации совместного распределения потоков данных и канального ресурса по критерию минимума обобщенного показателя задержки с пересчетом к двум обратным обобщенным показателям максимально допустимой суммарной интенсивности входного трафика и минимального достаточного суммарного канального ресурса МТСС. Описаны эффективные методы решения указанных оптимизационных задач, учитывающие особенности прямой целевой функции в виде предложенной аппроксимации статистических зависимостей результатов обработки самоподобного мультимедийного трафика.

Дальнейшим развитием проводимых исследований является использование результатов решения задач оптимизации распределения мультимедийного трафика по различным маршрутам совместно с управлением пропускной способностью данных

маршрутов на отдельных небольших участках МТСС для обучения систем поддержки принятия решений с искусственным интеллектом, способных оперативно решать аналогичные задачи большой размерности на больших участках и на сети в целом.

## Литература

1. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации / под ред. Ю.Н. Чернышова. М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
2. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. – 368с.
3. Маколкина М. А., Прокопьев А. В. Зависимость параметра Хёрста от потерь при исследовании видеотрафика // 69-я научно-техническая конференция СПб НТОРЭС имени А. С. Попова: сб. тез. докл. СПб., 2013.
4. Крылов В. В., Самохвалова С. С. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
5. Кучеряый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. М.: Наука и Техника, 2007. 336 с.
6. Степанов С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 868 с.
7. Одоевский С. М., Рафальская М. И., Ясинский С. А., Сарафанников Е. В. Методика повышения эффективности обработки видеотрафика при использовании сетевых механизмов распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам // Информация и Космос, 2023. № 1. С. 6-13.
8. Одоевский С. М., Яровикова О. В. Оптимизация управления распределением трафика на смежных уровнях сетевой архитектуры // Сборник научных статей III МНТК «АПИНО». СПб.: СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2014. – С.323-328.
9. Сычев К. И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи. СПб.: Издательство политехнического университета, 2008. – 272 с.
10. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М: Техносфера, 2003. – 512 с.
11. Лазарев В. Г., Лазарев В. Ю. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
12. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. – 600с.
13. Анищенко Г. И., Зизевский В. А., Одоевский С. М., Рафальская М. И. Оптимизация распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования работы узлов коммутации мультисервисной сети связи в виде систем массового обслуживания // Сборник трудов XI ВНПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – Казань: КГУ, 2023. – С. 663-673.
14. Будко П. А. Управление ресурсами информационно-телекоммуникационных систем. Методы оптимизации. Монография. СПб.: ВАС, 2012. – 512 с.
15. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. / Перевод с англ. Лиханова Н. Б., Михайлова В. А., Федорцова С. П. под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1989. 544 с.

## References

1. Baklanov I. G. NGN: principles of construction and organization. Moscow, Eco-Trends Publ., 2008, 400 p. (in Russian).
2. Shelukhin O. I., Osin A. V., Smolsky S. M. *Samopodobie i fractaly* [Self-similarity and fractals]. Telecommunication applications. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 368 p. (in Russian).
3. Makolkina M. A., Prokopyev A.V. Dependence of the Hirst parameter on losses in the study of video traffic. 69th Scientific and Technical Conference of St. Petersburg Scientific and Technical Conference named after A. S. Popov. dokl. St. Petersburg, 2013 (in Russian).
4. Krylov V. V., Samokhvalova S. S. *Teoriya teletraffica i ee prilozheniya* [Theory of teletraffic and its applications]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005, 288 p. (in Russian).

5. Kucheryavyy E. A. *Upravlenie traktivom i kachestvo obsluzhba v seti Interneta* [Traffic management and quality of service on the Internet]. Moscow, Nauka i Tekhnika Publ., 2007, 336 p. (in Russian).
6. Stepanov S. N. *Teoriya teletraffica: kontseptsii, modeli, prilozheniya* [Theory of teletraffic: concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2015, 868 p. (in Russian).
7. Odoevsky S. M., Rafalskaya M. I., Yasinsky S. A., Sarafnikov E. V. *Metodika povysheniya effektivnosti obrabotki videotraffic pri ispol'zovaniya set'nykh mekhanizm raspredeleniya multimedial'nogo traffici po neskol'nykh routeam* [Methods of improving the efficiency of video traffic processing when using network mechanisms for distributing multimedia traffic along several routes]. *Information and Spase*, 2023, no. 1, pp. 6-13 (in Russian).
8. Odoevsky S.M., Yarovikova O.V. *Optimization of traffic distribution management at adjacent levels of network architecture*. St. Petersburg, Prof. M.A. Bonch-Bruevich Publ., 2014, pp.323-328 (in Russian).
9. Sychev K. I. *Mnogokriterial'noe proektirovanie multiservisnykh svyazi seti* [Multi-criteria design of multi-service communication networks]. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2008. – 272 p. (in Russian).
10. Vishnevsky V. M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh seti* [Theoretical foundations of computer network design]. Moscow, Technosphere Publ., 2003, 512 p. (in Russian).
11. Lazarev V. G., Lazarev V. Y. Dynamic control of information flows in communication networks. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983, 216 p. (in Russian).
12. Kleinrok L. *Vychislitel'nye sistemy s okryachami* [Computing systems with queues]. Moscow, Mir Publ., 1979, 600 p. (in Russian).
13. Anishchenko G. I., Zizevsky V. A., Odoevsky S. M., Rafal'skaya M. I. Optimization of multimedia traffic distribution on several routes based on approximation of the results of simulation modeling of the work of commutation nodes of a multiservice communication network in the form of queuing systems. Kazan, Kazanckiy gosudarstvenniy universitet Publ., 2023, pp. 663-673 (in Russian).
14. Budko P. A. *Upravlenie resursov informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem* [Management of resources of information and telecommunication systems]. Optimization methods. Monograph. St. Petersburg, VAS Publ., 2012, 512 p. (in Russian).
15. Bertsekas D., Gallagher R. *Seti transformatsii dannykh* [Data transmission networks]. Translated from English by Likhanova N. B., Mikhailova V. A., Fedortsov S. P. edited by Tsybakov B. S. Moscow, Mir Publ., 1989, 544 p. (in Russian).

**Статья поступила 10 декабря 2025 г.**

### **Информация об авторах**

**Одоевский Сергей Михайлович** – Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи им. С. М. Буденного. Область научных интересов: оптимизация технологий построения телекоммуникационных сетей специального назначения. SPIN-код автора 5609-8179, AuthorID 789373.

E-mail: odse2017@mail.ru

**Зизевский Вадим Алексеевич** – Адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи им. С. М. Буденного. Область научных интересов: оптимизация технологий построения телекоммуникационных сетей специального назначения. SPIN-код автора: 6280-5325 E-mail: vaz94vaz94@gmail.com

**Симонова Карина Олеговна** – Адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи им. С. М. Буденного. Область научных интересов: оптимизация технологий построения телекоммуникационных сетей специального назначения SPIN-код автора: 3214-7768E-mail: desire\_8912@bk.ru. Tel.: +7-981-824-09-70

Адрес: Россия, 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

### **Improving the efficiency of the multi-service transport communication network by balancing multimedia traffic together with channel resource management**

S. M. Odoevsky, V. A. Zizevsky, K. O. Simonova

**Annotation.** The efficiency of the functioning of a multi-service transport communication network significantly depends on the consistency of the distribution of incoming multimedia traffic with the distribution of available channel resources. Long-term allocation of fixed channel resources for certain types of traffic (data flows) based on their maximum (peak) transmission speed leads to inefficient use of network resources and limits the possibilities of dynamic traffic balancing. **The purpose of the work** is to develop a model and methodology for optimizing the balancing of multimedia traffic together with the management of the channel resource of the multiservice transport communication network in order to improve the efficiency of the functioning of this network according to three interrelated generalized efficiency indicators: the minimum achievable latency, the maximum permissible intensity of input traffic and the minimum required bandwidth. **Research methods:** simulation modeling of network mechanisms for processing self-similar multimedia traffic in multiservice network switching devices, methods for approximating statistical dependencies of service quality indicators of self-similar traffic on its parameters, analytical modeling of traffic distribution mechanisms along several routes in different directions of communication using common channel resources, methods for solving optimization problems with nonlinear objective function and linear constraints of controlled parameters. **Novelty:** a new mathematical expression is used to approximate the statistical dependencies of the average delay on the controlled parameters of self-similar traffic and the controlled parameters of the distribution of data flows and channel resource, which made it possible to simplify the solution of the problem of optimizing these distributions for the entire network by reducing it to the iterative solution of individual problems with convex objective functions by known methods for individual network sections. **Results:** analytical dependencies of average latency (traffic quality of service) on load when using mechanisms for distributing traffic over several routes in different directions of communication using shared channel resources were obtained. **Practical significance:** the results of the research can be used to improve the efficiency of the functioning of a multiservice transport communication network due to the proposed optimization of balancing multimedia traffic together with the management of the channel resource.

**Keywords:** balancing of multimedia traffic, multiservice transport communication network, distribution of channel resource, efficiency of communication network functioning.

### Information about the authors

*Sergey Mikhailovich Odoevsky* – Professor, doctor of technical sciences, professor of the department of communication networks and switching systems. Military Academy of communications named after S. M. Budyonny. Research interests: optimization of technologies for building special-purpose telecommunication networks E-mail: odse2017@mail.ru

*Vadim Alekseyevich Zizevsky* – Adjunct of the department of communication networks and switching systems. Military Academy of communications named after S. M. Budyonny. Research interests: optimization of technologies for building special-purpose telecommunication networks. E-mail: vaz94vaz94@gmail.com

*Karina Olegovna Simonova* – Adjunct of the department of communication networks and switching systems. Military Academy of communications named after S. M. Budyonny. Research interests: optimization of technologies for building special-purpose telecommunication networks. E-mail: desire\_8912@bk.ru. Tel.: +7-981-824-09-70. Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.

#### Для цитирования:

Одоевский С. М., Зизевский В. А., Симонова К. О. Повышение эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет балансировки мультимедийного трафика совместно с управлением канальным ресурсом // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 51-62. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-51-62.

#### For citation:

Odoevsky S. M., Zizevsky V. A., Simonova K. O. Improving the efficiency of the multi-service transport communication network by balancing multimedia traffic together with channel resource management. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 51-62 (in Russian). DOI:10.24412/2782-2141-2025-4-51-62.

**ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.376.9, 004.942, 519.876.5

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-63-73

**Выбор системы помехоустойчивого кодирования  
для сверхширокополосных каналов радиосвязи**

Путилин А. Н., Шаптала В. С.

**Аннотация:** Построение эффективной системы связи невозможно без использования современных методов помехоустойчивого кодирования, которые позволяют повысить надёжность системы синхронизации и помехоустойчивость информационного сигнала. Сформулированы требования к кодеру в сверхширокополосном канале. Проведено обоснование выбора типа кодера. Рассмотрены принципы формирования и декодирования многоуровневых квазициклических кодов с малой плотностью проверок на четность. Описана схема формирования, искажения и приема дискретных сообщений в сверхширокополосном канале. Проведено моделирование процесса передачи потока данных по рассмотренной схеме. Предложена аппаратная платформа для реализации кодера. Получены сравнительные характеристики помехоустойчивости предлагаемого кодера от параметров системы формирования и приема данных, позволяющие выполнить оптимизацию этих параметров. **Ставится задача** выбора помехоустойчивого кода для сверхширокополосного высокоскоростного модема. Целью работы является создание модели передающей и приёмной части модема без системы синхронизации. При моделировании **использовались методы** цифровой обработки сигналов и теории связи. **Новизна решения** состоит в достижении высоких скоростей декодирования на выбранной аппаратной платформе. К **результатам** работы следует отнести программную реализацию сверхширокополосной радиолинии в виде объектно-ориентированного кода для вычислительной среды технических расчетов MATLAB и его реализацию для выбранной аппаратной платформы. **Практическая значимость** работы заключается в том, что определены предельно достижимые реализуемые скорости декодирования. Результаты работы могут использоваться при разработке аппаратуры передачи данных для радиосвязи.

**Ключевые слова:** квазициклический код, код с малой плотностью проверок на четность, модуляция, помехоустойчивость, сверхширокополосный.

**Сравнение различных видов кодирования**

В соответствии с принятой на настоящий момент времени классификацией сверхширокополосным каналом радиосвязи называют канал, занимающий полосу частот от 500 МГц и более. В настоящее время в системах сотовой связи 5G, стандартах IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac, DVB-T2, DVB-S2 реализуются скорости передачи до 2,4 Гб/с. Экспериментально получены более высокие скорости.

Реализация сверхширокополосного канала обеспечивает следующие преимущества:

- высокие скорости передачи данных при обеспечении высоких требований по достоверности доставки сообщений, обеспечивающую возможность реализации дистанционного управления робототехническими комплексами;
- возможность реализации канала множественного доступа, обеспечивающую динамическое перераспределение высокоскоростных потоков данных между станциями сети радиосвязи для поддержания её связности при изменении топологии;
- возможность адаптации базы сигнала и скорости канального кодирования при изменении характеристик шума и помех в канале;
- низкую спектральную плотность сигнала, обеспечивающую возможность вторичного использования частотного диапазона несколькими парами корреспондентов на различных направлениях.

Для реализации модемов в сверхширокополосных каналах пакетной радиосвязи наиболее предпочтительной представляется технология *OFDM*. Сложность её реализации

с увеличением полосы сигнала растет линейно, она позволяет легко реализовать разделение потоков данных от одной станции радиосвязи и каналов передачи данных от различных радиостанций по частоте времени и пространству. Технология широко апробирована в указанных выше группах стандартов. Однако канальное кодирование в сверхширокополосных каналах должно отвечать ряду дополнительных требований:

- большая размерность кодового блока должна быть обеспечена для декорреляции пакетов ошибок;
- реализуемая вычислительная сложность декодера;
- создание расширенной линейки скоростей передачи данных на одной схеме кодирования/декодирования для адаптации к изменению характеристик радиоканала;
- наличие специализированной аппаратной платформы для реализации.

В настоящее время в указанных выше стандартах реализованы длины кодовых блоков от 576 до 64 800 [1]. Как наиболее перспективные используются турбокоды, *LDPC* и полярные коды.

Турбокод состоит из каскада параллельно соединённых систематических (компонентных) кодов. Используются свёрточные турбокоды и блоковые коды-произведения (*Turbo Product Codes, TPC*). Для систем пакетной передачи данных предпочтительны *TPC*. В них используются два различных, независимых блочных кода. При этом блок данных образует матрицу, в которой один код исправляет ошибки в её строках, а второй в столбцах. Размер матрицы определяет область декорреляции ошибок в канале. При не больших размерах матрицы или возможности группирования ошибок по строкам или столбцам необходимо введение в схему перемежителя потока бит, вносящего дополнительную задержку. К недостаткам турбокодов следует отнести:

- относительно высокую сложность декодирования, вызванную необходимостью запоминания в декодере проверочных матриц кодов-произведений и умножения на них входных векторов данных для расчета синдромов;
- избыточность исправляющей способности в хороших каналах вследствие ограниченных возможностей по перестройке каскада кодирования при высокой эффективности кода в плохом канале;
- замедление уменьшения вероятности ошибки при увеличении отношения сигнал/шум в канале – «плато насыщения».

Полярные коды, это линейные корректирующие блочные коды [2], использующие поляризацию канала связи. Для этого он преобразуется в несколько независимых каналов с различными вероятностями ошибки в них. Каналы в высокой вероятностью ошибки «замораживаются» передачей в них заранее известных символов. Каналы с низкой вероятностью ошибки используются для передачи данных. Алгоритм декодирования у полярных кодов имеет субквадратичную сложность  $O(n \log n)$  [3]. Для больших длин кода при декодировании, как правило, используется алгоритм последовательного исключения, однако при небольших длинах кода он не надежен, что требует использования иного алгоритма. Также эффективность работы кода зависит от точности оценки текущего по эффективности, однако реализация линейки скоростей кодов требует вычислителя с большим объемом памяти и достаточно высоким быстродействием. В настоящее время проводятся интенсивные исследования состояния канала. При динамическом изменении характеристик канала декодирование существенно усложняется. Несмотря на то, что полярные коды для рассматриваемой области применения являются лидерами исследования по совершенствованию алгоритмов их декодирования [4].

Класс кодов с малой плотностью проверок на чётность (*LDPC – Low-density parity-check code*) предоставляет возможности для наиболее эффективной коррекции ошибок. Сложность их реализации также  $O(n \log n)$ . Они являются блочными кодами, у которых проверочная матрица включает в себя небольшое число ненулевых элементов (для

двоичного кода – единиц). Далее будем рассматривать двоичные коды. Наиболее удобным описанием её является граф Таннера [1]. Его ребра связывают поступивший в кодер блок данных длины  $k$  с блоком проверочных данных длины  $r$ . На графе Таннера им соответствуют переменные и проверочные узлы (*variable and check nodes*). Каждое ребро соответствует единице в проверочной матрице. Количество ребер, выходящих из переменных узлов, соответствует количеству единиц в соответствующей строке проверочной матрицы, а количество единиц в столбце – количеству ребер, приходящих на проверочный узел. В канал передается кодовое слово длины  $n = k + r$ , содержащее блоки входных и проверочных данных. Скорость кода  $R = k/n$ . Циклом называется путь по графу Таннера, начинающийся и оканчивающийся в одном узле. Длина цикла всегда четное число. Очевидно, что одновременная ошибка в битах кодового слова, соответствующих узлам любого пути, не может быть исправлена кодом. Обхватом графа Таннера называется его цикл минимальной длины. В реальном канале вероятность выпадения в кодовом слове наперед заданного паттерна из 6-ти ошибок считается невысокой, поэтому при конструировании *LDPC* кода достаточным считается обеспечение обхвата длины 6. Проверочные матрицы с охватом 2 не используются. Корректирующая способность кода определяется кодовым расстоянием  $d$  и обхватом графа Таннера.

Для обеспечения максимального обхвата кода при построении проверочной матрицы с заданным  $n$  и  $r$  используются алгоритм с прогрессивным наращиванием края (*progressive edge growth – PEG*). Он обеспечивает максимально возможную помехоустойчивость для заданного кода, однако в проверочной матрице регулярность повторения фрагментов, обеспечивающая снижение сложности декодирования, выражена слабо. На предмет рационального баланса между сложностью декодирования и эффективностью кода на настоящее время исследованы многие классы *LDPC* кодов. Это коды Галлагера, Иванова, Зяблова, пространственно – связанные коды, коды с повторением и накоплением и другие.

Наибольшее применение в международных стандартах получили иерархические квазициклические с многоуровневой перестановкой (*Hierarchical Quasi – Cyclic Layered Permutation – HQC LP*) *LDPC* коды. Они обладают детерминированной структурой на основе нескольких слоев вложенных друг в друга матриц. Повторяемость в этих матрицах исключается циклической перестановкой их столбцов. Это обеспечивает эффективную аппаратную реализацию декодера. Следует пояснить принципы их формирования и декодирования, обеспечивающие их высокую эффективность и гибкость применения [1].

Для уровня 1 выбирается порождающая матрица ядра, определяющая скорость кода через отношение длины её строк и столбцов, соответствующие указанным выше  $n$  и  $r$ , в примере  $R = 3/6$ :

$$H = \begin{vmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} & L_{03} & L_{04} & L_{05} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} \end{vmatrix}.$$

На уровне 2 в каждую ячейку матрицы вписываются матрицы циклического сдвига диагональной матрицы  $L_{ij}$  размерности ( $N \times N$ ), в примере  $N = 4$ :

$$L_{x0} = \begin{vmatrix} W_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_x \end{vmatrix}, \quad L_{x1} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & W_x \\ W_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_x & 0 \end{vmatrix}, \dots,$$

где

$$\begin{vmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$W_0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad W_1 = \begin{vmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 \end{vmatrix}, \dots$$

квадратные перестановочные матрицы размерности  $M \times M$ , в примере  $M = 5$ , подбирающиеся специальным образом для обеспечения максимального обхвата. На уровне 3 в матрица  $W_x$  расширяется базовыми единичными матрицами циклического сдвига размерности  $P \times P$  в которых индекс матрицы определяет количество циклических сдвигов столбцов справа налево в матрице  $I_0$ , в примере  $P = 4$ :

$$I_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Таким образом, измерение параметров  $n$  и  $r$  позволяет выбрать скорость кода и определить его корректирующие свойства через его кодовое расстояние. Параметры  $N$ ,  $R$  и  $P$  по сути – масштабирующие множители. При их изменении порождающая матрица масштабируется кратно, сохраняя свойства кода. Это позволяет получить максимально возможный для используемого вычислителя размер кодового блока так необходимый для сверхширокополосных каналов. Выборочные значения параметров трехуровневого  $HQC LP LDPC$  кода для некоторых телекоммуникационных стандартов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Выборочные значения параметров трехуровневого  $HQC LP LDPC$  кода

<b>LTE    <math>P = 16</math></b>				<b>WLAN    <math>P = 18</math></b>				<b>DVB-S2    <math>P = 27</math></b>			
<i>n</i>	<i>r</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
672	336	7	1	1 944	972	6	3	64 800	21 600	8	50
864	432	9	1	1 296	864	6	2	64 800	32 400	8	50
1 728	864	6	3	1 944	1 296	6	3	64 800	43 200	8	50
2 304	1 152	6	4	1 296	1 080	6	2	64 800	54 000	8	50

Можно заметить, что у кода *LTE* скорость в приведенном примере одинакова и равна 1/2, изменяется длина кодового блока. У *WLAN* меняется от 1/2 до 5/6 при незначительном изменении длины кодового блока. У *DVB-S2* меняется от 1/3 до 5/6 при сохранении длины кодового блока. В Табл. 1 прослеживается повторяемость структуры кода при реализации различных скоростей кодирования и различных длин кодовых блоков. Таким образом квазициклические коды представляют собой гибкий инструмент защиты дискретного канала от ошибок.

Реализация алгоритма декодирования требует использования алгебры умножения матриц. Поскольку проверочная матрица вслед за порождающей будет иметь многоуровневую блочную структуру, то целесообразно использование произведения Хатри-Рао [5]. Это операция умножения матриц, определяемая выражением:

$$A * B = (A_{ij} \circ B_{ij})_{ij},$$

где  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  – блоки с номером  $ij$  матриц  $A$  и  $B$ ;  $(.)_{ij}$  – соответствующий блок результирующей матрицы;  $\circ$  – символ «обычного» произведения Кронекера двух матриц, требующего равенства количества строк и столбцов обеих матриц. Наличие большого количества нулевых и некоторого количества единичных блоков в структуре проверочной матрицы позволяет реализовать простой

конвейер оценки расположения ошибок в поступающем в декодер кодовом блоке. Матричное умножение, базирующееся на построчном произведении Кронекера двух и более матриц с одинаковым количеством строк, называется торцевым произведением матриц. Это транспонированное столбцовое произведение Хатри-Рао. На торцевом произведении также возможна реализация декодирования *LDPC* и полярных кодов, однако для сохранения иерархической структуры кода требуется выполнение дополнительных условий [6]. Такие решения позволяют сократить объем вычислительных затрат при обработке кодовых блоков на приёме, по сравнению с использованием операции кронекеровского умножения.

### Выбор образующей матрицы для *LDPC*

Наиболее приемлемой платформой для реализации модема в сверхширокополосном канале на настоящее время следует считать *Zynq UltraScale+ RF SoC*, производства *AMD*. Платформа не только обеспечивает высокое быстродействие, но также имеет программируемый сопроцессор *SD FEC (Soft Design Forward Error Correction)*, который позволяет программно реализовать высокоскоростной конвейер турбо-, *LDPC* и полярных кодов [7]. Поддерживаются только квазициклические [7] *LDPC*, что связано с упрощением процедуры кодирования и декодирования для описанных выше кодов. Рекомендуется использование *LDPC* кодов из следующих стандартов: *5G New Radio*, *Wi-Fi 802.11ac* [8] и *DOCSIS 3.1*. Стандарт *DOCSIS* подразумевает использование коаксиальных кабельных соединений, а *5G* и *Wi-Fi* рассчитаны на беспроводную передачу данных. Сотовая связь *5G* подразумевает замирания сигнала, которые отсутствуют в сетях *Wi-Fi* и спутниковой связи, поэтому для спутниковой связи был выбран набор кодов из стандарта *Wi-Fi* дополненный расширенным кодом из [9].

Список рассматриваемых *LDPC* кодов представлен в табл. 2, где значения  $n$  равные 640, 1 296, 1 944 и 3 888 взяты из стандарта, а  $n$  равное 15 552 получено циклическим расширением кода 3 888. Самая большая длина кодового слова вызвана необходимостью обеспечить передачу блока данных размером не менее 12 000 бит (стандартная длина MTU 1 500 байт эквивалентна 12 000 бит).

Таблица 2 – Параметры кодов

<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
648	540	0,83	27
648	486	0,75	27
648	432	0,67	27
648	324	0,50	27
1 296	1 080	0,83	54
1 296	972	0,75	54
1 296	864	0,67	54
1 296	648	0,50	54
1 944	1 620	0,83	81
1 944	1 458	0,75	81
1 944	1 296	0,67	81
1 944	972	0,50	81
3 888	3 240	0,83	81
3 888	2 916	0,75	81
3 888	2 592	0,67	81
3 888	1 944	0,50	81
15 552	12 960	0,83	324
15 552	7 776	0,50	324

### Переход от проверочной к образующей матрице

В стандартах указывается только проверочная матрица. Для определения образующей (порождающей, генерирующей) матрице используются следующие отношения. Если проверочная матрица  $H$  состоит из двух матриц  $B$  и  $C$ :

$$H(n-k, n) = [B(n-k, k) \ C(n-k, n-k)],$$

тогда образующая матрица  $H$  будет равна:

$$G(n, k) = \begin{bmatrix} E(k, k) \\ C^{-1}B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(k, k) \\ C \end{bmatrix},$$

где  $E$  – единичная матрица.

В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены матрицы для кода (540, 648) с относительной скоростью  $R=5/6$ , где матрицы  $C$  и  $E$  изображены красным цветом и вычислено количество ненулевых элементов ( $NZ$ ) матриц и их отношение к общему количеству элементов. Формирование кодового блока реализуется как умножение входного вектора данных длины  $k$  на порождающую матрицу.

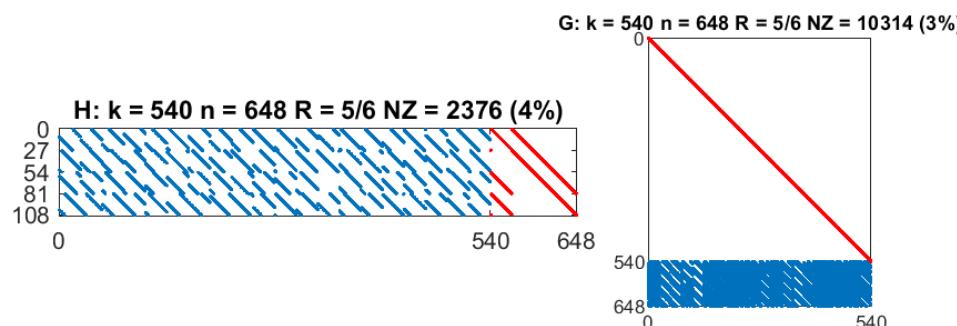


Рис. 1. Матричное представление кода

### Моделирующий стенд

Для оценки помехоустойчивости  $LDPC$  кода в среде технических расчётов *MatLab* была смоделирована система связи, рис. 2, которая вычисляет вероятность ошибки с использованием модели канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ),  $LDPC$  кода и двух видов модуляций  $PSK$  и  $QAM$ .

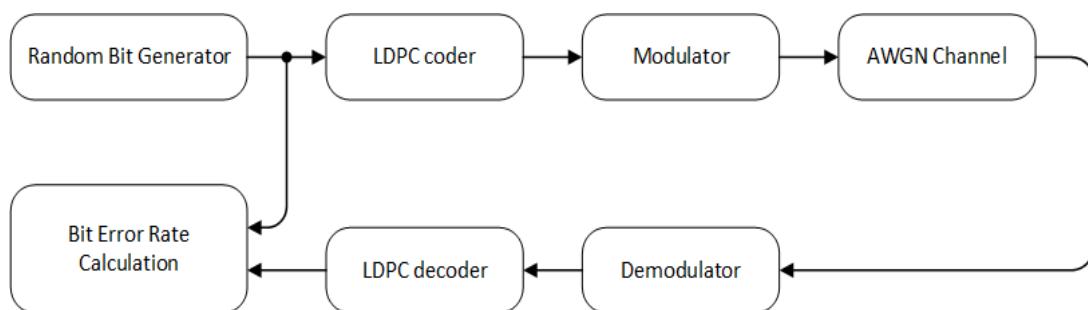


Рис. 2. Моделирующий стенд

Для моделирования используются встроенные функции *MatLab*: *ldpcEncode*, *pskmod* (*qammod*). Стенд состоит из генератора битовой последовательности,  $LDPC$  кодера, модулятора, канала связи, демодулятора, декодера и блока, который вычисляет коэффициент битовой ошибки ( $BER$ , *Bit Error Rate*)., *awgnchan()*, *pskdemod* (*qamdemod*), *ldpcDecode*. Длина эксперимента, если это не указано отдельно составляет 10 000 кодовых

блоков. Моделирование канала связи происходит на фазовой плоскости. Влияние системы синхронизации не учитывается.

Платформа *RF SoC* позволяет использовать мягкие решения на входе декодера, поэтому важно понять как их разрядность представления мягкого решения с выхода демодулятора влияет на помехоустойчивость декодера. Максимальная разрядность допустимая в *RF SoC* – 6 бит, что соответствует диапазону весов мягкого решения от -31 до +31. На рис. 3 приведена зависимость вероятности ошибки от *SNR* для разрядности представления мягкого решения в 6, 5, 4 и 3 бит. Можно обратить внимание, что разница между 6 и 4 разрядами незначительная. Достаточно 4-х разрядов, что соответствует диапазону весов от -7 до +7.

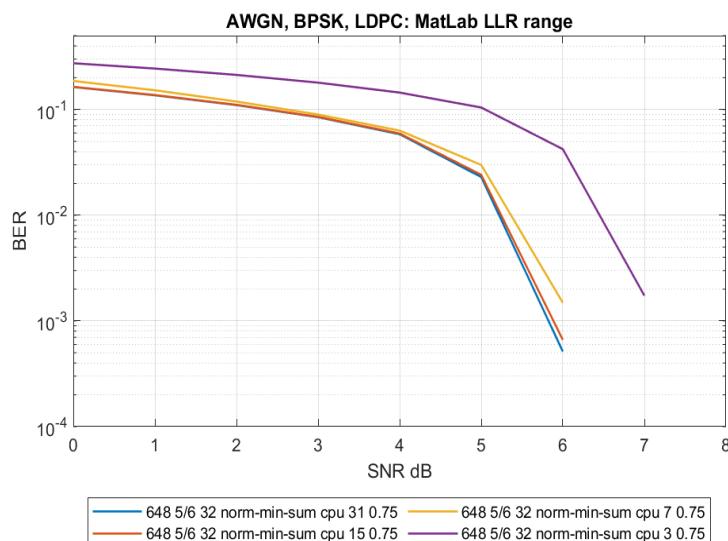


Рис. 3. Влияние разрядности выхода демодулятора на помехоустойчивость *LDPC* декодера

Другим важным параметром *LDPC* кода является количество итераций при декодировании, чем больше, тем выше помехоустойчивость, но и большее задержка при обработке кодового блока. На рис. 4 показана помехоустойчивость в диапазоне от 8 до 64 итераций, где видно, что выигрыш от большого количества итераций в АБГШ канале – незначительный. Длина кодового блока тоже влияет на помехоустойчивость, см. рис. 5, где видно, что чем длиннее блок, тем выше его помехоустойчивость. На рис. 6 показана зависимость помехоустойчивости от кратности и вида модуляции, определённая на выборке 100 000 экспериментов по передаче кодовых блоков. Во всех экспериментах использовался один алгоритм декодирования *LDPC* кодов – нормализованный алгоритм *min-sum* [10] как вариант реализации оптимального алгоритма декодирования «распространения доверия» (*belief propagation*) с меньшей вычислительной сложностью и приемлемой точностью.

### Реализация декодера на платформе RF SoC

Для того чтобы сравнить алгоритмы декодирования на платформе *Zynq UltraScale+ RF SoC* и в *MatLab* на вход декодера подавались одни и те же данные. На рис. 7 показано, что кривые помехоустойчивости совпадают, что позволяет сделать вывод о правильном использовании функционала целевой платформы. Результаты оценки быстродействия на платформе сведены в табл. 3, где кроме основных параметров  $n$ ,  $r$ ,  $R$  *LDPC* кода присутствует количество итераций декодирования (*Num Iteration*), тактовые частоты *FPGA* и *SD-FEC* и скорость декодирования по отношению к канальной скорости кода  $V(c)$  и информационной скорости кода  $V(i)$ .

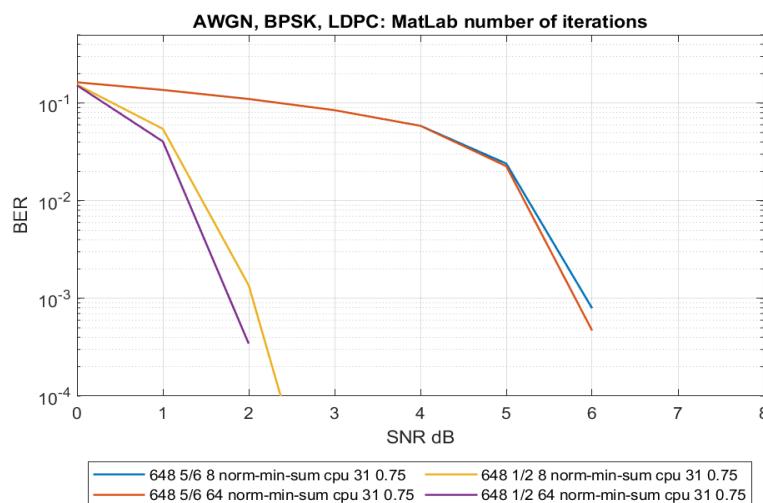


Рис. 4. Влияние количества итераций декодирования на помехоустойчивость LDPC декодера

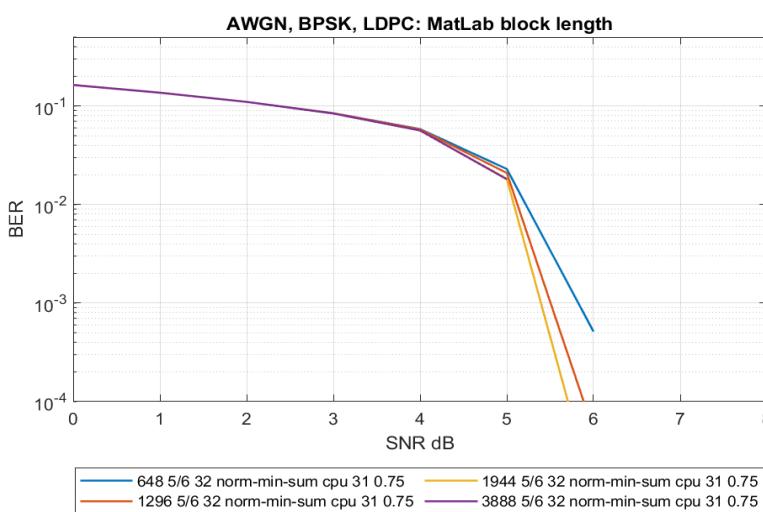


Рис. 5. Влияние длины кодового блока на помехоустойчивость LDPC декодера

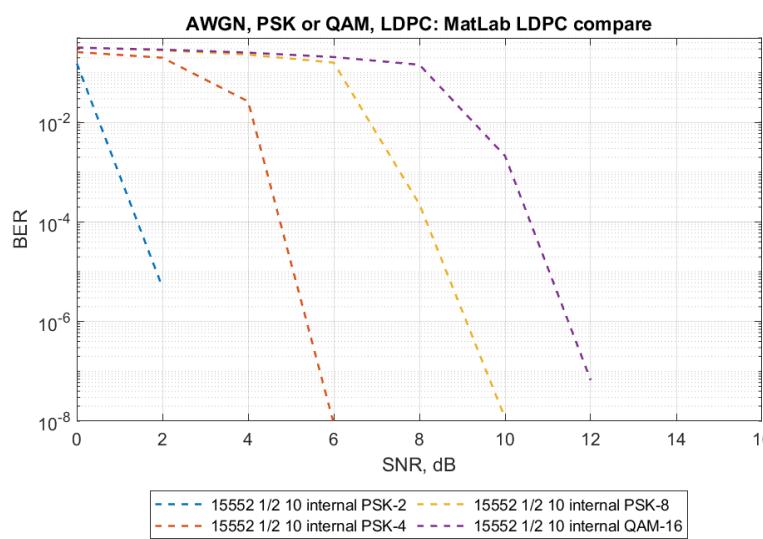
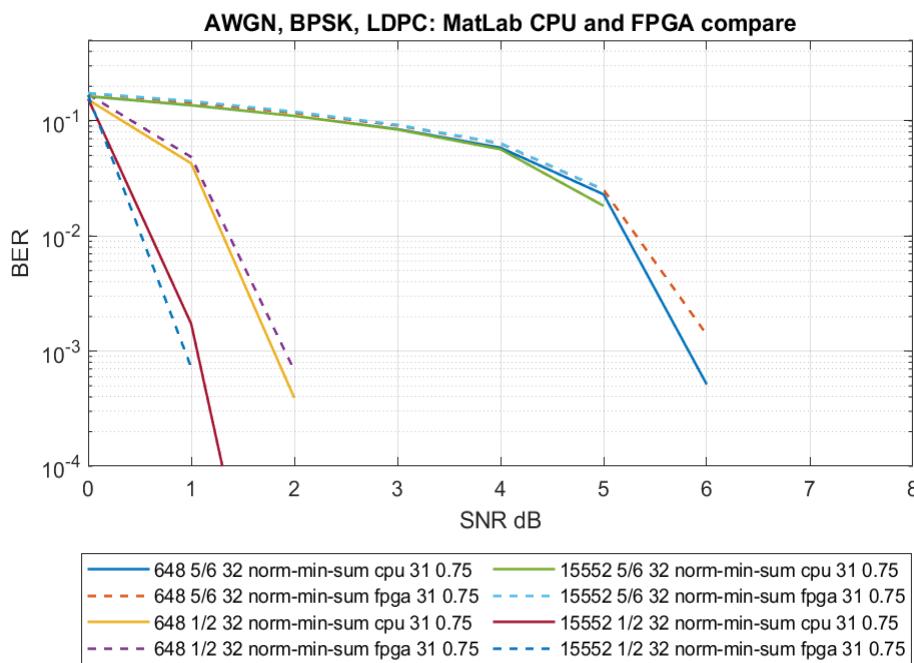


Рис. 6. Влияние кратности модуляции на помехоустойчивость LDPC декодера

Таблица 3 – Пропускная способность *LDPC* декодера

<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i>	<i>Num Iteration</i>	<i>FPGA, MHz</i>	<i>SD-FEC, MHz</i>	<i>V(c), Mbps</i>	<i>V(i), Mbps</i>
648	540	5/6	8	400	600	2 320	1 934
15552	12960	5/6	10	400	666	1 851	1 543
1296	648	1/2	10	400	666	1 533	766

Рис. 7. Сравнение декодирования в *MatLab* и в *RF SoC*

## Выводы

Выбор квазициклических *LDPC* кодов дает несомненные преимущества при реализации линейки канальных кодеров в сверхширокополосном канале. Это повторяемость процедур кодирования и декодирования вне зависимости от скорости передачи, а также близкая к оптимальной помехоустойчивость этого класса кодеров. Для её достижения необходим рациональный выбор разрядности выхода демодулятора (для реализации мягких решений), длины кодового блока и достаточного числа итераций декодирования. Для адаптации к изменениям *SNR* в канале достаточно переключений кратности модуляции. Вычислительный эксперимент и аппаратная реализация показали высокую сходимость результатов. Выбранная платформа *Zynq UltraScale+ RF SoC* позволила реализовать *LDPC* код, который обеспечивает передачу информационных блоков длиной более 12 000 бит со скоростью более 1 Gbps при 10 итерациях декодирования в условиях АБГШ.

## Литература

- Chandraseddy V. A., Aziz S. M. Resource Efficient LDPC Decoders. From Algorithms to Hardware Architectures, London: Academic Press, 2018. 174 p.
- Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels, 2020, IEEE Transactions on Information Theory, vol.55, no.7, July 2009, pp.3051-3073

3. Зяблов В. В., Пинскер М. С. Оценка сложности исправления ошибок низкоплотностными кодами Галлагера // Проблемы передачи информации. 1975. Т. XI. Вып. 1. С. 23-36.
4. Милославская В. Д. Методы построения и декодирования полярных кодов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01. С-Пб.: СПбГПУ Петра Великого, 2014. 206 с.
5. Хорн Р., Джонсон Ч., Икрамов Х. Матричный анализ: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 655 с.
6. Слюсар В. И. Синтез LDPC и полярных кодов на основе торцевого произведения матриц // Международная научно-практическая конференция «Development of Education, Science and Business: Results 2020», 3-4 декабря 2020. – Украина, г. Днепр, 2020. Т. 2. С. 393-396.
7. Soft-Decision FEC Integrated Block v1.1. LogiCORE IP Product Guide. Vivado Design Suite, PG256 (v1.1) October 19, 2022. 123 p.
8. IEEE Standard for Information technology – Local and Metropolitan area Network Standards (IEEE Std 802.11) URL: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html> (дата обращения 20 октября 2025).
9. Pulikoonattu R., Blanksby A., Richardson T., Vermani S. Longer Block-Length LDPC Codes URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/23/11-23-1985-02-00bn-longer-ldpc-codeword.pptx> (дата обращения 20 октября 2025).
10. Хлынов А. А. Оптимизация min-sum алгоритма декодирования LDPC-кодов // Труды Московского физико-технического института. 2016. Т. 8. № 4. С. 13-17.

### References

1. Chandrasekhar V. A., Aziz S. M. Resource Efficient LDPC Decoders. From Algorithms to Hardware Architectures. London. Academic Press, 2018, 174 p.
2. Arikan E. Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels, 2020, IEEE Transactions on Information Theory, vol.55, no.7, pp. 3051-3073, July 2009.
3. Zyablov V. V., Pinsker M. S. *Otsenka slozhnosti ispravleniya oshibok nizkoplotnostnymi kodami Gallagera* [Assessment of the complexity of error correction by low-density Gallager codes]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of information transmission], 1975, v. XI, is. 1, pp. 23-36 (in Russian).
4. Miloslavskaya V. D. *Metody postroyeniya i dekodirovaniya polyarnykh kodov* [Methods of constructing and decoding polar codes. Ph.D. Thesis]. St.Petersburg, St.Petersburg State Polytechnic University, 2014. 206 p. (in Russian).
5. Horn R., Johnson C. Matrix analysis – 2nd ed., New York: Cambridge University Press, 1985, 643 p. (in Russian).
6. Slyusar V. I. *Sintez LDPC i polyarnykh kodov na osnove tortsevogo proizvedeniya matrits* [Synthesis of LDPC and polar codes based on the end product of matrices]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [International scientific and practical conference] “Development of Education, Science and Business: Results 2020”, December 3-4, 2020. Ukraine, Dnipro, 2020, v. 2, pp. 393-396 (in Russian).
7. Soft-Decision FEC Integrated Block v1.1. LogiCORE IP Product Guide. Vivado Design Suite, PG256 (v1.1), October 19, 2022. 123 p.
8. IEEE Standard for Information technology – Local and Metropolitan area Network Standards (IEEE Std 802.11) URL: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html> (accessed October 20, 2025).
9. Pulikoonattu R., Blanksby A., Richardson T., Vermani S. Longer Block-Length LDPC Codes URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/23/11-23-1985-02-00bn-longer-ldpc-codeword.pptx> (accessed October 20, 2025).
10. Khlynov A. A. *Optimizatsiya min-sum algoritma dekodirovaniya LDPC-kodov* [Optimization of the min-sum algorithm for decoding LDPC codes]. Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology, v. 8, no. 4, 2016, pp. 13-17 (in Russian).

Статья поступила 1 декабря 2025 г.

## Информация об авторах

*Путилин Алексей Николаевич* – Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: передача данных в сетях радиосвязи. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru. Тел.: 8 (812) 448-19-01.

*Шаптала Василий Сергеевич* – Кандидат технических наук, начальник лаборатории. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в телекоммуникационных системах. E-mail: ShaptalaVS@inteltech.ru.

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

## Selecting an Error-Correcting Coding System for Ultra-Wideband Radio Channels

A. N. Putilin, V. S. Shaptala

*A nnotation. Building an effective communication system is impossible without using modern error-correcting coding methods, which improve the reliability of the synchronization system and the noise immunity of the information signal. Requirements for an encoder in an ultra-wideband channel are formulated. A rationale for choosing an encoder type is provided. The principles of generating and decoding multilevel quasi-cyclic codes with low-density parity checks are considered. A scheme for generating, distorting, and receiving discrete messages in an ultra-wideband channel is described. The process of transmitting a data stream using this scheme is simulated. A hardware platform for implementing the encoder is proposed. Comparative characteristics of the noise immunity of the proposed encoder versus the parameters of the data generation and reception system are obtained, enabling optimization of these parameters. The task is to select an error-correcting code for an ultra-wideband high-speed modem. The goal of this work is to create a model of the transmitting and receiving sections of the modem without a synchronization system. Digital signal processing and communication theory methods were used in the modeling. The novelty of this solution lies in achieving high decoding speeds on the selected hardware platform. The results of this work include a software implementation of an ultra-wideband radio link in the form of object-oriented code for the MATLAB technical computing environment and its implementation for the selected hardware platform. The practical significance of this work lies in the determination of the maximum achievable decoding rates. The results can be used in the development of data transmission equipment for radio communications.*

**Keywords:** quasi-cyclic code, low-density parity-check code, modulation, noise immunity, ultra-wideband

### Information about the authors

*Aleksej Nikolaevich Putilin* – PhD (Tech.), professor, Chief scientific specialist PJSC “Inteltech”, Scientific interests: data transmission in radio network. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru. Tel. 8(812) 448-19-01.

*Vasily Sergeevich Shaptala* – PhD (Tech.), Head of laboratory PJSC “Inteltech”, Scientific interests: digital signal processing in telecommunication systems. E-mail: ShaptalaVS@inteltech.ru.

Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, Kantemirovskaya street 8,

### Для цитирования:

Путилин А.Н., Шаптала В. С. Выбор системы помехоустойчивого кодирования для сверхширокополосных каналов радиосвязи // Техника средств связи. 2025. № 4. С. 63-73. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-63-73

### For citation:

Putilin A.N., Shaptala V.S. Selecting an Error-Correcting Coding System for Ultra-Wideband Radio Channels. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 63-73 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-63-73

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.51:007.52

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-74-83

**Модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами**

Будко Д. Д., Будко П. А., Клименко А. Д., Рыжкова Д. Н.

**Аннотация. Постановка задачи:** в настоящее время применение беспилотных транспортных систем повсеместно входит в обиход всех сфер хозяйственной деятельности человека. При этом их использование на глобальных расстояниях, в городах и крупных промышленно-логистических центрах сопряжено с применением на трактах управления беспроводных технологий на основе радиоканалов различных диапазонов волн, которые, как открытые системы подвержены деструктивному воздействию различных дестабилизирующих факторов в виде помех и шумов. Целью работы является разработка модели выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами для формирования плана построения их сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех. В качестве **используемых методов** применяются методы динамического управления радиочастотным спектром, технологии когнитивных радиосистем и программируемого радио и методы расширения спектра с изменением рабочей частоты по псевдослучайному закону. К основным **результатам исследования** относится полученная модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами. **Новизна** модели состоит в том, что она получена на основе геометрической интерпретации участка частотного диапазона полосы оптимальных рабочих частот и аналитической зависимости для расчета значения вероятности правильного приема, при вероятности попадания сигнала в полосу, свободную от воздействия помех. **Практической значимостью** является, то, что данная модель будет использована для построения интеллектуальной системы управления беспилотными транспортными системами нового поколения.

**Ключевые слова:** беспилотные транспортные системы, глобально перемещающиеся объекты, когнитивные радиосистемы, полоса частот, робототехнический комплекс, спектрограмма.

**Актуальность**

На фоне широкого и повсеместного внедрения робототехники во все сферы человеческой деятельности, на сегодня особую актуальность приобретают вопросы устойчивого доведение команд управления (КУ) до различных глобально удаленных робототехнических комплексов (РТК), робототехнических платформ (РТП) и беспилотных транспортных систем (БТС) Минтранса России в условиях сложной помеховой обстановки крупных транспортно-логистических узлов, городских и промышленных агломераций, рис. 1.

Управление такими глобально перемещающимися объектами (ГПО) космического наземного, морского и воздушного базирования сопряжено с использованием беспроводных технологий на базе радиоканалов и радиотрактов различных диапазонов волн.

Впервые беспроводные технологии в интересах управления удаленными объектами были успешно продемонстрированы изобретателем радио А.С. Поповым на заседании Русского физико-химического общества в 1896 году, путем передачи в структуре Азбуки Морзе сообщения «Генрих Герц» [1]. Уже к 1899 году А.С. Попову удалось достичь дальности радиосвязи до 30 км между кораблями и берегом Финского залива. Для решения оборонных проблем первым прототипом радиоканала доведения команд управления до удаленных стационарных объектов стала демонстрация группе военачальников Красной Армии с участием М.И. Фрунзе функционирования «Прибора для управления взрывами на расстоянии с помощью радиоволн» в июле 1925 года. При этом на полигоне «Особого

конструкторского бюро» разработчиками под руководством В. И. Бекаури с расстояния около 25 км по специальной команде были подорваны в определенной последовательности несколько мощных фугасов [2].

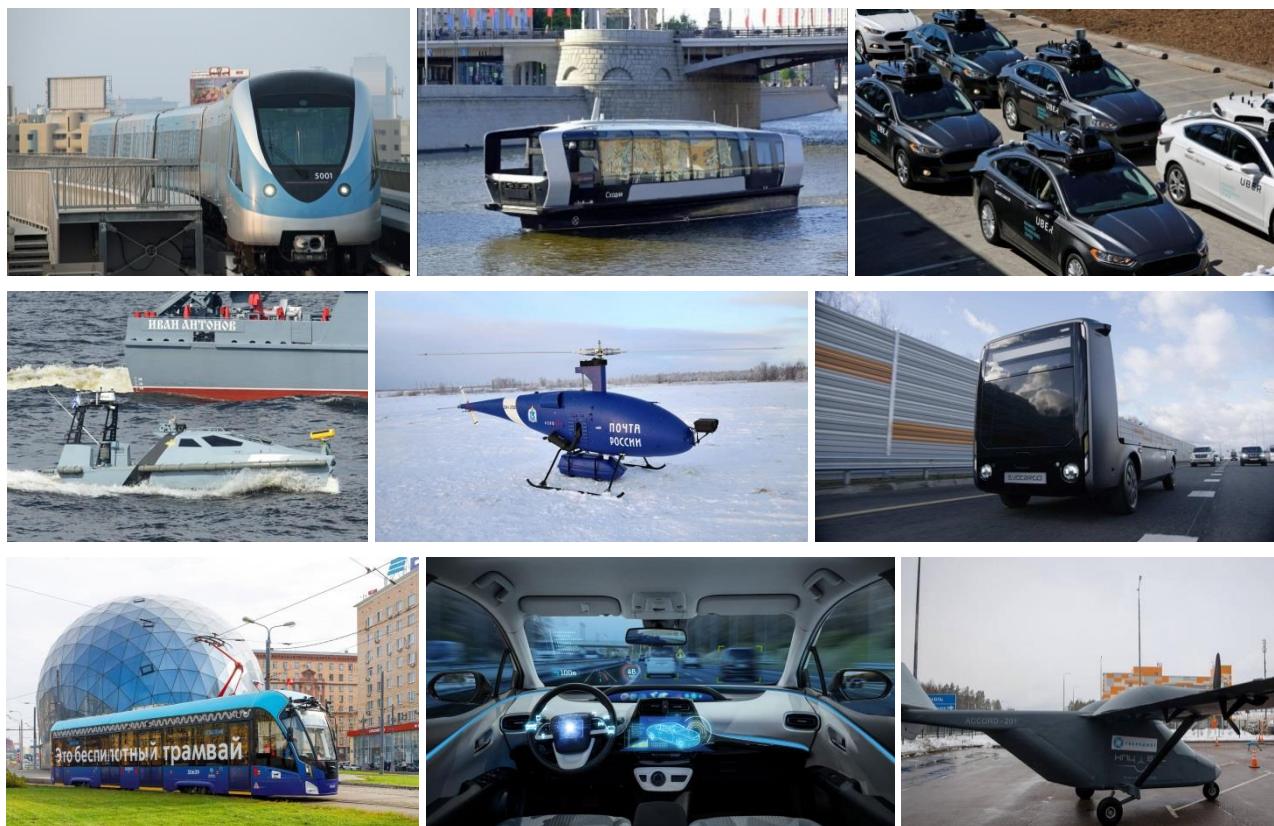


Рис. 1. Беспилотные транспортные системы различных типов базирования

В настоящее время, в связи со стремительным ростом количества применяемых в министерствах и ведомствах РТК, РТП и БТС в интересах хозяйственной деятельности, сферы услуг, а также для решения иных задач спецпотребителей, возрастаёт потребность в доведении до них больших объемов управляющей информации в режиме реального времени. Необходимо отметить, что если для различных мобильных пилотируемых, а также стационарных обитаемых объектов объем информации и режим реального времени не столь критичны, поскольку лицо, принимающее решение (ЛПР, оператор) находится на объекте управления, то для необитаемых ГПО и беспилотных транспортных систем доведение КУ от пункта (ПУ) или ситуационного центра управления (СЦУ) крайне важен именно режим реального времени, напрямую влияющий на безопасность движения на маршруте, их эффективность функционирования, да и на конечную цель – выполнение заданной миссии.

При этом важно учитывать, что на сегодня в черте крупных индустриальных центров и мегаполисов используемая для беспроводных технологий среда распространения радиоволн (РРВ) не только перегружена частотными назначениями, закрепленными за первичными пользователями (ПП), но и подвергается беспрецедентной интенсивности деструктивных воздействий дестабилизирующих факторов (ДФ), представляемые как в виде работы излучающих устройств этих ПП (для каналов управления БТС и РТК это сосредоточенные по спектру помехи, рис. 2), так и различными индустриальными помехами и шумами.

Они могут быть вызваны сложными производственными процессами крупных промышленных центров, в виде импульсов, излучений электромагнитной и электростатической индукции случайной физической природы. Особую обеспокоенность с позиции безопасности управления БТС и РТК вызывают различного рода грозовые фронты и дуговые разряды

контактных сетей железных дорог на радиочастотный спектр (РЧС). Ниже на рис. 3 а), б), в) рядом со спектрограммами показаны фрагменты различимости КУ в шумах.

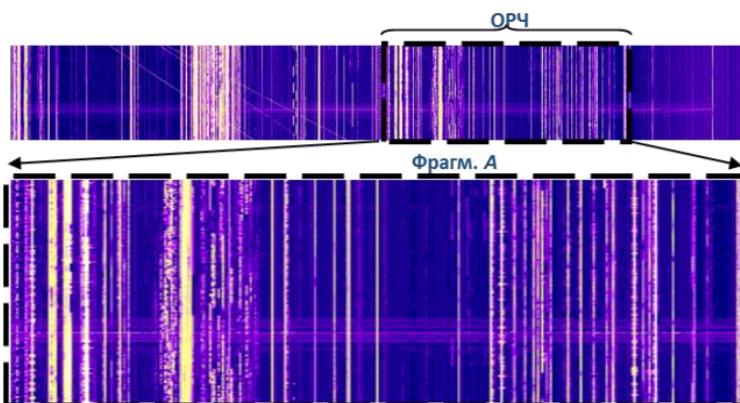


Рис. 2. Общий вид загрузки участка оптимальных рабочих частот (ОПЧ) декаметрового диапазона волн в режиме реального времени для конкретной радиотрассы

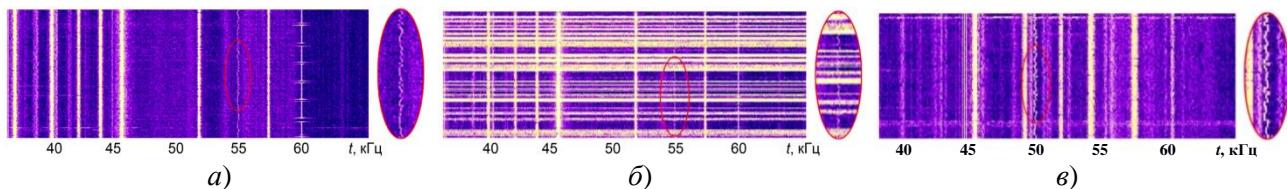


Рис. 3. Спектрограммы принимаемых КУ БТС при: слабых атмосферных шумах  $P_{изл} \approx 0,1$  кВт, а); при прохождении грозового фронта на маршруте движения БТС, б), при  $P_{изл} \approx 10$  кВт, в)

Исходя из этого, а также учитывая исследования мировых научных школ, эксплуатантов радиотехнического оборудования компаний и результатов изучения данной проблемы Федеральной комиссии связи (США) можно констатировать, что в настоящее время весь частотный диапазон лицензирован и уже распределен, однако используется недостаточно эффективно [3]. Улучшить такое положение вещей призван механизм динамического управления радиочастотным спектром, в соответствие с которым незакрепленным за данным частотным диапазоном вторичным пользователям предоставляется перспектива передавать сообщения на радиочастотах ПП в то время пока его штатное радиосредство не выходит в радиоэфир. Данный механизм был инициирован вводом Международным союзом электросвязи (МСЭ) стандарта IEEE 802.22 в 2011 году.

### **Нормативно-правовая база динамического управления радиочастотным спектром**

Дефицит и высокий уровень востребованности радиочастотного ресурса требует от научного сообщества проработки различных технологических решений и административных подходов, направленных на повышение эффективности использования РЧС. В ходе обсуждения данного вопроса на Всемирных конференциях по радиосвязи (ВКР) XXI века [4-7] отмечалось, что сама по себе процедура динамического управления спектром достаточно сложна технически и может быть применима лишь в интеллектуальных радиосистемах. Особенностью таких радиосистем можно выделить способность анализировать и извлекать информацию из окружающего радиопространства, прогнозировать изменения канала связи и рационально адаптировать сервисы, предоставляемые пользователям сети к постоянным изменениям состояния среды РРВ, загрузке частотного диапазона и помеховой обстановке. При этом еще в 1999-2000 гг. для описания подобных интеллектуальных радиосистем Д. Митолла предложил использовать термин «когнитивное радио», *Cognitive Radio System (CRS)*. Здесь когнитивность используется в контексте «способности к познанию и самообучению» [4]. Основные принципы когнитивности радиосистем, предопределяющие их

внедрение в практику организации радиосвязи, в технологическом смысле предполагают адаптивность радиосистем при реализации полос диапазонов и номиналов радиочастот, в то время, как в административном смысле – прежде всего, вторичность использования РЧС [5].

Резолюция МСЭ-R2117 предписывает, что к системам когнитивного радио CRS можно относить радиосистемы, построенные на технологии, позволяющей извлекать знания о своей среде эксплуатации, а также географической среде, о своем внутреннем состоянии и об установленных правилах; автономно в динамике корректировать свои протоколы и эксплуатационные параметры, в соответствие с получаемыми знаниями о состоянии среды, для достижения заданных целей, а также обучаться на основе полученных результатов. В настоящее время мировым научным сообществом активно ведутся работы по построению систем широкополосного радиодоступа в т. н. телевизионном диапазоне частот 54 – 862 МГц, для чего, собственно, и был разработан стандарт беспроводной передачи данных на базе CRS-радиосистем [7]

и принципах когнитивного радио IEEE 802.22, в том числе дающий возможность безлицензионного совместного использования частотного ресурса на вторичной основе, рис. 4.

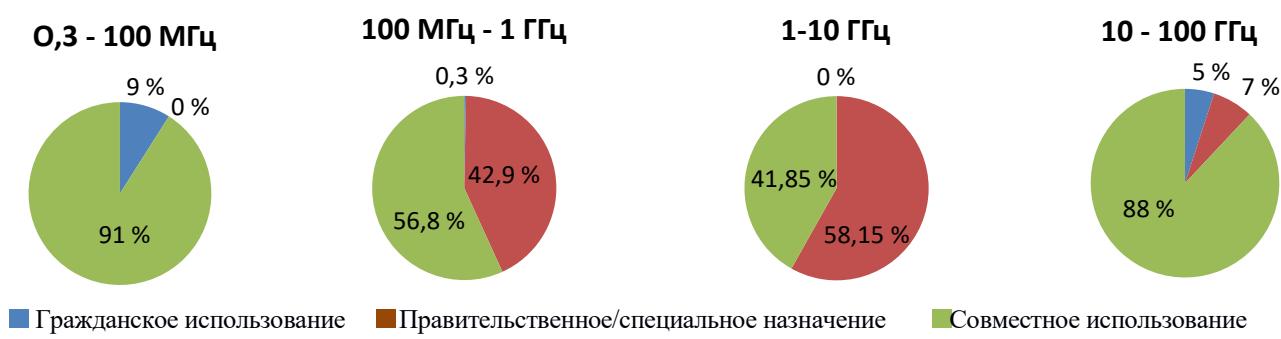


Рис. 4. Разделение радиочастотного спектра по категориям пользователей [8]

При этом в законодательстве РФ нет конкретных установок на фиксированную длительность использования сигналов CRS-радиосистемами: дни, часы, минуты или секунды. Это зависит от динамических условий РЧС, специфики конкретно используемого диапазона и пользователя, а также решений Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ). Однако ключевым условием в данной ситуации остается немедленное освобождение частоты при возобновлении работы ПП. Для чего к задачам CRS-радиосистем крайне важно отнести наличие функции спектрального зондирования среды РРВ и процедуры адаптации, для исключения в создании помех ПП, что непосредственно регулируется Правилами ведения радиосвязи и всевозможными техническими регламентами, а также принципами и нормами ФЗ «О связи»[9]:

- *принцип динамического доступа.* CRS-радиосистемы действуют по принципу «чувствуй и уходи» (*listen-before-talk*);
- *отсутствие активной работы.* Разрешается работать на излучение пока лицензиат (ПП) не пользуется этой полосой.

Как считают зарубежные эксперты Cisco и Beal Labs, за два года объем мобильного трафика растет примерно в 20 раз, что говорит о том, что РЧС для ПП в региональных сетях уже исчерпан. В тоже время, как подчеркивается Европейским институтом электросвязи (ETSI), наличие таких технологий пока не могут всесторонне обеспечить все нужные требования для повсеместного внедрения CRS-радиосистем и когнитивного радио [6]. При этом предполагают, что такие радиосистемы должны работать в будущем в диапазоне 9 кГц – 300 ГГц [7].

Огромная протяженность территории, наземных и водных границ России, наличие национальных интересов в Арктике и во многих других зонах мирового океана, выдвигают задачу доведения КУ до удаленных ГПО исключительно важной на фоне современной военно-политической обстановки. Решение данной задачи, как правило, обеспечивается путем использования спутниковых, декаметровых\* (ДКМВ) и сверхдлинноволновых (СДВ) каналов

связи. Здесь наиболее загруженным и специфическим участком РЧС, в силу ряда причин, можно выделить диапазон ДКМВ, («Теленок маленький, на всех не хватит» *Из старого мультифильма*).

Цель статьи является разработка модели выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолинии управления беспилотными транспортными системами

Рассмотренные в работах [10, 11] способы доведения управляющей и телеметрической информации в интересах РТК и РТП различных типов базирования, а также метод управления БТС на основе помехоустойчивых СКК в условиях сосредоточенных и шумовых помех предполагают наличие достаточного частотного ресурса, выделяемого для каналов и трактов управления ГПО. Причем, в случае передачи КУ в режиме последовательной трансляции их бинарных посылок (БП) (информационных нулей «0» и единиц «1»). Необходим частотный ресурс, выделенный под БТС (РТК) на первичной основе (закрепленный за ПП). В случае же применения параллельной трансляции БП КУ от СЦУ к ГПО или передачи в режиме перестройки рабочей частоты по псевдослучайному закону (ППРЧ), допустимо использование РЧС на вторичной основе, как было описано выше, рис. 5 [12]. Остановимся подробнее на реализации модели CRS-радиосистемы, способной определять свободные участки частотного диапазона в интересах назначения частот, как позиций псевдослучайной последовательности (ПСП) СКК для режима ППРЧ работы каналов и трактов управления БТС (РТК, РТП), рис. 6.

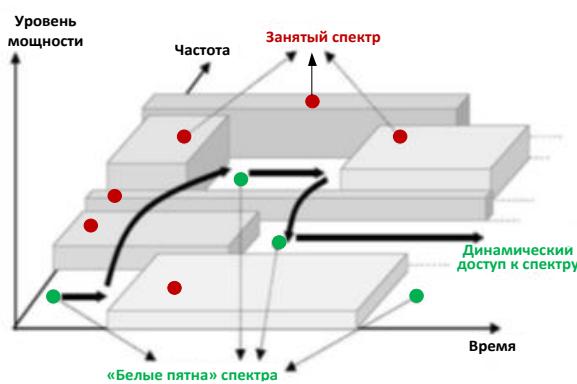


Рис. 5. Подход для обеспечения режима ППРЧ ДКМВ РЛ с использованием «белых пятен» РЧС

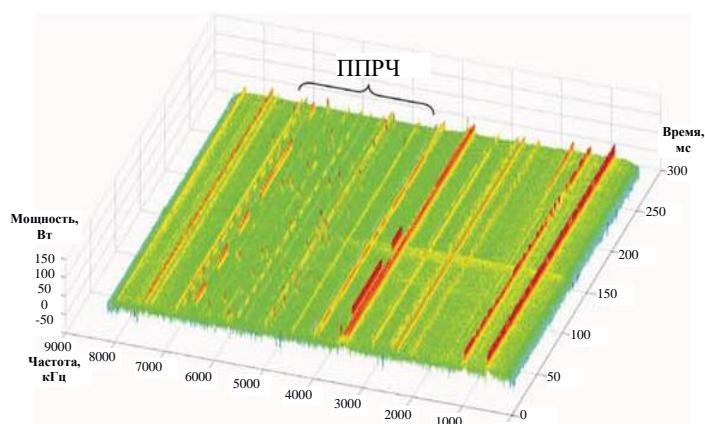


Рис. 6. Масштабированная трехмерная проекция (3D) спектрограммы действующей РЛ в режиме ППРЧ

На сегодня режим ППРЧ широко применяется во многих радиосистемах, и наиболее активно в современных радиолиниях (РЛ) диапазона ДКМВ [13, 14]. Это объясняется снижением воздействия случайных и преднамеренных помех на эффективность функционирования ДКМВ РЛ за счет уменьшения вероятности возникновения эффекта группирования ошибок в принимаемой КУ, обычно вызываемых присутствием глубоких замираний сигнала в среде РРВ. Дополнительный прирост эффективности функционирования ДКМ РЛ при сохранении скорости передачи КУ в целом можно достичь, как было отмечено в [15] за счет внедрения многоканальной передачи БП с параллельным излучением элементов сообщения в режиме ППРЧ и представлением каждого из частотных чипов [11] (дискретов) в виде узкополосных или сверхузкополосных сигналов. Для этого необходимо знание состояния в режиме реального времени, а также динамики изменения РЧС, при выборе свободной от ПП полосы частот.

Для представления модели РЧС, рассмотрим типовую спектрограмму интервала диапазона ДКМВ, представленную на рис. 7 а), отражающую распределение загрузки области ОРЧ работающими излучающими станциями.

Спектrogramму рис. 7 а) условно можно представить в виде геометрической модели (рис. 7 б) с отдельными участками полосы частот  $\Delta F_0$ , которые обеспечивают заданное качество приема полезного, а также участками полосы занятых помехами  $\Delta F_{\text{пп}}$ , в которых величина соотношения сигнала-помеха ведет к неприемлемому снижению качества приема сообщения (частотного чипа или элемента сообщения) с полосой частот  $\Delta f_c$ .

Разобьем доступный участок оптимальных рабочих частот  $F_{\text{ОРЧ}}$  используемого диапазона (см. рис. 7 а) на ячейки с полосой  $\Delta F_i = \Delta F_{\text{пп}} + \Delta F_{0i}$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), и примем допущение, что с вероятностью, равной единице каждая бинарная посылка (бит) или частотный чип БП передаваемой команды управления попадет в одну из  $N$  ячеек, рис. 8.

Будем условно считать, что прием сигнала с заданным качеством обеспечивается только тогда, когда полоса частот сигнала  $\Delta f_c$  не выйдет за полосу  $\Delta F_0$  между двумя ячейками, занятыми сосредоточенными по спектру помехами. В этом случае можно получить значение вероятности правильного приема, при вероятности попадания сигнала в полосу  $\Delta F_0$ .

$$p = \begin{cases} \frac{(\Delta F_0 - \Delta f_c)}{(\Delta F_{\text{пп}} - \Delta F_0)}, & \Delta f_c < \Delta F_0, \\ 0, & \Delta f_c \geq \Delta F_0. \end{cases} \quad (1)$$

Расчетный пример работы формулы (1) приведен в виде графиков рис. 9.

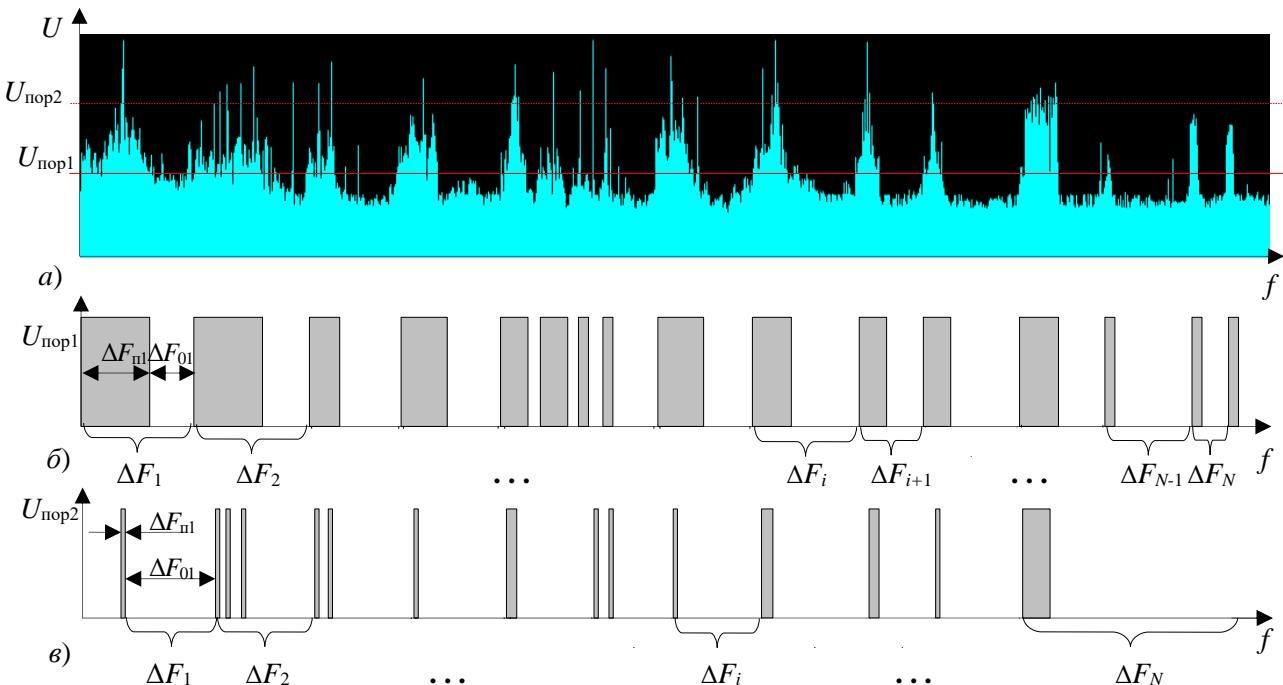


Рис. 7. Геометрическая интерпретация модели выбора полосы частот в интересах формирования ДКМВ РЛ управления БТС (РТК, РТП): фрагмент амплитудно-частотной характеристики участка диапазона вол в полосе ОРЧ а); модели полосы ОРЧ с порогами уровня сигнала  $U_{\text{пор}1}$  б) и  $U_{\text{пор}2}$  в)

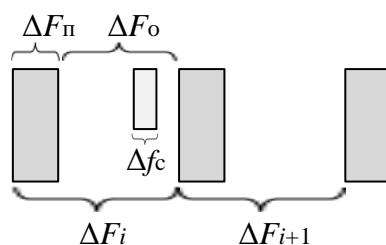


Рис. 8. Геометрическая модель участка частотного диапазона полосы ОРЧ

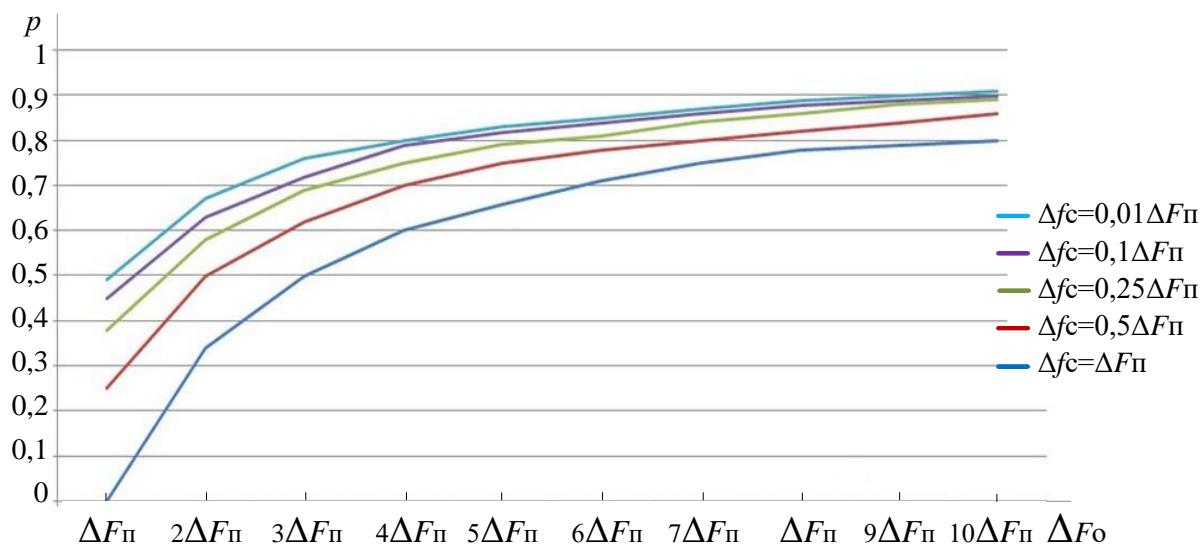


Рис. 9. Зависимость вероятности правильного приема  $p$  от соотношения величины полос частот, занятой помехой  $\Delta F_p$  и свободной от помех  $\Delta F_o$ .

Подробный анализ графиков рис. 9 говорит о том, что уже при  $\Delta F_o > 2\Delta F_p$  сокращение полосы частот, занимаемых сообщением, или элементом БП (частотным чипом) менее 1/10  $F_p$  влияет на вероятность его нахождения в свободном от сосредоточенных помех участок несущественно. Все это показывает, что при усреднении участков полосы частот занятыми помехами  $\Delta F_p \approx 200 - 300$  Гц с точки зрения оптимизации вероятности правильного приема  $p$  достаточно снизить частотную полосу сигнала до  $\Delta f_c \approx 20 \div 30$  Гц.

Существенное снижение  $\Delta f_c$  в дальнейшем целесообразно лишь при ужесточении требований по электромагнитной совместимости РЛ с другими системами радиосвязи, при работе на пониженной мощности излучения сигнала, при работе командной РЛ в сложной помеховой обстановке, в условиях постановки преднамеренных помех, когда поиск сигнала для «подавления» ведется с использованием широкополосного энергетического обнаружителя [16].

### Выводы

Достаточно очевидным является то, что выполнение требования по уменьшению ширины участков полосы частот занятыми помехами  $\Delta F_p$  способно повысить вероятность правильного приема  $p$  сообщения, передаваемого в режиме ППРЧ. При этом основными методами, обеспечивающими это требование, помимо выбора СКК [10-15], являются:

- увеличение мощности излучения радиопередающего устройства, что наглядно видно из анализа спектрограмм диапазона ДКМВ на рис. 1 б), в), где приведены модели спектрограммы для низкого и высокого порогов уровней сигнала  $U_{\text{пор1}}$  и  $U_{\text{пор2}}$ , характеризующих соответственно слабый и мощный сигналы;
- предоставление CRS-радиосистемой на СЦУ и на борт БТС в реальном масштабе времени данных радиомониторинга по помеховой обстановке в точке приема;
- применение других технических решений на основе разнесенного приема и адаптивных компенсаторов помех.

При этом участки используемого диапазона частот, определяемые CRS-радиосистемой как свободные от работы ПП и ранжированные по ширине, могут использоваться на вторичной основе при формировании Комплекта совместимых рабочих частот (КСРЧ) с определением минимального частотного разноса. Данный КСРЧ должен лежать в основу псевдослучайной последовательности СКК для режима работы ППРЧ командной радиолинии БТС [11, 12].

Направлением дальнейшего исследования является построение CRS-радиосистемы СЦУ БТС Минтранса России на основе перепrogramмируемых (SDR) радиоустройств.

## Литература

1. История отечественных средств связи / Под ред. А.С. Якунина. – М.: ЗАО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2013. – 576 с.
2. Радиомины – почему их применял только СССР во время Великой Отечественной войны // [электронный ресурс] <https://zen.yandex.ru/media/weapon/radiominy-...> (дата обращения 29.11.2025 г.).
3. Авдонин Д. В., Рындык А. Г. Интеллектуальные радиосистемы: когнитивное радио // Информационные технологии. Системы, средства связи и управления: Информационно-аналитический сборник / Под ред. С.В. Ионова. Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие», 2012. №1. С. 115-117.
4. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications // Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), IEEE International Workhop, San Diego, CA, USA, Nov. 1999. P. 3-10.
5. Кизима С. В., Митченков С. Г., Емельянников Б. Б. Когнитивные радиотехнологии. Аспекты практической реализации // Электросвязь. 2014. № 9. С. 43-47.
6. Бутенко В. В., Пастух С. Ю. Итоги Всемирной конференции радиосвязи 2012 года // Электросвязь. 2012. № 3. С. 5-11.
7. Михалевский Л. В. Когнитивное радио – передовая технология на пути к более рациональному использованию радиочастотного спектра / Материалы НТС МСЭ (Армения, 28-30 апреля 2008 г.).
8. Больщова Г., Волкова Ю. Лоскутное одеяло спектра // [электронный ресурс] <https://www.iksmedia.ru/articles/2480773-Loskutnoe-odeyalo-spektra.html>. (дата обращения 29.11.2025 г.).
9. О связи. Федеральный закон от 07.07.2003 г. № 126-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации № 28 от 14 июля 2003 г. ст. 3448.
10. Будко Н. П., Будко П. А., Клюшин М. А., Шаталов А. Е. Способ доведения управляющей и телеметрической информации в интересах робототехнических платформ различных типов базирования // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 3. С. 294-322. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-3-294-322.
11. Будко Д. Д., Будко П. А., Зацепин Т. А., Клименко А. Д. Метод управления беспилотными транспортными системами на основе помехоустойчивых сигнально-кодовых конструкций в условиях сосредоточенных и шумовых помех // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 4. С. 134-178. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-134-178.
12. Кандаурова Е.О. Разработка метода интеллектуальной перестройки рабочих частот в системах когнитивного радио / Дисс. уч. ст. канд. техн. наук. М.: ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», 2024. 153 с.
13. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Повышение эффективности функционирования декаметровых радиолиний // Телекоммуникации и транспорт (T-Comm). 2015. № 2. С. 4-10.
14. Беккиев А. Ю., Борисов В. И. Базовые принципы создания помехозащищенных систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. 2014. №1. С. 3-16.
15. Николашин Ю. Л., Будко П. А., Жолдасов Е. С., Жуков Г. А. Перспективные методы повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2014. № 1. С. 30-37.
16. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. М.: Вузовская книга, 2013. 360 с.

## References

1. *Istoriya otechestvennykh sredstv svyazi* [History of Domestic Means of Communication]. Edited by A. S. Yakunin. Moscow, Publishing House Stolichnaya Entsiklopediya, 2013. 576 p. (in Russian).
2. *Radiominy – pochemu ih primenyal tol'ko SSSR vo vremya Velikoj Otechestvennoj vojny* [Radiomines – why they were used only by the USSR during the Great Patriotic War]. Available at: <https://zen.yandex.ru/media/weapon/radiominy-...> (accessed 29 Nov. 2025) (in Russian).
3. Avdonin D. V., Rindik A. G. Intellectual radio systems: cognitive radio. *Information technologies. Systems, means of communication and managements. The information and analytical collection'*. Under the editor. of S. V. Ionov, JSC Sovezdiye Concern Publ., Voronezh, 2012, no. 1, pp.115-117 (in Russian).
4. Mitola J. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications, Mobile Multimedia Communications, IEEE International Workhop, San Diego, CA, USA, 1999, no. V, pp. 3-10.

5. Kizima S. V., Mitchenkov S. G., Emelyannikov B. B. Cognitive radio technologies. Aspects of practical realization, *Telecommunication*, 2014, no. 9, pp. 43-47 (in Russian).
6. Butenko V. V., Shepherd S. Yu. Itogi of the World conference of a radio communication of, *Telecommunication*, 2012, no. 3, pp. 5-11 (in Russian).
7. Mikhalevsky L. V. Cognitive radio – advanced technology on the way to more rational use of a radio-frequency range, *Materialya NTS MSE*, Armenia, on April 28-30, 2008 (in Russian).
8. Bol'shova G., Volkova Yu. *Loskutnoe odeyalo spectra* [The patchwork of the spectrum] Available at: <https://www.iksmedia.ru/articles/2480773-Loskutnoe-odeyalo-spektra.html> (accessed 29 Nov. 2025) (in Russian).
9. On Communications. Federal Law no.126-FL of July 7, 2003. Collection of Legislation of the Russian Federation no. 28, July 14, 2003, Article 3448 (in Russian).
10. Budko N. P., Budko P. A., Klyushin M. A., Shatalov A. E. A method of delivering control and telemetry information in the interests of various types of robotic platforms. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 3, pp. 294-322 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916- 2025-3-294-322.
11. Budko D. D., Budko P. A., Zatsepin T. A., Klimenko A. D. A method for controlling unmanned transport systems based on noise-resistant signal-code structures in conditions of concentrated and noisy interference. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 4, pp. 134-178 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-134-178.
12. Kandaurova E. O. *Razrabotka metoda intellectual'noj perestrojki rabochikh chastot v sistemakh kognitivnogo radio* [Development of a method of intelligent adjustment of operating frequencies in cognitive radio systems]. Diss. for the job. PhD Candidate of Technical Sciences. Moscow. *Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI)*, 2024, 153 p.
13. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. The increase efficiency of decameter radio lines. *T-Comm*, 2015, no. 2, pp. 4-10 (in Russian).
14. Bekkiev A. Yu., Borisov V. I. *Bazovie printsipi sozdaniya pomehozashishyonykh system radiosvyazi* [Basic Principles of Creation of Noise-Prof Radio Communication Systems]. *Theory and technique of radio communication*, 2014, no. 1, pp. 3-16 (in Russian).
15. Nikolashin Yu. L., Budko P. A., Zholdasov E. S., Zhukov G. A. Perspective methods of increase noise stabilities of decameter radio lines. *H&ES Research*, 2014, no. 1, pp. 30-37.
16. Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Electronic warfare]. Moscow. Vuzovskaya kniga publ., 2013. 360 p. (in Russian).

**Статья поступила 30 ноября 2025 г.**

### **Сведения об авторах**

*Будко Дмитрий Дмитриевич* – аспирант. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Область научных интересов: методы управления беспилотными транспортными системами. E-mail: budd.85@yandex.ru.

Адрес: Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5.

*Будко Павел Александрович* – доктор технических наук, профессор. Ученый секретарь. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: управление ресурсами информационно-телекоммуникационных сетей и систем. E-mail: budkopa@inteltech.ru.

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

*Клименко Андрей Дмитриевич* – адъюнкт. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы управления беспилотными транспортными системами. E-mail: anutikaaa@mai.ru.

Адрес: Россия, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3.

*Рыжкова Дарья Николаевна* – инженер первой категории. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии». Область научных интересов: методы управления робототехническими комплексами. E-mail: ryzhkovadn@inteltech.ru.

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

### **A frequency band selection model for the formation of decameter radio control lines for unmanned transport systems**

D. D. Budko, P. A. Budko, A. D. Klimenko, D. N. Ryzhkova

**Annotation.** **Problem statement:** currently, the use of unmanned transport systems is widely used in all spheres of human economic activity. At the same time, their use over global distances, in cities and large industrial and logistics centers involves the use of wireless technologies based on radio channels of various wave ranges on control paths, which, as open systems, are susceptible to the destructive effects of various destabilizing factors in the form of interference and noise. **The aim of the work** is to develop a frequency band selection model in the interests of forming decimeter radio control lines for unmanned transport systems to form a plan for building their signal-code structures in conditions of concentrated and noise interference. **The methods** used include methods of dynamic control of the radio frequency spectrum, technologies of cognitive radio systems and programmable radio, and methods of spectrum expansion with a pseudorandom frequency change. **The main results** of the study include the obtained frequency band selection model in the interests of forming decimeter radio control lines for unmanned transport systems. The **novelty** of the model lies in the fact that it is obtained on the basis of a geometric interpretation of a portion of the frequency range of the optimal operating frequency band and an analytical dependence for calculating the probability of correct reception, with the probability of a signal entering a band free from interference. It is of **practical importance** that this model will be used to build an intelligent control system for next-generation unmanned transport systems.

**Keywords:** unmanned transport systems, globally moving objects, cognitive radio systems, frequency band, robotic complex, spectrogram.

#### Information about the authors

*Dmitry Dmitrievich Budko* – Postgraduate. State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. Research interests: methods of managing unmanned transport systems. E-mail: budd.85@yandex.ru.

Address: Russia, Saint-Petersburg, st. Dvinskaya, bldg. 5/7.

*Pavel Alexandrovich Budko* – Doctor of Technical Sciences, Professor. Academic Secretary. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies." Research interests: resource management of information and telecommunication systems. E-mail: budkopa@inteltech.ru.

Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, st. Kantemirovskaya, bldg. 8.

*Andrei Dmitrievic Klimenko* – Postgraduate. Military Academy of Communication named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: methods of managing unmanned transport systems. E-mail: anutikaaa@mail.ru. Address: 194064, Russia, Saint-Petersburg, Tikhoretskiy prospect, build. 3.

*Daria Nikolaevna Ryzhkova* – Engineer of the first category. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies." Research interests: methods of managing robotic complexes. E-mail: ryzhkovadn@inteltech.ru.

Address: Russia, Saint-Petersburg, 197342, st. Kantemirovskaya, bild. 8.

#### Для цитирования:

Будко Д. Д., Будко П. А., Клименко А. Д., Рыжкова Д. Н. Модель выбора полосы частот в интересах формирования декаметровых радиолиний управления беспилотными транспортными системами // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 74-83 DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-74-83.

#### For citation:

Budko D. D., Budko P. A., Klimenko A. D., Ryzhkova D. N. A frequency band selection model for the formation of decimeter radio control lines for unmanned transport systems. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 74-83 (in Russian) DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-74-83.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-84-93

**Четырехсекторная пирамидальная фазированная антенная решетка  
кругового обзора с широкой рабочей полосой пропускания**

Карпухин С. А.

**Аннотация.** Постановка задачи: в настоящее время возникла необходимость в создании универсальных радиолокационных средств, работающих на разных частотах, способных обнаруживать беспилотные летательные аппараты различных модификаций и размеров, а также к этим средствам предъявляются требования по обеспечению возможности оперативного обслуживания и ремонта в полевых условиях. Учитывая, что сегодня в радиолокационных средствах используется современная элементная база, включающая в себя активные элементы, такие как фазовращатели, усилители, источники и накопители энергии, соответственно с увеличением количества этих элементов, увеличивается количество отказов и поломок техники в результате воздействия полей наводок этих элементов на пассивные элементы антенн. Таким образом, к этим радиолокационным средствам предъявляются более жесткие требования по обеспечению надежности и долговечности, которая может быть достигнута за счет оптимизации распределения электропитания между элементами антennы, что позволяет снизить нагрузку на элементы антennы, тем самым увеличивая долговечность и моторесурс. Необходимо отметить, что для увеличения работоспособности антennы предлагается использование в схеме антennы дополнительных механических устройств, которые дублируют функции электрических элементов в случае выхода из строя последних. Все эти вопросы могут быть решены путем использования в составе антennы таких современных устройств, как контроллеры, которые позволяют программно изменять алгоритмы работы антennы, запитывая ту или иную цепь, тем самым снижая токовую нагрузку на элементы, не участвующие в данный момент в работе антennы. Использование в составе схемы антennы твердотельных реле вместо электромеханических может существенно повысить долговечность современных радиолокационных систем. Также в современных радиолокационных станциях для обеспечения кругового обзора в пределах  $360^\circ$  используются поворотные механизмы, обеспечивающие вращение антennы. Данные механизмы должны обеспечивать боевую работу на протяжении достаточно длительного отрезка времени, что чревато выходом из строя устройств, обеспечивающих вращение. Для предотвращения такой ситуации в статье предложена конструкция антennы, обеспечивающая круговой обзор без использования поворотных средств. Целью работы является исследование возможности создания универсальной фазированной решетки, способной перекрывать большой диапазон рабочих частот, конструкция, которой позволяет оперативно демонтировать вышедшие из строя секции антennы, а использование в составе современной элементной базы позволяет оптимизировать электропитание решетки. Используемые методы: электродинамическое моделирование, математические расчеты. Новизна: состоит в том, что предложенная конструкция антennы осуществляет работу антennы в диапазоне октавы, обеспечивает круговой обзор пространства без использования поворотных средств. Она позволяет быстро демонтировать, вышедшие из строя секции, а предложенная система электропитания снижает токовую нагрузку. Результат: заключается в том, что предложенная конструкция существенно сократит время ремонта, а расширенный диапазон рабочих частот позволит наиболее точно определять характеристики беспилотного летательного аппарата. Практическая значимость: предложенная конструкция может быть использована в современных средствах радиолокационной связи, осуществляющих работу по различным аэrodинамическим целям.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, контроллер, круговой обзор, фазированная антенная решетка.

## Актуальность

В настоящее время актуальным вопросом является вопрос в создании универсальных радиолокационных средств (РЛС), работающих на разных частотах, способных обнаруживать беспилотные летательные средства (БПЛА), различных модификаций и размеров, а также к этим средствам предъявляются требование по обеспечению возможности оперативного обслуживания и ремонта в полевых условиях. В связи с чем, конструкция разрабатываемой антенны должна быть проста, надежна, обеспечивать ремонтопригодность, а затраты на материалы и производство должны быть минимальны.

## Постановка задачи

Разработать модель антенны, удовлетворяющую требованию актуальности.

Входными данными для проведения моделирования будут являться характеристики, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики антенны

Обозначение	Физический смысл обозначения
$t$	– время
$f$	– частота
$K1 – K4$	– реле
$VD1 – VD4$	– транзисторы

## Методика конструирования антенны

1) В качестве критерия удешевления конструкции антенны предлагается в качестве основного материала использовать текстолит, а секции антенны изготавливать в виде печатных плат.

2) Для обеспечения кругового обзора пространство разбивается на четыре сектора и соответствующие им сектора антенны размещаются в этих четырех направлениях.

3) Для обеспечения быстроты монтажа и демонтажа секций антенны применяется пазовое их соединение, описанное в работе [1].

4) В случае выхода из строя блока фазовращателей в антенне применен механический способ изменения угла наклона секторов антенны, что позволяет сканировать пространство в вертикальном направлении.

5) В конструкции антенны отказались от механизмов, обеспечивающих вращение антенны для повышения надежности работы антенны в течении длительного срока эксплуатации.

6) Для удешевления конструкции антенны базовым материалом будет являться стеклотекстолит.

7) Для упрощения производства секций антенны будет применяться печатная технология по принципу изготовления печатных плат.

Описание антенны: четырехсекторная фазированная антенная решетка (ФАР) кругового обзора с рабочей полосой пропускания октава (рис. 1), имеющая в своем составе четыре сектора обзора поз. 1, Каждый сектор антенны в свою очередь поделен на четыре секции поз. 2, которые закреплены в штативе поз. 3.

Данный тип антенны использует в своем составе фазированную антеннную решетку четырехсекционную (рис. 2), которая представляет из себя пластину, выполненную из стеклотекстолита, имеющую в своем составе восемь круглых плоских металлических излучателей 1, расположенных на диэлектрической подложке с проводящим металлическим экраном, который расположен с обратной стороны секции. Возбуждение круглых плоских металлических излучателей происходит с помощью штырей, к которым с помощью

коаксиальных соединителей стыкуются коаксиальные фидеры. Более подробно конструкция антенны описана в работах [1, 2]. В качестве альтернативы четырехсекционной ФАР можно использовать в составе пирамидальной антенны антенное полотно фазового пеленгатора с рабочей полосой частот октава, которое описывалось в работе [3], а в качестве приемника использовать приемник, представленный в статье [4]. Оптимизацию геометрии антенны, а также толщину металлизации можно проектировать в соответствии с работой [5].

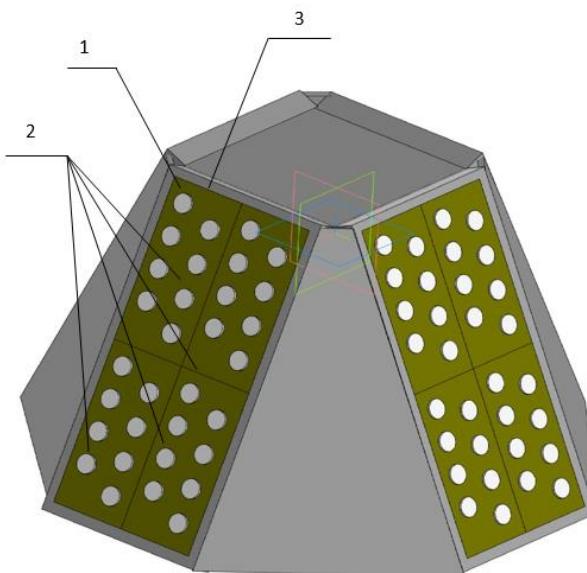


Рис. 1 Четырехсекторная пирамидальная антенна

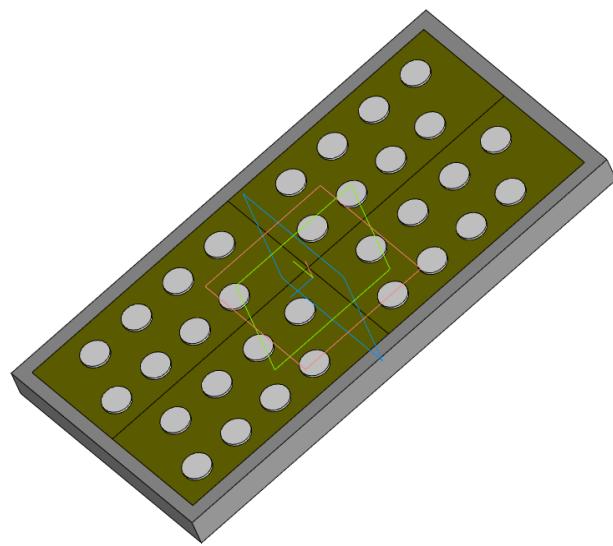


Рис. 2 Фазированная антенная решетка четырехсекционная

Секции, изготовленные из стеклотекстолита, устойчивы к воздействию климатических факторов: температуре окружающей среды от минус 50°C до плюс 60°C, относительной влажности воздуха до 98 % ± 2 % при температуре плюс 35°C [1]. Данные антенные решетки могут образовывать системы фазированных решеток и использоваться на разнесенных позициях. Геометрия антенны позволяет снизить паразитные излучения за счет уменьшения зазора при соединении секций. При этом снижена трудоемкость за счет применения пазового способа соединения секций антенны, повышена вибропрочность излучателей за счет изменения их формы (круглые плоские металлические излучатели), снижено явление интерференции за счет минимизации выступающих элементов (головки винтов), уменьшена себестоимость за счет применения дешевых материалов (стеклотекстолит), а рабочий диапазон антенны лежит в пределах 1 ГГц – 2 ГГц (полоса пропускания октава). Особенностью антенн данного типа является использование импедансных структур, способных поддерживать плоские или цилиндрические поверхностные волны. Причем антенна конструируется так, что отражение волны от конца структуры мало, и в антенне устанавливается режим, близкий к режиму бегущей волны.

Представленная четырехсекторная ФАР имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с аналогами:

1) Разбиение ФАР на секторы дает возможность использовать в своем составе секции с излучателями, имеющими различные характеристики (частота, длина волны), таким образом, позволяя перекрывать различные диапазоны частот.

2) Конструкция антенны обеспечивает круговой обзор в секторе 360° и, соответственно, антенне не требуется механизм, обеспечивающий постоянное вращение ФАР вокруг своей оси.

3) Элементы ФАР легко демонтируются и заменяются в боевых условиях.

4) Четырехсекторная ФАР легко обслуживается в боевых условиях.

5) Четырехсекторная ФАР может быть установлена на автомобильное шасси и осуществлять работу по обнаружению БПЛА.

6) Конструкция антенны имеет относительно небольшой вес, так как при ее изготовлении используются композиционные материалы.

7) Конструкция антенны устойчива к внешним воздействиям (влага, температура, снег, вибрация).

Модель антенны, представленная на рис. 3, построена в программном модуле «Компас-3D» и представляет из себя антенну кругового обзора четырехсекторную, которая имеет в своем составе 4 (четыре) сектора. Каждый сектор в свою очередь состоит из 4 (четырех) секций и крепежного штатива.

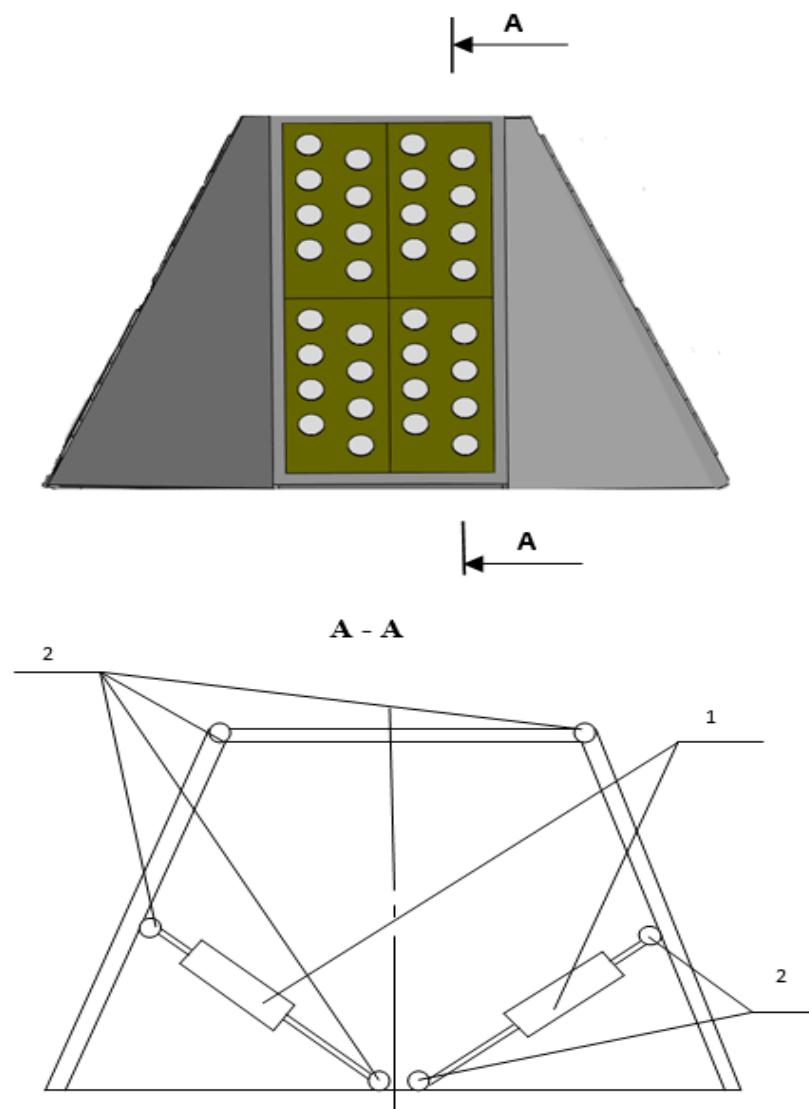


Рис. 3. Четырехсекторная ФАР (двумерное изображение)

Проведенное электродинамическое моделирование излучателей антенны в программных модулях Antenna Magus, CST Studio Suite 2021, представленное на рис. 4 – 7 и приведенное в работах [2, 6] показало хорошие характеристики диаграммы направленности (ДН), коэффициента стоячей волны (КСВ) и коэффициента отражения.

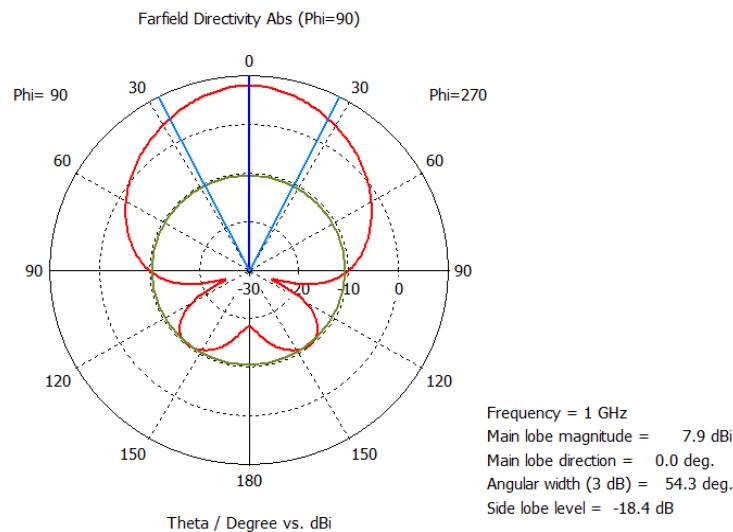


Рис. 4. Диаграмма направленности для излучателей первой секции

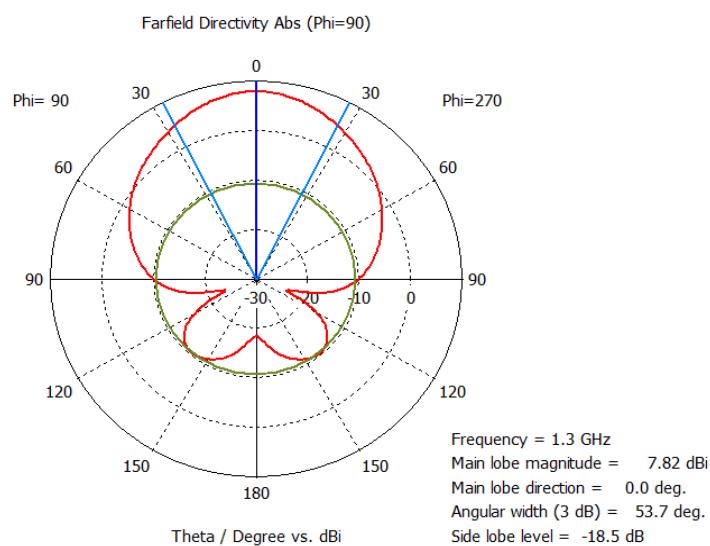


Рис. 5. Диаграмма направленности для излучателей второй секции

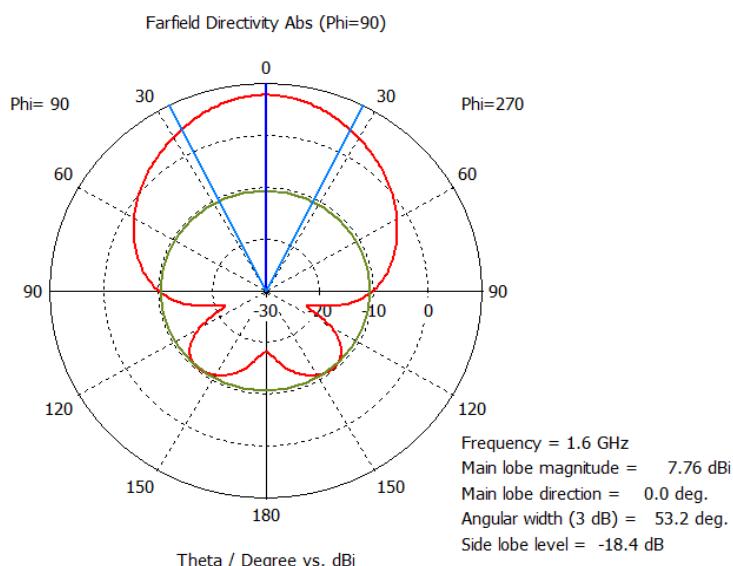


Рис. 6. Диаграмма направленности для излучателей третьей секции

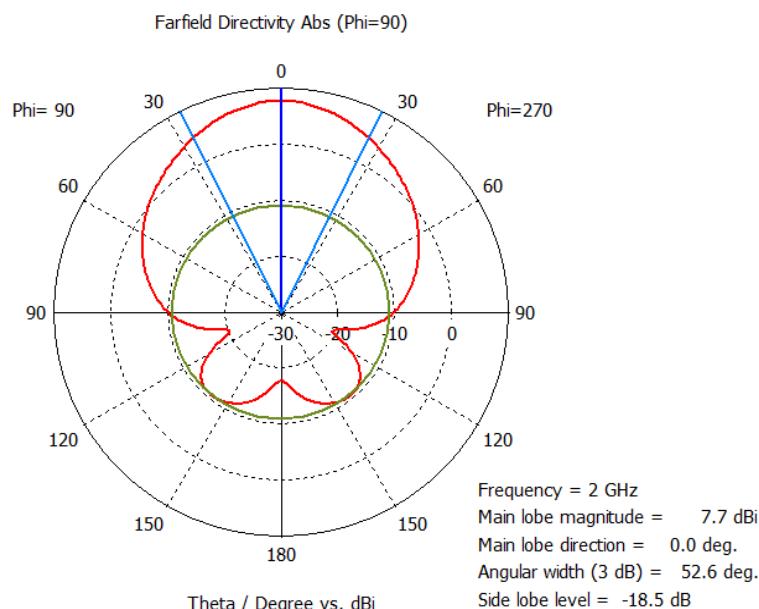


Рис. 7. Диаграмма направленности для излучателей четвертой секции

Из рис. 4 – 7 видно, что на ДН присутствуют боковые лепестки, уровень которых может быть минимизирован за счет подбора амплитудного коэффициента, как это предложено в работе [7]. Также боковые лепестки могут быть устраниены аналитическими [8] и численными методами [9] управления уровнем боковых лепестков.

В данной статье предлагается механическое изменение углов наклона секторов для обеспечения работы антенны в случае выхода из строя фазовращателей, которые обеспечивают изменение угла.

Описание методики следующее: для изменения угла наклона секторов использовать пневмоцилиндры (поз. 1 на рис. 3). Механизм изменения угла наклона сектора имеет в своем составе 4 (четыре пневмоцилиндра), которые соединяются с плоскостями секторов и с горизонтальной поверхностью с помощью шарнирных соединений поз. 2 на рис. 3. Учитывая, что четырехсекторная ФАР может устанавливаться на оборудованные шасси, в состав которых входит автомобиль (Урал, БАЗ, КАМАЗ), то в качестве компрессора можно использовать штатный компрессор автомобиля, который обеспечивает сжатым воздухом пневмосистему автомобиля.

Работа системы осуществляется следующим образом: после того как штатный компрессор автомобиля нагнетает в пневмобаллонах давление сжатого воздуха до 7 Атм (контролируется по показанию штатного манометра на приборной панели в кабине водителя) водитель-механик переводит рычаг управления распределителя воздуха с ручным управлением в положение «1» и воздух поступает по пневмоконтуру в пневмоцилиндры, которые начинают выдвигаться до своей рабочей высоты. Для осуществления обратного действия водитель-механик переводит рычаг управления распределителя воздуха в положение «2» после чего воздух стравливается из пневмосистемы.

На рис. 8 представлена импульсно-последовательная схема распределения электропитания четырехсекционной фазированной антенной решетки, т. е сначала подается электропитание на первую секцию антенны в течение времени  $t$ , далее на вторую секцию, потом на третью, и, наконец, на четвертую. Распределение электропитания будет осуществляться с помощью блока управления, выполненного в виде контроллера и реле, которые будут замыкать цепи электропитания в соответствии с сигнальными токами от контроллера. В схеме применяются твердотельные реле обозначенные как  $K1 \dots K4$ ,

транзисторы  $VD1 \dots VD4$ , время работы одной секции  $t$  и частота на которой работают секции  $f_1 \dots f_4$ .

Подробно принцип работы антенны описан в работах [10, 11]. При этом необходимо отметить, что при проявлении падения выходной мощности усилителей в выходном каскаде передающего устройства, в данной антенне можно использовать коррекцию электрических длин каналов усиления как предложено в работе [12].

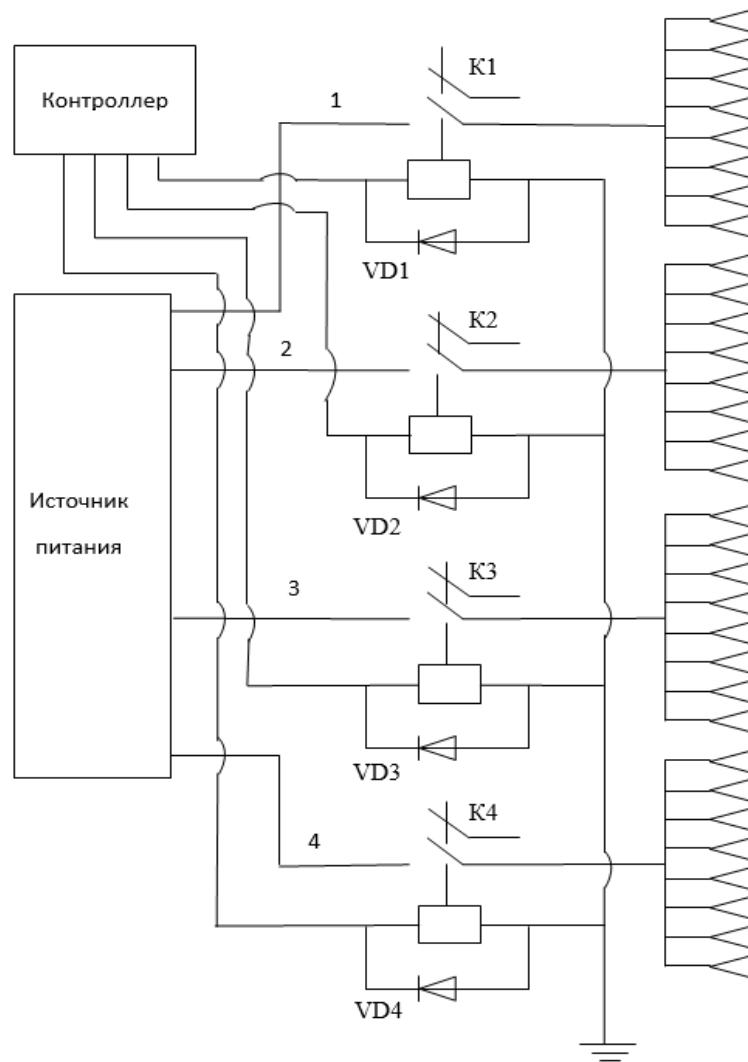


Рис. 8. Импульсно-последовательная схема распределения электропитания четырехсекционной ФАР

### Пример применения методики

Отметим, что подобные разработки уже были реализованы в СССР, в разгар «холодной войны». В 60-х годах XX века была начата разработка радара «ДОН», которая закончилась в 90-х годах. Основной задачей данного радара было обнаружение и сопровождение баллистических ракет, а также наведение противоракет. В составе РЛС были использованы крупноапertureные активные фазированные решетки диаметром 18 метров (приемными и передающими) на каждой из четырех граней. Данный проект был по-своему уникален, так как позволил реализовать следующие характеристики:

- многофункциональность (радар позволял совершать ближний и дальний перехват);

- высокая помехозащищенность;
- высота обнаружения цели – 40000 км;
- точность сопровождения цели по дальности – 10 м.

Недостатками данной РЛС являются ее размеры и стационарная дислокация.

### Выводы

Представленная в работе четырехсекторная пирамидальная фазированная антенная решетка кругового обзора с широкой рабочей полосой пропускания обеспечивает работу в диапазоне октава, может обслуживаться в полевых условиях, конструкция максимально удешевлена, а примененный механический способ изменения углов наклона секторов повышает живучесть антенны в условиях современного боя. В ней отсутствуют дифракционные максимумы, так как моделирование проводилось при тех же условиях, что и в работе [13]. Импульсно-последовательная схема электропитания позволяет оптимизировать распределение токовой нагрузки на секции, тем самым повышая долговечность электрических узлов антенны. Данный тип антенны может быть применен в радиолокационной станции обнаружения малоразмерных целей, представленной в работе [14].

### Литература

1. Патент на изобретение № 2810947. Фазированная антенная решетка четырехсекционная // Карпухин С. А. Опубликовано: 09.01.2024 г. – H01Q 9/34 (2006.01). Бюл. № 1.
2. Карпухин С. А. Расширение рабочего диапазона фазированной антенной решетки методом дифференциации полотна антенны на поддиапазоны // Антенны. 2024. № 6. С. 58-68. DOI: <http://doi.org/10/18127/j03209601-202406-06>.
3. Климов К. Н. Электродинамическое моделирование антенного полотна фазового пеленгатора с рабочей полосой частот октава. // Вестник воздушно-космической обороны. 2024. № 2 (42). С. 39-54.
4. Климов К. Н. Электродинамическое моделирование волноводной приемной антенны с рабочей полосой частот октава // Вестник воздушно-космической обороны. 2021. № 1 (29). С. 61-68.
5. Мигалин М. М., Обуховец В. А., Демшевский В. В. Влияние производственных процессов на характеристики печатных антенн и резонаторов миллиметрового диапазона длин волн // Антенны. 2025. № 4. С. 62-70. <http://doi.org/10/18127/j03209601-202504-06>
6. Конов К. И., Климов К. Н. Снижение уровня боковых лепестков диаграммы направленности линейной эквидистантной фазированной антенной решетки // Вестник воздушно-космической обороны. 2021. № 1 (29). С. 69-76.
7. Кашин В. А., Хмеленко Ю. А., Шурыгин И. С. Синтез управляемых нулей в диаграмме направленности плоской фазированной антенной решетки с использованием парциальных диаграмм // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 8. С. 759-767.
8. Карпухин С. А. Распределение электропитания в четырехсекционной антенной фазированной решетке с рабочей полосой пропускания октава. // Вестник воздушно-космической обороны. – 2024 – № 4 (44). С. 68-74.
9. Пшеничкин А. С., Климов К.Н. Твердотельное передающее устройство вторичного радиолокатора с коррекцией фаз суммируемых сигналов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2021. – № 1 (29). С. 83-91.
10. Карпухин С. А. Анализ возникновения побочных главных максимумов в широкополосных фазированных антенных решетках и методы их устранения // Вестник воздушно-космической обороны. 2023. № 2 (38). С. 77-80.
11. Патент № 2744210 РФ. Радиолокационная станция обнаружения малоразмерных целей. / Бендерский Г. П., Вылегжанин И. С., Вылегжанина О. В., Корнеев А. Н., Вовшин Б. М., Пушкин А. А.. Заявл. 07.08.2020 Опубликовано: 03.03.2021 г. Бюл. № 7.

## References

1. Patent for invention No. 2810947 (Russia). *Fazirovannaya antennaya reshetka chety`rexsektionnaya.* [Four-section phased antenna array.] Karpukhin S. A. Publ. 09.01.2024. H01Q 9/34 (2006.01). Bul. No. 1. (In Russian).
2. Karpukhin S. A. *Rasshirenie rabochego diapazona fazirovannoj antennoj reshetki metodom differenciacii polotna antenny` na poddiapazony`.* [Expansion of the operating range of a phased array antenna by differentiating the antenna web into sub-bands.] *Antennas.* No. 6. Pp. 58-68. (In Russian). 2024. DOI: <http://doi.org/10/18127/j03209601-202406-06>
3. Klimov K. N. *E`lectrodinamicheskoe modelirovanie antennogo polotna fazovogo pelengatora s rabochej polosoj chastot oktava.* [Electrodynamic modeling of the antenna web of a phase direction finder with an operating frequency band octave.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 2 (42). Pp. 39-54. 2024. (In Russian).
4. Klimov K. N. *E`lectrodinamicheskoe modelirovanie volnovodnoj priemnoj antenny s rabochej polosoj chastot oktava.* [Electrodynamic modeling of a waveguide receiving antenna with an octave operating frequency band.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 1 (29). Pp. 61-68. 2021. (In Russian).
5. Migalin M. M., Obukhovets V. A. Demshevsky V. V. *Vliyanie proizvodstvenny`x processov na xarakteristiki pechatny`x antenn I rezonatorov millimetrovogo diapazona dlin voln.* [The influence of production processes on the characteristics of printed antennas and resonators of the millimeter wavelength range.] *Antennas.* No. 4. Pp. 62-70. (In Russian). 2025. DOI: <http://doi.org/10/18127/j03209601-202504-06>
6. Konov K. I., Klimov K. N. *Snizhenie urovnya bokovy`x lepestkov diagrammy` napravленности linejnoj e`kvidistantnoj fazirovannoj antennoj reshetki.* [Reduction of the level of the side lobes of the radiation pattern of a linear equidistant phased array.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 1 (29), Pp. 69-76. 2021. (In Russian).
7. Kashin V. A., Khmelenko Y. A., Shurygin I. S. *Sintez upravoyaemyx nulej v diagramme napravlennosti ploskoj fazirovannoj antennoj reshetki s ispol`zovaniem parcial`ny`x diagram.* [Synthesis of controlled zeros in the radiation pattern of a flat phased array antenna using partial diagrams.] *Radio Engineering and Electronics.* vol.64, No. 8, pp.759-767. 2019. (In Russian)
8. Karpukhin S. A. *Raspredelenie e`lektropitaniya v chety`rexsektionnoj antennoj fazirovannoj reshetke s rabochej polosoj propuskaniya oktava.* [Distribution of power supply in a four-section phased array antenna with an octave operating bandwidth.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 4 (44). Pp. 68-74. 2024. (In Russian).
9. Pshenichkin A. S., Klimov K. N. *Tverdotel`noe peredayushee ustrojstvo vtorichnogo radiolokatora s korrekciej faz summiruemy`x signalov.* [Solid-state secondary radar transmitting device with phase correction of summed signals.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 1 (29). Pp. 83-91. 2021. (In Russian)
10. Karpukhin S. A. *Analiz vozniknoveniya pobochny`x glavnny`x maksimumov v shirokopолосny`x fazirovannu`x antenny`x reshatkax I metody` ix ustraneniya.* [Analysis of the occurrence of side main maxima in broadband phased antenna arrays and methods of their elimination.] *Bulletin of Aerospace Defense.* No. 2 (38). Pp. 77-80. 2023. (In Russian)
11. Patent for invention No. 2744210 (Russia). *Radiolokacionnaya stanciya obnaruzheniya malorazmerny`x celej.* [Radar station for detecting small targets.] Bendersky G. P., Vylegzhannin I. S., Vylegzhannina O. V., Korneev A. N. Vovshin B. M., Pushkov A. A. Application no. 08.07.2020 Published 03.03.2021. Bul. no. 7. (In Russian).

**Статья поступила 15 ноября 2025 г.**

### Информация об авторе

**Карпухин Станислав Анатольевич** – соискатель ученой степени кандидата технических наук, ведущий инженер. ПАО «НПО «Алмаз». Область научных интересов: радиолокация, устройства СВЧ. E-mail: SKarpukhin@inbox.ru.

Адрес: Россия, 141704, г. Долгопрудный, ул. Дирижабельная д. 28, кв. 65

## Four-section pyramidal phased array circular-view antenna with wide bandwidth

S. A. Karpukhin

**Annotation.** Currently, there is a need to create universal radar facilities operating at different frequencies capable of detecting unmanned aerial vehicles of various modifications and sizes, as well as requirements for these facilities to ensure the possibility of operational maintenance and repair in the field. Considering that modern radar equipment uses a modern element base, which includes active elements such as phase shifters, amplifiers, energy sources and storage devices, respectively, with an increase in the number of these elements, the number of failures and breakdowns of equipment increases as a result of the effects of the fields of these elements on the passive elements of the antenna. Thus, strict requirements are being imposed on these radar systems to ensure reliability and durability, which can be achieved by optimizing the distribution of power supply between antenna elements, which reduces the load on antenna elements, thereby increasing durability and motor life. It should be noted that in order to increase the operability of the antennas, it is proposed to use additional mechanical devices in the antenna circuit that duplicate the functions of the electrical elements in the event of a failure of the latter. All these issues can be solved by using modern devices such as controllers in the antenna, which allow you to programmatically change the antenna operation algorithms by powering a particular circuit, thereby reducing the current load on elements not currently involved in the antenna operation. The use of solid-state relays instead of electromechanical relays in the antenna circuit can significantly increase the durability of modern radar systems. Also in modern radars, rotary mechanisms are used to ensure an all-round view within 360°, ensuring the rotation of the antenna. These mechanisms must ensure combat operation for a sufficiently long period of time, which is fraught with failure of the devices providing rotation. To prevent such a situation, the article proposes an antenna design that provides an all-round view without using rotating means. **Purpose:** the study of the possibility of creating a universal phased array capable of covering a large range of operating frequencies, the design of which allows for the rapid dismantling of failed antenna sections, and the use of a modern element base allows optimizing the grid's power supply. **Methods:** electrodynamic modeling, mathematical calculations. **Novelty:** the novelty of the work lies in the fact that the proposed antenna design operates in the octave range, provides a circular view of space without the use of rotating devices, and the antenna design allows for quick dismantling of failed sections. **Results:** The result is that the proposed design will significantly reduce repair time and the extended frequency range will allow for the most accurate determination of the characteristics of unmanned aerial vehicles. **Practical relevance:** The presented design can be used in modern radar systems that perform various aerodynamic tasks.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, controller, circular view, phased antenna array.

### Information about the author

Karpukhin Stanislav Anatolievich – doctoral student, leading engineer. PAO NPO Almaz.  
Research interests: radar, microwave devices. E-mail: SKarpukhin@inbox.ru.  
Address: Russia, 141704, Dolgoprudny, Dirizhabelnaya, bild. 28, apt. 65.

### Для цитирования:

Карпухин С. А. Четырехсекторная пирамидальная фазированная антенна решетка кругового обзора с широкой рабочей полосой пропускания // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 84-93. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-84-93.

### For citation:

Karpukhin S. A. Four-section pyramidal phased array circular-view antenna with wide bandwidth. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 84-93 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-84-93.

**ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

УДК 623.612

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-94-98

**Модуль коммутации средств связи**

Гусеница Я. Н., Квасов М. Н., Ефремов А. В.

**Аннотация.** Постановка задачи: разработать технические решения на основе новой конструкции устройства для сопряжения портативной радиостанции «Азарт» с аппаратурой внутренней и внешней связи бронетанковой техники, обеспечивающего единый информационный контур между членами экипажа и штурмовыми подразделениями. Цель заключается в обеспечении единого информационного контура между членами экипажа бронетанковой техники и штурмовыми подразделениями. Используемые методы: анализа и синтеза, направленных на осмысление, обработку и интерпретацию эмпирических данных, а также измерений и эксперимента в лабораторных и полевых условиях. Новизна: состоит в разработке новой конструкции устройства, обеспечивающей сопряжение портативной радиостанции «Азарт» с аппаратурой внутренней и внешней связи бронетанковой техники. Результат: проведен анализ штатных средств связи бронетанковой техники, разработана принципиальная электрическая схема подключения модуля коммутации к системе связи бронетанковой техники, предложены варианты его исполнения в зависимости от типа электрических разъемов соединения кабеля от шлемофона и нагрудного переключателя командира экипажа. Практическая значимость заключается в разработке, изготовлении и апробации в реальных условиях устройства для сопряжения портативной радиостанции «Азарт» с аппаратурой внутренней и внешней связи бронетанковой техники, защищенным патентом на полезную модель, а также его использовании в подразделениях Вооруженных Сил Российской Федерации.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, ларингофонно-телефонная гарнитура, модуль коммутации, портативная радиостанция, радиосвязь, 3D-модель

**Актуальность**

Опыт проведения специальной военной операции (СВО) показывает, что до настоящего времени не утратило свое значение проведение атак хорошо укрепленных пунктов обороны противника штурмовыми подразделениями при поддержке бронетанковой техники (БТ). При этом для их успешного взаимодействия важна организация связи между штурмовыми подразделениями и экипажами БТ. В применяемой БТ используются штатные комплексы радиосвязи, например, Р-123, Р-173, Р-168. Вместе с тем, штурмовые подразделения оснащаются портативными цифровыми радиостанциями шестого поколения типа Р-187-П «Азарт» [1], которые в ходе СВО занимают особое место, так как с их помощью развернуты сети радиосвязи, позволяющие обеспечить непрерывное и скрытое управление при выполнении поставленных задач, а также оперативное реагирование на изменения обстановки на поле боя. Кроме того, радиостанции «Азарт» поступают в составе БТ.

Таким образом, задача сопряжения штатных средств внутренней и внешней связи БТ и вводимой в комплект связи портативной радиостанции «Азарт» является на сегодня актуальной.

**Постановка задачи**

Особенностью использования радиостанций «Азарт» на БТ на начальных этапах СВО стало их размещение на внешней стороне, как правило, на башне (рис. 1).

Это временное техническое решение позволяло исключить экранирование сигналов в процессе приемо-передачи и не дорабатывать антенну радиостанции, вынося ее из корпуса БТ.

Вместе с тем, недостатками указанного технического решения являются:

- в условиях повышенных акустических шумов невозможно вести переговоры с абонентом по радиостанции внутри БТ экипажам;
- входящие в комплект ряда исполнений радиостанции «Азарт» шлемофоны экипажами не используются ввиду наличия на борту штатных шлемофонов;



Рис. 1. Боевая машина пехоты БМП-3 с закрепленной на башне портативной радиостанцией «Азарт»

- размещение исключительно антенны радиостанции «Азарт» за пределами корпуса БТ вызывают трудности в практическом применении.

Таким образом, для сопряжения радиостанции «Азарт» с аппаратурой внутренней и внешней связи БТ требуется решение задачи по включению ее в существующий контур с возможностью обеспечения симплексного радиообмена с одновременной способностью переговоров между членами экипажа.

### Разработка модуля коммутации средств связи

Для решения задачи коммутации электрической схемы радиостанции и существующей электрической схемы связи БТ разработан модуль, который предназначен для обеспечения командира БТ и членов экипажа внутренней телефонной связью и внешней радиосвязью с абонентами как через штатные бортовые средства, так и радиостанцию «Азарт».

В штатное устройство сопряжения средств связи БТ, представляющее собой пульт управления (ПУ) с нагрудным переключателем командира экипажа и оснащенное тангентой переключения режима работы «вызов/передача» речевой информации, и шлемофона командира, дополнительно включен модуль коммутации. Этот модуль функционально и электрически связан с аппаратурой связи БТ и состоит из узла коммутации, соединительного кабеля и разъема подключения к портативной радиостанции. Узел коммутации снабжен двумя электрическими соединительными разъемами, расположенными на противоположных торцах узла, к одному из которых, выполненному в виде соединительной розетки подключается соединительный разъем от шлемофона командира экипажа, а к другому,льненному в виде соединительной вилки – нагрудный переключатель. Модуль коммутации подключается в разрыв между нагрудным переключателем и шлемофоном командира.

Конструкция разработанного модуля коммутации показана рис. 2-4, где обозначены: 1 – корпус узла коммутации; 2, 3 – розеточный и вилочный соединительные разъемы узла коммутации; 4 – вилочный соединительный разъем с кабелем 5 подключения к сети связи шлемофона командира экипажа; 6 – розеточный соединительный разъем нагрудного переключателя 7 с кабелем 8 подключения ПУ; 9 – кнопка переключения режима прием/ передача портативной радиостанции; 10 – корпус вилочного соединительного разъема модуля коммутации с кабелем 11 подключения к портативной радиостанции; 12, 13 – линии приема и передачи речевой информации сети связи мобильной техники соответственно; 14 – болт крепления разъема подключения модуля коммутации к портативной радиостанции; 15 – крепежные винты; 16 – шлемофон; 17 – радиостанция; 18 – тангента нагрудного переключателя.

На корпусе узла коммутации расположена кнопка подключения портативной радиостанции к электрической цепи передачи речевой информации с помощью ларингофонов шлемофона командира экипажа БТ, который передачу речевой информации по портативной радиостанции осуществляет через ларингофон шлемофона путем нажатия на нормально разомкнутую кнопку, а прием – при разомкнутой кнопке через наушники шлемофона.

При подключении модуля коммутации к устройству сопряжения через соединительные разъемы 2 и 4 узла коммутации 1 электрическая цепь (см. рис. 2) от динамика портативной радиостанции подключается к электрической цепи наушников шлемофона, а микрофон этой радиостанции через нормально разомкнутую кнопку 9 подключается к линии передачи информации ларингофонов шлемофона сети связи командира БТ. Корпуса узла коммутации 1 и разъема 10 подключения к радиостанции выполнены составными из двух элементов каждый и

изготавливаются из пластичного материала, например, путем 3D-печати из PETG-пластика, а также пыле- и влагозащищены слоем термоклея между их составными частями.

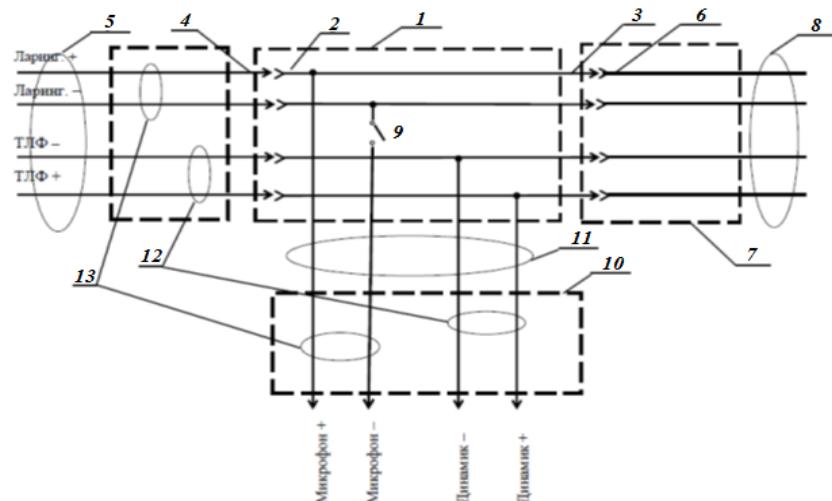


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема подключения модуля коммутации к системе связи мобильной техники (к устройству сопряжения)

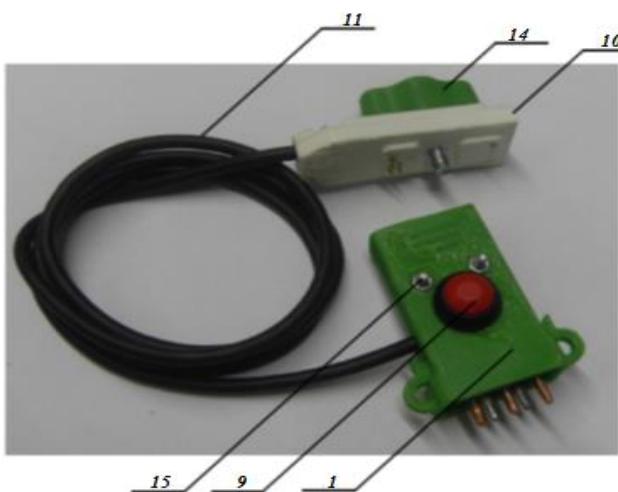


Рис. 3. Внешний вид модуля коммутации



Рис. 4. Общий вид модуля коммутации в сборе с щлемофоном и портативной радиостанцией

Крепление между собой двух составных пластиковых элементов разъема 10 осуществляют саморезами через сквозные отверстия, расположенные в углах разъема. Крепление разъема 10 к боковой панели портативной радиостанции осуществляют через сквозное отверстие невыпадающим болтом 14 с резьбой, соответствующей отверстию для подключения к радиостанции «Азарт» дополнительных устройств: пульта управления радиостанции, кабеля ввода данных, кабеля с *USB*-портом и т.п.

Сочлененные электрические разъемы 3 и 6, а также разъемы 2 и 4, нагрудный переключатель 7, корпус узла коммутации 1 модуля коммутации образуют единый узел, который размещается в ладони командира экипажа и позволяет ему связываться с абонентами по внешней и внутренней связи путем нажатия на тангенту 18 нагрудного переключателя 7 или с внешним абонентом по портативной радиостанции путем нажатия на кнопку 9.

Устройство работает следующим образом. При подключении узла коммутации 1 к разъемам 4, 6, соединяющим шлемофон 16 с нагрудным переключателем 7 командира экипажа, кнопка 9 разомкнута (рис. 2). Выбор канала внутренней или внешней связи командир экипажа осуществляет установкой галетного переключателя на ПУ в соответствующее выбранное положение. Затем командир экипажа осуществляет посылку звукового сигнала внутреннему или

внешнему абоненту путем перевода тангенты 18 (рис. 4) нагрудного переключателя 7 в положение вызова до ответа абонента. После ответа вызываемого абонента командир передает информацию членам экипажа или внешним абонентам путем перевода тангенты нагрудного переключателя 7 в положение «Передача (ПРД)». В нейтральном положении тангенты командир осуществляет прием информации от вызываемого абонента.

При необходимости передачи информации внешнему абоненту через переносную радиостанцию командир экипажа нажимает кнопку 9 и, удерживая ее, осуществляет передачу речевой информации. При ее отпускании через наушники шлемофона командира экипажа 16 осуществляется прием информации по линиям внутренней или внешней связи, в том числе и по каналу связи с внешним абонентом. По разработанному техническому решению модуля коммутации получен патент на полезную модель [2].

Основными достоинствами модуля коммутации устройства сопряжения являются:

- организация дополнительного канала связи командира экипажа БТ по портативной радиостанции связи «Азарт» со штурмовым подразделением при использовании одной ларингофонно-телефонной гарнитуры шлемофона командира в условиях высоких уровней акустических шумов;
- возможность быстрого монтажа и демонтажа модуля в устройство сопряжения связи БТ за счет использования сочленений трех электрических разъемов;
- обеспечение быстрого и удобного подключения командира экипажа БТ к дополнительному каналу связи для приема/передачи информации по портативной радиостанции внешнему абоненту путем нажатия кнопки на корпусе узла коммутации;
- надежная фиксации узла коммутации в местах сочленения электрических разъемов в единый узел с нагрудным переключателем и разъемом от шлемофона;
- простота изготовления корпусов составных частей модуля коммутации из полимерного пластика, их защищенность от пыли и влаги;
- невысокая стоимость готового модуля.

Данная конструкция устройства сопряжения средств связи БТ с модулем коммутации может применяться при введении в штатные средства связи портативной радиостанции «Азарт».

### **Выводы**

Разработанный и изготовленный модуль коммутации обеспечивает совместное использование экипажем бронетанковой техники внутренней телефонной и внешней радиосвязи, а также дополнительный канал связи с десантом по портативной радиостанции «Азарт» Р-187-П1 при использовании одной ларингофонно-телефонной гарнитуры шлемофона в условиях высоких уровней акустических шумов. В ходе разработки предложены несколько вариантов исполнения модуля коммутации в зависимости от типа электрических разъемов штатной связной аппаратуры бронетанкового средства.

### **Литература**

1. Тевс О. П., Пустошкин М. М. Моделирование тактики подразделений связи в условиях современного вооруженного противоборства // Телекоммуникации и связь. 2024. № 3. С. 5-13.
2. Морозов А. В., Гусеница Я. Н., Квасов М. Н., Ефремов А. В. Устройство сопряжения средств связи // Патент RU 235017 на полезную модель от 18.06.2025, бол. 17. 14 с.

### **References**

1. Tevs O. P., Pustoshkin M. M. Modelirovaniye taktiki podrazdelenii svyazi v usloviyakh sovremenennogo vooruzhennogo protivoborstva [Modeling of tactics of communication units in the conditions of modern armed confrontation]. Telekommunikatsii i svyaz, 2024, no. 3, pp. 5-13 (in Russian).
2. Morozov A.V., Gusevitsa Ya.N., Kvasov M.N., Efremov A.V. Ustroystvo sopryzeniy sredstv svyazy [Power supply for telephone set]. Patent Russia, no. 235017, 18.06.2025. (in Russian).

**Статья поступила 19 ноября 2025 г.**

### Информация об авторах

*Гусеница Ярослав Николаевич* – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела. Военный инновационный технополис «ЭРА». Область научных интересов: математическое и компьютерное моделирование сложных процессов и систем. Тел.: 8(495)693-30-99 (25-60). E-mail: era\_otd1@mil.ru

*Квасов Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела. Военный инновационный технополис «ЭРА». Область научных интересов: проектирование инфокоммуникационных систем. Тел.: 8(495)693-30-99 (21-83). E-mail: era\_otd1@mil.ru

*Ефремов Александр Васильевич* – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела. Военный инновационный технополис «ЭРА». Область научных интересов: оценка соответствия сложных технических систем. Тел.: 8(495)693-30-99. E-mail: era\_otd1@mil.ru. Адрес: Россия, 353456, г. Анапа, Краснодарский кр., Пионерский пр., д. 41.

### Commutation module for communication equipment

Ya. N. Gusenitsa, M. N. Kvasov, A. V. Efremov

**Abstract.** *Problem statement:* develop technical solutions of a new design for commutation “Azart” handheld radio with vehicle internal and external communication equipment to form a communication loop including both vehicle crewmembers and assault teams. *The purpose of the work:* organization of a communication loop including both vehicle crewmembers and assault teams. *Methodology:* analysis and synthesis aimed at comprehension, processing and interpretation of empirical data, as well as measurements in laboratory and field experiments. *Novelty:* a new design for a module, providing commutation of handheld “Azart” radio with vehicle internal and external communication equipment. *The results:* standard communication equipment of combat armored vehicles was analyzed. A new module was developed for commutation of standard communication equipment. Different variants of the commutation module were proposed for different connector types of the cable that connects headset and chest switch. *Practicality:* development, production and field testing of a module for commutation of handheld “Azart” radio with vehicle internal and external communication equipment, protected by utility model patent, and its usage by the Russian Federation Army units.

**Keywords:** radio communication, handheld radio, switching module, laringophone-telephone set, additive technologies, 3D-model

### Information about Authors

*Yaroslav Nikolaevich Gusenitsa* – Ph.D. of Engineering Sciences, head of research department. Federal State-Funded Autonomous Institution «Military innovative technopolis «ERA». Field of research: mathematical modeling of complex processes and systems. Tel.: +7(495)693-30-99 (25-60). E-mail: era\_otd1@mil.ru

*Mikhail Nikolaevich Kvasov* – Ph.D. of Engineering Sciences, deputy head of research department. Federal State-Funded Autonomous Institution «Military innovative technopolis «ERA». Field of research: IT system design. Tel.: +7(495)693-30-99 (21-83). E-mail: era\_otd1@mil.ru.

*Aleksandr Vasilievich Efremov* – Ph.D. of Engineering Sciences, researcher. Federal State-Funded Autonomous Institution «Military innovative technopolis «ERA». Field of research: estimating compliance of complex technical systems. Tel.: +7(495)693-30-99 (25-66). E-mail: era\_otd1@mil.ru. Address: Russia, 353456, Anapa, Krasnodar region, Pionerskiy pr., 41.

### Для цитирования:

Гусеница Я. Н., Квасов М. Н., Ефремов А. В. Модуль коммутации средств связи // Техника средств связи. 2025. № 4 (172). С. 94-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-94-98.

### For citation:

Gusenitsa Ya. N., Kvasov M. N., Efremov A. V. Commutation module for communication equipment. Means of communication equipment, 2025, no. 4 (172), pp. 94-98 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-4-94-98.

# **СПИСОК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ» В 2025 ГОДУ**

## **СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

**№№**

1(169)

Шаповалов Ф. А. Разработка дипольной антенны для диапазонов 2,4 и 5 ГГц

2(170)

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

3(171)

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А. Оценка дальности УКВ радиосвязи береговых служб с подвижными морскими объектами в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря

3(171)

Бобровский В. И., Сусликов Н. В., Кукунин Д. С., Журавель Е. П. Исследование дальности связи линии передачи цифровых сигналов на основе приемопередатчиков с модуляцией LoRa в условиях помех

3(171)

Турилов В. А. Определение параметров рельефа местности и характеристики тактических средств радиосвязи, позволяющих организовать скрытную сеть связи вблизи линии боевого соприкосновения

4(172)

Курочкин В. С., Колодяжный П. А. Оптимизация функционирования передовых пунктов технического обеспечения как фактор повышения эффективности системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления

4(172)

Акулов В. С., Угрин Л. Н., Петров А. Н. Приближенный метод расчета электромагнитных полей СДВ диапазона

4(172)

## **АНАЛИЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ СРЕДСТВ СВЯЗИ**

3(171)

Малышев С. А., Годняк А. В. Технология VDES: характеристики, перспективы развития в судоходстве России

## **ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

2(170)

Акулов В. С., Угрин Л. Н., Дяченко А. Н. Оценка вероятности трансформации двоичных кодов Хэмминга

3(171)

Маркин А. В., Иванов В. А., Конышев М. Ю., Иванов И. В. Классификация потоков, циркулирующих в сетях связи, по признакам распределения

двоичных комбинаций для решения задач оптимизации и портретизации трафика