



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

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

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

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

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:**

**Катанович А.А.** Главный научный сотрудник НИИ ОСИСВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ. Заслуженный работник связи РФ. Заслуженный изобретатель РФ  
**Кузичкин А.В.** Главный научный сотрудник Научно-исследовательского института телевидения Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ  
**Курносов В.И.** Главный специалист ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный работник связи РФ  
**Мирошников В.И.** Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ  
**Половинкин В.Н.** Научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ  
**Присяжнюк С.П.** Генеральный директор ЗАО «Институт телекоммуникаций». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ  
**Чуднов А.М.** Профессор кафедры Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Д.т.н., профессор  
**Яшин А.И.** Заместитель генерального конструктора – научный руководитель работ ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

**Винограденко А.М.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент  
**Габриэлян Д.Д.** ФНПЦ «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону). Д.т.н., профессор  
**Густов А.А.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор  
**Дорогов А.Ю.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент  
**Куприянов А.И.** Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). Д.т.н., профессор  
**Легков К.Е.** Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). К.т.н., доцент  
**Липатников В.А.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Макаренко С.И.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент  
**Минаков В.Ф.** Санкт-Петербургский государственный экономический университет (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Михайлов Р.Л.** Череповецкий военный ордена Жукова университет радиозлектроники (г. Череповец). Д.т.н.  
**Одоевский С.М.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Пашинцев В.П.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор  
**Путилин А.Н.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Федоренко В.В.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор  
**Финько О.А.** Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (г. Краснодар). Д.т.н., профессор  
**Цимбал В.А.** Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов). Д.т.н., профессор  
**Семенов С.С.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Саенко И.Б.** Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор  
**Стародубцев Ю.И.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.в.н., профессор  
**Титков И.В.** Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

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

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

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

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

**EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:**

**Katanovich A.A.** Chief Research Officer of the ISIS Institute of the Navy WUNCC Navy "N.G. Kuznetsov Naval Academy". Doctor of Technical Sciences, professor. Honored Inventor of the Russian Federation  
**Kuzichkin A.V.** Chief Research Officer of the Television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation  
**Kurnosov V.I.** Chief Specialist of PJSC "Inteltech". Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Communications of the Russian Federation  
**Miroshnikov V.I.** General Designer of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation  
**Polovinkin V.N.** Scientific Head of FSUE Krylovsky State Scientific Center, Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Worker of Science of the Russian Federation  
**Prisyazhnik S.P.** Director General of CJSC Institute telecommunications. Doctor of Technical Sciences, professor. Science Honored Worker of the Russian Federation  
**Chudnov A.M.** Department Professor of the Communications Military Academy named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenniy. Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Yashin A.I.** Deputy General Designer – Scientific Supervisor of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor. Science Honored Worker of the Russian Federation

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

**Vinogradenko A.M.** Military Academy of Communications (St. Petersburg) Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Gabrielyan D.D.** FNPC "Rostov-on-Don Scientific Radio Research Institute"(Rostov-On-Don). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Gustov A.A.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Military Sciences, Professor  
**Dorogov A.Y.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
**Kupriyanov A.I.** Moscow Aviation Institut (National Research Universit) Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Legkov C.E.** Military Space Academy of A.F. Mozhaiskiy (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Associate Professor  
**Lipatnikov V.A.** Military Academy of Communications (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Professor  
**Makarenko S.I.** PJSC "Inteltech" (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate 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 принт-макета: **Мамончикова А.С.**  
Дизайн обложки: **Шаутин Д.В.**  
Поддержка сетевой версии журнала: **Тюкинеева Л.В.**  
Секретарь редакции: **Михайлова Н.В.**

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



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

Решением ВАК № 222-р от 10.06.2024 научно-технический журнал «Means of communication equipment» («Техника средств связи») включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и рекомендован ВАК для публикаций основных результатов по научным специальностям:

- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);
- 2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки);
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

*Периодичность выхода журнала 4 номера в год.*

*Публикация в журнале является научным печатным трудом.*

*Основное содержание издания представляют собой научные статьи и научные обзоры.*

*Информация предназначена для детей старше 12 лет.*

*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)*

*Подписной индекс журнала «Техника средств связи» – 79656*

*Ссылки для оформления интернет-подписки на журнал:*

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Турилов В.А.

Пути обеспечения радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене

2

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Владыко А. Г., Нестеров А. А., Макаренко С. И.

Актуальные вопросы и перспективные направления обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов различного типа и базирования на основе технологии Robot-to-Everything

18

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А.

Математические модели процесса мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения

31

Гречишников Е. В., Федяев Ю. Ю., Гречишникова Т. А.

Модель мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, как объекта компьютерной разведки

42

Катанович А. А., Рыков Е. В., Цыванюк В. А., Густов А. А.

Имитационное моделирование помехозащищённых декаметровых каналов, функционирующих в режиме псевдослучайной перестройки радиочастоты

52

Морозов А. Н.

Обобщенная модель функционирования системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций

67

### СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А., Трапезников Р. В., Ахмедова И. М.

Разработка всенаправленной широкополосной wi-fi антенны в целях использования на беспилотных летательных аппаратах

74

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ.

#### СБОР, ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Васильев Н. В.

Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке

88

## CONTENTS

### INFORMATION SECURITY ISSUES

Turilov V. A.

Ways to ensure the electronic masking of electronic means in the tactical link

2

### ROBOTIC SYSTEMS

Vladyko A. G., Nesterov A. A., Makarenko S. I.

Current issues and promising directions for ensuring interoperability of robotic systems of various types and base placements based on Robot-to-Everything technology

18

### MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Bogovik A. V., Safiullov D. M., Schmidt A. A.

Mathematical models of the process of monitoring the technical condition of special-purpose radio equipment

31

Grechishnikov E.V., Fedyayev Yu.Yu., Grechishnikova T.A.

Model of Multiservice communication networks using the Resources of the European Economic Area of the Russian Federation as an object of computer intelligence

42

Katanovich A. A., Rykov E. V., Tsyvanyuk V. A., Gustov A. A.

Simulation of noise-proof decameter channels operating in the mode of frequency-hopping spread spectrum

52

Morozov A. N.

A generalized model of the functioning of the electric power supply system for portable and portable radio stations

67

### COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Plotnikov M. Y., Islamov A. I., Ilmer D. V., Shapovalov F. A., Trapeznikov R. V., Akhmedova I. M.

Development of an omnidirectional broadband wi-fi antenna for use on unmanned aerial vehicles

74

### INFORMATION PROCESSES AND TECHNOLOGIES.

#### COLLECTION, STORAGE AND PROCESSING OF INFORMATION

Buravlev A. S., Demidova D. E., Vasiliev N. V.

Approach to Identification of Elements of Business Process Models from Natural Language Texts

88

**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

**ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.37

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-2-17

**Пути обеспечения радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене**

Турилов В. А.

**Аннотация. Актуальность:** в тактическом звене управления в условиях применения противником современных средств радиоразведки, радиотехнической разведки, радиоэлектронного противодействия и высокоточного оружия, одно из главных требований, предъявляемых к радиоэлектронным средствам, являющимся источниками излучения радиосигналов, состоит в обеспечении максимальной скрытности их функционирования. В связи с чем, **целью работы** является формирование методики оценки степени затухания радиосигналов на трассах между радиоэлектронными средствами связи и управления и космическими, воздушными, наземными и переносными (носимыми) комплексами радиотехнической разведки противника при использовании для радиоэлектронной маскировки особенностей рельефа местности и препятствий на земной поверхности. **Методы:** методика сформирована на основе подходов, изложенных в Рекомендациях МСЭ-R и содержит основные теоретические положения для проведения расчетов. Методика **предназначена** для определения состава и содержания мероприятий радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене с целью предотвращения выявления их местоположения противником. Приводятся **результаты** выполненных расчетов для конкретного примера функционирования радиоэлектронных средств связи и управления и комплексов радиотехнической разведки противника в тактическом звене. **Практическая значимость** работы заключается в том, что сформированная методика оценки степени затухания радиосигналов на трассе между радиоэлектронным средством связи и управления и комплексами радио- радиотехнической разведки противника позволяет для конкретных технических характеристик функционирующего радиоэлектронного средства, а также климатических и географических условий их расположения определить необходимый состав и содержание мероприятий радиоэлектронной маскировки с целью предотвращения выявления противником местоположения радиоэлектронного средства, в том числе и в полевых условиях.

**Ключевые слова:** затухание радиосигнала; радиоэлектронные средства связи и управления; радио и радиотехническая разведка; радиоэлектронная маскировка.

**Введение**

Своевременность получения и полнота оперативной информации о текущей обстановке на поле боя, глубина анализа этой обстановки и оперативность принятия командных решений по управлению подчиненными и взаимодействующими подразделениями в ходе боевых действий в тактическом звене во многом зависит от характеристик используемых в войсках радиоэлектронных средств (РЭС) связи и управления, в том числе обеспечиваемой дальности и скорости передачи информации по каналам связи [1].

В тактическом звене в условиях применения противником современных средств радиоразведки (РР), радиотехнической разведки (РТР), радиоэлектронного противодействия (РЭП) и высокоточного оружия (ВТО), одно из главных требований, предъявляемых к радиоэлектронным средствам связи, являющимся источниками излучения радиосигналов, состоит в обеспечении максимальной скрытности их функционирования.

### 1. Комплексы радио- и радиотехнической разведки, применяемые противником в тактическом звене

Основываясь на опыте проведения военных операций в Ираке, Афганистане и других регионах вооруженные силы западных стран значительное внимание уделяют программам развития и внедрения в войсках комплексов радио-, радиотехнической разведки (РРТР), способных обнаруживать противника, обрабатывать и распределять необходимую информацию для уничтожения сил противника еще до вступления с ним в непосредственное соприкосновение [2-4]. При этом, в тактическом звене, как правило, одновременно действуют космические системы (КС), воздушные системы (ВС), мобильные наземные системы радиоперехвата и пеленгования на гусеничной или колесной базе (НС) и переносные (носимые) тактические станции (ПС) РРТР противника.

В научно-технической литературе опубликовано достаточно много разнородной оценочной информации о технических характеристиках КС РРТР потенциального противника, установленных на искусственных спутниках земли (ИСЗ), запущенных в рамках программ «*Ferret*» (типа «*Ferret-D*»), «*White Cloud*» (типа «*SSU*», «*SSU-2*», «*SSU-3*», «*SSU-4*», «*Intruder*»), «*Chalet – Vortex*» (типа «*Rhyolite*», «*Chalet*», «*Vortex*», «*Mercury*»), «*Aquacade*» (типа «*Magnum*», «*Orion*», «*Mentor*»), «*Jumpseat*» (типа «*Jumpseat-2*», «*Jumpseat-3*», «*Trumpet*»). В табл. 1 представлены некоторые характеристики таких КС РРТР [5-7].

Таблица 1 – Характеристики космических систем РРТР (на основе анализа работ [5-7])

№ п/п	Наименование КС РРТР Характеристики	ИСЗ РТР программы « <i>Ferret</i> »	ИСЗ РТР программы « <i>White Cloud</i> »	ИСЗ РР программы « <i>Chalet – Vortex</i> »	ИСЗ РРТР программы « <i>Aquacade</i> »	ИСЗ РРТР программы « <i>Jumpseat</i> »	
		III	IV	V	VI	VII	
1.	Диапазон РРТР, МГц	30-80000	50-40000	45-25000	150-20000	50-40000	
2.	Высота ведения РРТР, км	700-800	1100	32000-41000	34500-36000	10000-39000	
3.	Чувствительность приемника комплекса РРТР $P_{\text{ПР}}$ , дБВт/Гц	-195	-195	-198	-195	-195	
4.	Средний коэффициент усиления антенны комплекса РРТР $G_A$ , дБ	СМВ	4	4	65	65	45
		МВ			15	15	12

Перспективный уровень технических характеристик КС РРТР потенциального противника может быть спрогнозирован на основе того факта, что при их создании зарубежные компании традиционно используют схемные и технические решения, прошедшие проверку в ВС РРТР стратегического и оперативно-тактического назначения [8]. Таким образом, следует ожидать, что технические характеристики КС РРТР в прогнозируемый период будут, как минимум, не хуже, чем у ВС РРТР.

К настоящему времени за рубежом создан достаточно широкий спектр ВС РРТР стратегического и оперативно-тактического назначения на базе пилотируемых разведывательных самолетов типа *RC-135W «Rivet Joint»*, *EC-130H CompassCall*, осуществляющих РР в диапазоне от 3 МГц до 18 ГГц и РТР в диапазоне 0,5-40 ГГц, а также беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа *RQ-4 «Global Hawk»*, *MQ-1C Grey Eagle*, *EADS Talarion*, осуществляющих РРТР в диапазоне частот 1,8-18 ГГц. Разведка, как правило, ведется на высоте от 3 до 22 км с минимальным удалением от линии соприкосновения войск в 50-100 км. Некоторые характеристики ВС РРТР представлены в табл. 2 [1, 2].

Таблица 2 – Характеристики воздушных систем РРТР (на основе анализа работ [1, 2])

№ п/п	Наименование ВС РРТР Характеристики	ES-5000	AN/ALQ-61	WJ-1740	LR-100 (БПЛА)	FASTHAT
		III	IV	V	VI	VII
1.	Диапазон РРТР, МГц	500-40000	80...18000	30...40000	2000...18000	500...18000
3.	Чувствительность приемника ВС РРТР, дБВт/Гц	н/д	190	179-195	н/д	н/д

Производители постоянно совершенствуют воздушные системы РРТР. Согласно прогнозу к 2030 году ожидается, что ВС РТР будут вести разведку в диапазоне частот 0,7-160 ГГц в тактической авиации и в диапазоне частот 0,25-160 ГГц в стратегической авиации с чувствительностью приемников -190 дБВт/Гц. К этому же сроку прогнозируется, что ВС РР будут вести разведку в диапазоне частот от 0,03 МГц до 100 ГГц с чувствительностью приемников -150 – -180 дБВт/Гц [5]. Учитывая современные темпы развития радиоэлектроники, можно ожидать дальнейшего повышения уровня технических характеристик ВС и КС РРТР, в частности, значение чувствительности приемников в диапазоне частот от 0,03 МГц до 160 ГГц может достигнуть значения -200 дБВт/Гц [1].

НС и ПС РРТР, стоящие в настоящее время на вооружении подразделений тактического звена сухопутных войск (СВ) армии США, предназначены для ведения разведки на глубину до 20-30 км за линией соприкосновения войск, при этом должны обеспечивать сопряжение с тактическими ВС РРТР [9].

Наиболее распространена в подразделениях тактического звена СВ армии США мобильная НС РРТР и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) *Prophet* различных поколений. Современный воздушно-наземный комплекс серии *AN/MLQ-44B(V)1 Prophet Enhanced (PE)* (*General Dynamics Mission Systems Inc.*) состоит из двух подсистем:

1) наземная подсистема на основе территориально-распределенной группировки комплексов РРТР, размещаемых на автомобилях типа *HMMWV*, несущих дежурство в тылу своих войск на удалении в 4-6 км от линии соприкосновения войск. Наземная подсистема РРТР ведет разведку в диапазоне частот 20-15000 МГц и имеет чувствительность приемника от 0,5 мкВ/м для узкополосных сигналов до 5,0 мкВ/м для широкополосных сигналов [3];

2) воздушная подсистема ведет РР в диапазоне частот 0,5-18 ГГц, а РТР – в диапазоне 0,5-40 ГГц, имеет чувствительность приемников РРТР порядка -195 дБВт/Гц и может включать в свой состав [1, 3]:

- пилотируемые разведывательные самолеты типа *Bombardier EO-5C* с комплексом радио-, радиотехнической разведки *AN/ASQ-223 (ARL-M COMINT/IMINT System «Crazy Hawk»)*, *Beechcraft RC-12P «Guardrail»* со специальной разведывательной системой *AN/USD-9 «Improved Guardial V»* или др., предназначенные для ведения разведки на высоте от 3000 до 7000 м на удалении 50-100 км от линии соприкосновения войск;
- вертолеты типа *Bell EH-1H* с комплексом РЭБ *AN/ARQ-33 «Quick Fix I»*, *Sykorsky EH-60A* с комплексом РЭБ *AN/ALQ-151 Quick Fix II* или др., предназначенные для ведения разведки на удалении 4-8 км от линии соприкосновения войск на высоте 60-180 м;
- тактические разведывательные БПЛА типа *Northrop Grumman RQ-5A Hunter*, *RQ-7A Shadow 200 (AAI Corp.)*, предназначенные для ведения разведки на удалении 5-15 км от линии соприкосновения войск на высоте до 3000 м.

Известны также эксплуатируемые в СВ армии США станции радиоэлектронной разведки типа *MRD 3000 (w2 и w5) Poligon*, предназначенные для ведения РРТР в диапазоне

от 0,1 до 3000 МГц с чувствительностью системы не хуже -145 дБВт, перспективная интегрированная система борьбы со средствами управления противника *WolfPack*, предназначенная для ведения РРТР в диапазоне 20-15000 МГц, состоящая из распределенных на местности автономных малогабаритных приемо-передающих устройств (МППУ), интегрированных в единую сеть [7, 9].

В подразделениях РЭБ вооруженных сил западных стран в настоящее время широко используются ПС РРТР, предназначенные для ведения разведки непосредственно на линии соприкосновения войск, в тылу противника или для выявления диверсионно-разведывательных групп противника в собственном тылу. Примерами таких ПС РРТР могут служить:

1) широкополосный тактический пеленгатор *TRC 6200 (Thales)*, предназначенный для обнаружения и определения местоположения источников радиоизлучения в диапазоне от 9 кГц до 6 ГГц (в зависимости от применяемой антенны) с чувствительностью -155 дБВт;

2) портативный пеленгатор *DDF007 (Rohde & Schwars)* для ведения мониторинга спектра [10], чувствительность которого определяется типом 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;

– от 2 до 8 мкВ/м – в диапазоне от 3 до 6 ГГц;

3) портативный пеленгатор *PR200 (Rohde & Schwars)* для ведения мониторинга спектра в диапазоне от 8 кГц до 8 ГГц (с возможностью расширения диапазона до 20 или 33 ГГц путем подключения дополнительной портативной направленной антенны с понижающим преобразователем) [11].

Промышленностью выпускаются и многие другие НС РРТР. Совершенствование технических характеристик НС и ПС РРТР потенциального противника ведется непрерывно на основе достижений электронной промышленности. Следует ожидать достижение значений чувствительности их приемников на уровне не ниже, чем у ВС и КС РРТР.

## 2. Условия обнаружения РЭС связи и управления комплексами РРТР противника в тактическом звене

Условие выявления комплексами РРТР радиоизлучения РЭС связи и управления выглядит следующим образом:

1) если чувствительность приемника комплекса РРТР выражена в единицах плотности мощности радиосигнала:

$$P_{РЭС}' > S_{РРТР}, \quad (1)$$

где:  $P_{РЭС}'$  – плотность мощности радиосигнала радиоэлектронных средств, поступающего на приемную антенну комплекса РРТР, дБВт/Гц;  $S_{РРТР}$  – чувствительность комплекса РРТР, дБВт/Гц.

2) если чувствительность приемника комплекса РРТР выражена в единицах напряженности поля радиосигнала:

$$E_{РЭС}' > S_{РРТР}, \quad (2)$$

где:  $E_{РЭС}'$  – напряженность поля радиосигнала радиоэлектронных средств, поступающего на приемную антенну комплекса РРТР, дБ(мкВ/м);  $S_{РРТР}$  – чувствительность комплекса РРТР, дБ(мкВ/м).

Значение чувствительности  $S_{РРТР}$  в выражениях (1) и (2) зависит от чувствительности приемника  $S_{ПР РРТР}$  и коэффициента усиления приемной антенны  $G_{РРТР}$ :

$$S_{\text{РРТР}} = S_{\text{ПР РРТР}} - G_{\text{РРТР}} . \quad (3)$$

Для проверки условия (1) вычисляют значение плотности мощности радиосигнала  $P_{\text{РЭС}}'$ , поступающего на приемную антенну комплекса РРТР:

$$P_{\text{РЭС}}' = 10 \lg(p_{\text{ПРДРЭС}}) + G_{\text{РЭС}} - 10 \lg(dF) - 60 - L_b , \quad (4)$$

где:  $P_{\text{ПРДРЭС}}$  – мощность передатчика РЭС, Вт;  $G_{\text{РЭС}}$  – коэффициент усиления антенны передатчика РЭС, дБ;  $dF$  – ширина полосы радиосигнала (МГц);  $L_b$  – полное ослабление радиосигнала на радиотрассе от передающей антенны радиоэлектронного средства до приемной антенны комплекса РРТР, дБ, которое в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R Р.341-7 «*The concept of transmission loss for radio links*» складывается из двух составляющих:

$$L_b = L_{bf} + L_m , \quad (5)$$

где:  $L_{bf}$  – основные потери при передаче в свободном пространстве;  $L_m$  – дополнительные потери по отношению к передаче в свободном пространстве.

В Рекомендации МСЭ-R Р.525-4 «Расчет ослабления в свободном пространстве» стандартизирована формула для вычисления основных потерь при передаче в свободном пространстве:

$$L_{bf} = 20 \lg(F) + 20 \lg(D_T) - 27,558 , \quad (6)$$

где:  $D_T$  – длина радиотрассы от передающей антенны РЭС до приемной антенны комплекса РРТР, м;  $F$  – несущая частота радиосигнала, МГц.

Рекомендация МСЭ-R Р.619-5 «Данные о распространении радиоволн, необходимые для определения помех между станциями, находящимися в космосе и на поверхности Земли» определяет следующие слагаемые дополнительных потерь по отношению к передаче в свободном пространстве:

$$L_m = A_g + A_{xp} + A_{bs} + A_s + L_{dtb} , \quad (7)$$

где:  $A_g$  – затухание радиосигнала вследствие поглощения радиоволн атмосферными газами. Методика вычисления  $A_g$  изложена в Рекомендации МСЭ-R Р.676-13 «Ослабление атмосферными газами и связанные с этим эффекты»;

$A_{xp}$  – ослабление, вызванное изменением угла поляризации радиосигнала из-за фарадеевского вращения и/или рассеяния гидрометеорами;

$A_s$  – ослабление радиосигнала из-за ионосферного или тропосферного мерцания;

$A_{bs}$  – ослабление из-за рефракции (расширения) луча радиосигнала в атмосфере;

$L_{dtb}$  – затухание радиосигнала вследствие дифракционных/волноводных потерь из-за особенностей рельефа местности и/или конкретных препятствий на земной поверхности в виде лесных массивов, зданий, сооружений и т.п.

Для проверки условия (2) значение напряженности поля  $E_{\text{РЭС}}'$ , поступающего на приемную антенну комплекса РРТР, вычисляют в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R Р.525-4:

$$E_{\text{РЭС}}' = 10 \lg(p_{\text{ПРД РЭС}}) + G_{\text{РЭС}} - 20 \lg(D_T) + 134,771 - L_m . \quad (8)$$

### 3. Методика оценки степени затухания радиосигналов на трассе между РЭС связи и управления и комплексами РРТР при использовании для радиоэлектронной маскировки особенностей рельефа местности и препятствий на земной поверхности

На рис. 1 схематически изображено расположение комплексов РРТР, которые могут применяться противником в тактическом звене, и РЭС связи и управления. На рисунке используются следующие обозначения:

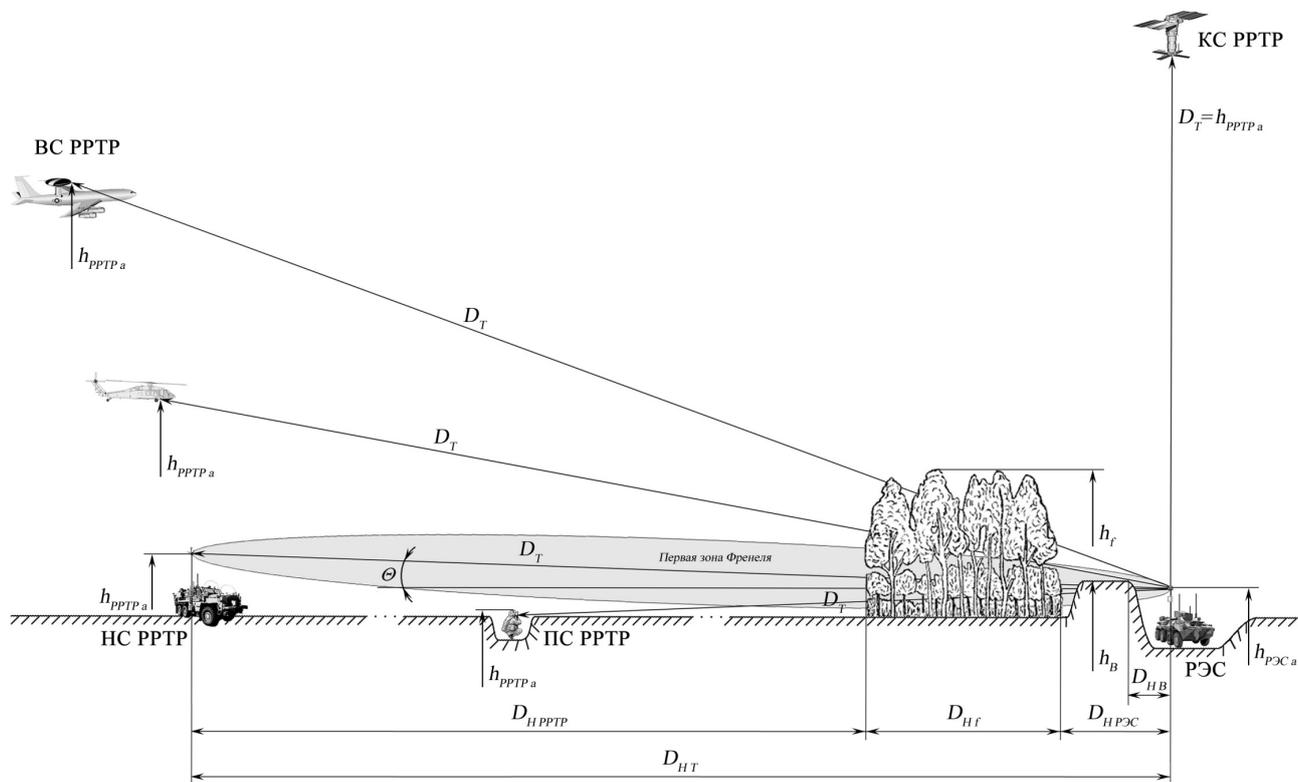


Рис. 1. Комплексы РРТР в тактическом звене

$h_{РЭСa}$  – высота передающей антенны РЭС, м;

$h_{РРТР a}$  – высота приемной антенны комплекса РРТР<sup>1</sup>, м;

$h_B$  – высота самого значительного препятствия на радиотрассе между РЭС и комплексом РРТР, м;

$h_f$  – высота лесного массива на радиотрассе между радиоэлектронным средством и комплексом РРТР, м;

$D_{HT}$  – длина по горизонтали радиотрассы от передающей антенны РЭС до приемной антенны комплекса РРТР, м:

$$D_{HT} = 2R_3 \sin(D_{C\phi}/2R_3), \tag{9}$$

где:  $D_{C\phi}$  – кратчайшее расстояние между передающей антенной радиоэлектронного средства и приемной антенной комплекса РРТР по сферической поверхности Земли, средний радиус  $R_3$  которой составляет 6371008,7714 м. При  $D_{C\phi} = 100$  км разница между  $D_{C\phi}$  и  $D_{HT}$

<sup>1</sup> Для ВС и КС РРТР значение  $h_{РРТРa}$  может быть принято равным 0.

составляет  $\sim 1$  м, т. е. для приблизительных расчетов для расстояний до 100 км можно принять  $D_{HT} \approx D_{C\phi}$ ;

$D_{Hf}$  – длина по горизонтали отрезка радиотрассы в лесном массиве, м;

$D_{HB}$  – длина по горизонтали отрезка радиотрассы от передающей антенны РЭС до самого значительного препятствия на радиотрассе, м;

$D_{HRЭС}$  – длина по горизонтали отрезка радиотрассы от передающей антенны РЭС до лесного массива, м;

$D_{HRПТР}$  – длина по горизонтали отрезка радиотрассы от лесного массива до приемной антенны комплекса РПТР, м;

$\Theta$  – угол места между лучом радиотрассы от РЭС до комплекса РПТР и горизонтальной плоскостью, град<sup>2</sup>:

$$\Theta = \arctg((h_{PPTP\ a} - h_{PЭС\ a})/D_{HT}) . \tag{10}$$

С помощью значений длин соответствующих отрезков радиотрассы по горизонтали и угла места вычисляются другие параметры радиотрассы:

$D_T$  – длина радиотрассы от передающей антенны РЭС до приемной антенны комплекса РПТР:

$$D_T = D_{HT}/\cos(\Theta) ; \tag{11}$$

$D_{TB}$  – длина отрезка радиотрассы от передающей антенны РЭС до самого значительного препятствия на радиотрассе;

$D_{TRЭС}$  – длина отрезка радиотрассы от передающей антенны РЭС до лесного массива;

$D_{Tf}$  – длина отрезка наклонной радиотрассы в лесном массиве;

$D_{TRПТР}$  – длина отрезка наклонной радиотрассы от лесного массива до приемной антенны комплекса РПТР.

В настоящей работе для проверки расчетов затухания радиосигнала на радиотрассе между РЭС и комплексами РПТР приняты следующие условия:

- расчеты выполняются для летнего сезона с ясной погодой;
- типы радиосигналов, их несущая частота и ширина полосы представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Типы радиосигналов, их несущая частота и ширина полосы

№ п/п	Тип радиосигнала	Несущая частота, МГц	Ширина полосы, МГц
1	УКВ радиостанция	44; 108	0,0031
2	Lora	433; 864	0,125
3	GSM	900; 1800	0,2
4	UMTS (3G)	900; 2100	5
5	LTE (4G)	800; 1800; 2600	1,4; 3; 5; 10; 15; 20
6	WiMax	2400; 3500; 5600	1,25; 10; 20
7	WiFi	2400; 5160; 6000	20; 40; 80

- диапазон изменения мощности передатчиков РЭС составляет от 0,1 до 2,0 Вт;
- РЭС имеют направленные антенны, главный лепесток диаграммы направленности которых направлен в сторону, противоположную от линии соприкосновения войск;
- коэффициент усиления антенны радиоэлектронных средств по боковым и обратному лепесткам диаграммы направленности в направлении комплексов РПТР не превышает 5 Дб;

<sup>2</sup> Для КС РПТР в рассматриваемом примере значение  $\Theta = 90^\circ$ .

- КС РРТР ведет разведку с высоты 32000 км и расположена непосредственно над РЭС (в зените);
- ВС РРТР ведет разведку с расстояния 100 км до линии соприкосновения войск на высоте 12 км;
- НС РРТР ведет разведку с расстояния 4 км от РЭС, примерно на одной высоте над уровнем моря с РЭС;
- ПС РРТР ведет разведку с расстояния 1 км от РЭС, примерно на одной высоте над уровнем моря с РЭС;
- чувствительность приемников КС и ВС РРТР составляет -200 дБВТ/Гц;
- коэффициент усиления приемной антенны КС РРТР в МВ диапазоне составляет 15 дБ, в ДМВ диапазоне – 40 дБ, в СМВ диапазоне – 65 дБ;
- коэффициент усиления приемной антенны ВС РРТР равен 40 дБ;
- чувствительность приемника НС РРТР составляет 5 мкВ/м;
- коэффициент усиления приемной антенны НС РРТР равен 40 дБ;
- чувствительность приемника ПС РРТР (с учетом коэффициента усиления антенны) составляет 1 мкВ/м в диапазоне от 50 МГц до 3 ГГц и 2 мкВ/м в диапазонах 20 до 50 МГц и свыше 3 ГГц.

Для этих условий ослаблением радиосигнала в газах атмосферы  $A_g$  и ослаблением из-за деполяризации  $A_{xp}$ , рефракции в атмосфере  $A_{bs}$ , ионосферного или тропосферного мерцания  $A_s$  можно пренебречь ввиду их относительно малых значений.

Главными же факторами, влияющими в рассматриваемых условиях на ослабление радиосигнала вследствие дифракционных/волноводных потерь  $L_{dtb}$ , будут служить особенности рельефа местности и препятствия на земной поверхности в виде лесных массивов, зданий, сооружений и т. п.

Целенаправленное изменение именно этого слагаемого в формуле (7) может послужить основой для формирования специальных приемов радиоэлектронной маскировки (РЭМ), заключающихся в повышении энергетической скрытности маскируемых излучающих объектов за счет ослабления радиосигналов РЭС, поступающих на вход приемников комплексов РРТР противника, до уровня, исключающего выявление этими средствами местоположения РЭС [12].

Изучению влияния различных препятствий на степень затухания радиосигналов различных диапазонов волн посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Результаты части таких исследований положены в основу ряда Рекомендаций Серии Р Сектора радиосвязи МСЭ-R.

На практике, при наличии возможности, предпочтительно обеспечивать РЭМ за счёт пассивного ухудшения условий распространения электромагнитной энергии в сторону комплексов РРТР противника путем использования естественных особенностей рельефа местности с максимальным перекрытием первой зоны Френеля на радиотрассе, направленной в сторону противника, и лесных массивов.

В качестве упрощенного примера использования особенностей рельефа местности и препятствий на земной поверхности для РЭМ РЭС с целью предотвращения выявления их местоположения комплексами РРТР противника на рис. 1 представлены радиотрассы от РЭС связи и управления до комплексов РРТР противника с частичным перекрытием первой зоны Френеля естественным или искусственным (специально возведенным) радионепроницаемым препятствием высотой со стороны противника  $h_B = 4,2$  м и с прохождением радиотрассы через придорожную лесополосу шириной по горизонтали  $D_{Hf} = 25$  м и высотой  $h_f = 15$  м. Препятствием для распространения радиоволн от РЭС в направлении комплексов РРТР противника может служить железнодорожная или автодорожная насыпь, террикон, холм,

лакколит, перепад высот рельефа местности и т. п. В качестве дополнительного препятствия для распространения радиоволн могут возводиться ограждения из радиопоглощающего материала.

Для рассматриваемого примера ослабление радиосигнала вследствие дифракционных/волноводных потерь из-за особенностей рельефа местности и/или конкретных препятствий на земной поверхности можно представить выражением:

$$L_{dtb} = A_d + L_{veg}, \quad (12)$$

где:  $A_d$  – дифракционное затухание из-за полного или частичного сужения просвета в первой зоне Френеля радиотрассы;  $L_{veg}$  – ослабление радиосигнала из-за прохождения радиотрассы через лесной массив.

Рекомендация МСЭ-R P.530-17 «Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости» определяет следующую формулу приблизительного вычисления значения дифракционных потерь из-за полного или частичного сужения просвета в первой зоне Френеля для усредненной местности:

$$A_d = -20 \frac{h_{\text{PЭC a}} + D_{H B} \text{tg}(\Theta g - h_B)}{R_{Fr}} + 10, \quad (13)$$

где:  $R_{Fr}$  – радиус первой зоны Френеля в точке пересечения трассы и препятствия, вычисляемое по формуле:

$$R_{Fr} = 17,39 \sqrt{\frac{D_{TB}(D_T - D_{TB})}{D_T F}}. \quad (14)$$

Формула (13) справедлива, если,  $A_d > 15$  дБ, т. е. выполняется условие:

$$h_B > h_{\text{PЭC a}} + D_{H B} \text{tg}(\Theta g + \frac{R_{Fr}}{4}). \quad (15)$$

Максимальное ослабление распространения радиосигнала в сторону комплексов РРТР противника за счет дифракции может быть обеспечено при перекрытии первой зоны Френеля более, чем на 60 %.

Отечественными и зарубежными исследователями разработано значительное количество математических моделей распространения радиосигналов в лесных массивах, каждая из которых относится к одному из классов: детерминированные (*DMM*), статистические (*SMM*), полустатистические (*SSMM*), полудетерминированные (*SDMM*), полуэмпирические (*SEMM*) и эмпирические (*EMM*) [13].

Детерминированные модели используют уравнения Максвелла, совместно с законами отражения и дифракции. Статистические модели используют результаты серий измерений и данные о средних потерях для различных типов радиолиний с целью формирования различных статистических приближений. Эмпирические модели представляют собой уравнения, сформированные на основе результатов серий измерений.

Сектором радиосвязи МСЭ-R принята Рекомендация P.833-10 «Ослабление сигналов растительностью», содержащая несколько статистических и эмпирических моделей распространения в лесном массиве радиосигналов частотой от 30 МГц до 100 ГГц. В соответствии этой Рекомендацией общее ослабление радиосигнала  $L_{veg}$  при прохождении через лесной массив определяется комбинацией затухания при сквозном распространении радиоволны через лесной массив в направлении приемника и затухания из-за дифракции радиосигнала на краях элементов растительности:

$$L_{veg} = -10 \lg(10^{-\frac{L_f}{10}} + 10^{-\frac{L_{dif}}{10}}), \quad (16)$$

где:  $L_f$  – ослабление радиосигнала при сквозном распространении радиоволны через растительный массив;  $L_{dif}$  – ослабление из-за дифракции радиосигнала на краях элементов растительности.

Одна из моделей Рекомендации Р.833-10, учитывающая сезонные характеристики растительности, может применяться как для наземных ( $\Theta \approx 0^\circ$ ), так и для наклонных радиотрасс ( $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ ), в т. ч. от РЭС до КС, ВС, НС и ПС РРТР, находящихся над поверхностью Земли. В соответствии с данной моделью затухание радиосигнала из-за прохождения радиотрассы через растительный массив вычисляется по следующей эмпирической формуле:

$$L_f = AF^B \lg(D_{Tf})(\Theta + E)^G - 4, \quad (17)$$

где:  $B = (0,30281 - 0,003624k_h)(F/1000)^{(0,0013118 - 0,026236k_h)}$ ;

$k_h = |\text{месяц} - 6,5|$  – для Северного полушария;

$k_h = 6 - |\text{месяц} - 6,5|$  – для Южного полушария;

месяц – номер месяца в году от 1 до 12;

$A$ ,  $E$  и  $G$  – параметры, определенные эмпирическим путем и представленные в табл. 4.

Таблица 4 – Параметры, определенные эмпирическим путем

Тип деревьев	$A$	$E$	$G$
Кедр японский	1,87	0,01	-0,12
Можжевельник кенийский	1,5	0,01	-0,12

При расчете ослабления из-за дифракции на краях элементов растительности лесного массива, расположенного на радиотрассе от радиоэлектронного средства до комплекса РРТР, этот лесной массив рассматривается в Рекомендации МСЭ-R Р.833-10 как двойное изолированное клиновидное препятствие шириной  $D_{Hf}$ . В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R Р.526-15 «Распространение радиоволн за счет дифракции» представленные ниже формулы для расчета ослабления справедливы, если значение  $\Theta$  меньше примерно  $12^\circ$ .

Рекомендация МСЭ-R Р.2001-4 «Универсальная модель наземного распространения радиоволн для широкого применения в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц» устанавливает следующий алгоритм вычисления приблизительного значения потерь Френеля-Кирхгофа на таком препятствии  $J(v)_{РЭС}$  и  $J(v)_{РРТР}$ .

Сначала вычисляют значения безразмерных параметров  $v$ :

$$v_{РЭС} = (h_f - h_{РЭСa}) \left(1 - \frac{D_{HРЭС}}{D_{HРЭС} + D_{Hf}}\right) \sqrt{\frac{2f \left(\frac{1}{D_{TРЭС}} + \frac{1}{D_{Tf}}\right)}{299792458}}; \quad (18)$$

$$v_{РРТР} = (h_f - h_{РРТРa}) \left(1 - \frac{D_{HРРТР}}{D_{HРРТР} + D_{Hf}}\right) \sqrt{\frac{2f \left(\frac{1}{D_{TРРТР}} + \frac{1}{D_{Tf}}\right)}{299792458}}. \quad (19)$$

Если  $v > -0,78$ , то потери Френеля-Кирхгофа вычисляют по формуле:

$$J(v) = 6,9 + 20 \lg \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right); \quad (20)$$

в противном случае  $J(v) = 0$ .

Поправочный член  $L_c$ , добавляемый для учета ширины растительного массива  $D_{Hf}$ , вычисляются по формуле:

$$L_c = 10 \lg \left( \frac{(D_{H \text{ РЭС}} + D_{Hf})(D_{H \text{ РРТР}} + D_{Hf})}{D_{Hf}(D_{H \text{ РЭС}} + D_{Hf} + D_{H \text{ РРТР}})} \right). \quad (21)$$

Полные дифракционные потери при прохождении радиосигнала над растительным массивом составляют:

$$L_{dif} = J(v)_{\text{РЭС}} + J(v)_{\text{РРТР}} + L_c. \quad (22)$$

На рис. 2–5 представлены результаты расчетов возможности радиоэлектронной маскировки РЭС, передающих радиосигналы с различной мощностью, несущей частотой и шириной полосы радиосигнала, от комплексов РРТР противника в заданных выше условиях.

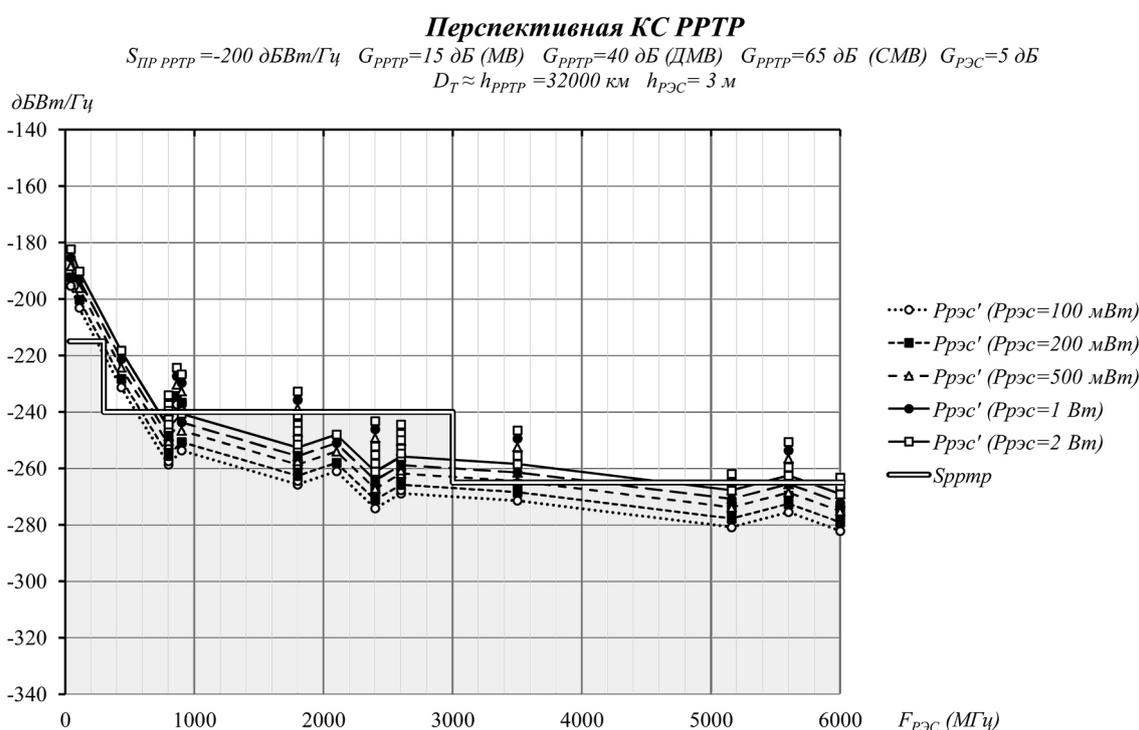


Рис. 2. Графики зависимости плотности мощности радиосигналов  $P_{\text{РЭС}}$ , поступающих на приемную антенну КС РРТР, от несущей частоты и ширины полосы радиосигналов и граница чувствительности КС РРТР

Часть графиков зависимости параметров радиосигналов РЭС, поступающих на приемные антенны КС, ВС, НС и ПС РРТР, от несущей частоты и ширины полосы радиосигналов, лежащей ниже границы чувствительности соответствующих комплексов РРТР (в серых зонах), соответствует радиосигналам, которые в заданных условиях не могут быть выявлены этими комплексами РРТР.

На рисунках показано, что в условиях рассматриваемого примера при мощности передатчиков от 0,1 до 2 Вт радиосигналы МВ и ДМВ диапазонов волн частотой до 2 ГГц, независимо от ширины полосы радиосигнала, всегда попадают в зоны обнаружения, по меньшей мере, одного из комплексов РРТР, а широкополосные радиосигналы с более высокой несущей частотой могут быть скрыты от комплексов РРТР противника при соответствующей настройке мощности передатчика и ширины полосы радиосигнала.

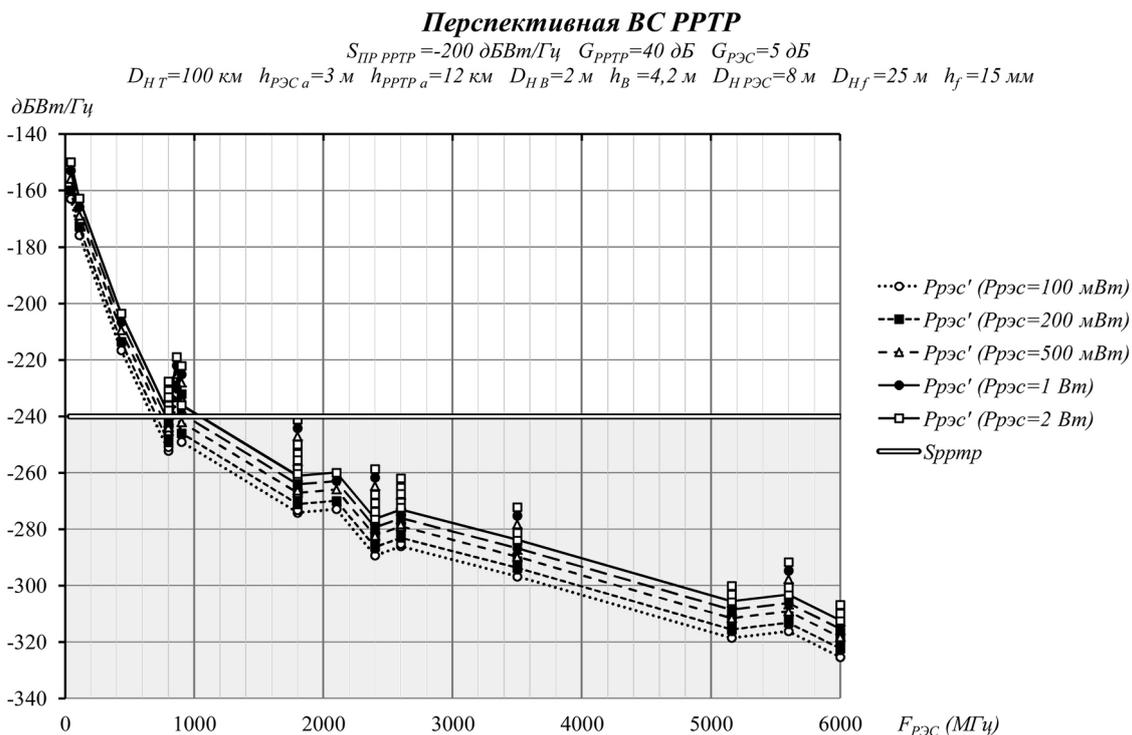


Рис. 3. Графики зависимости плотности мощности радиосигналов  $P_{РЭС}$ , поступающих на приемную антенну ВС РРТР, от несущей частоты и ширины полосы радиосигналов и границы чувствительности ВС РРТР

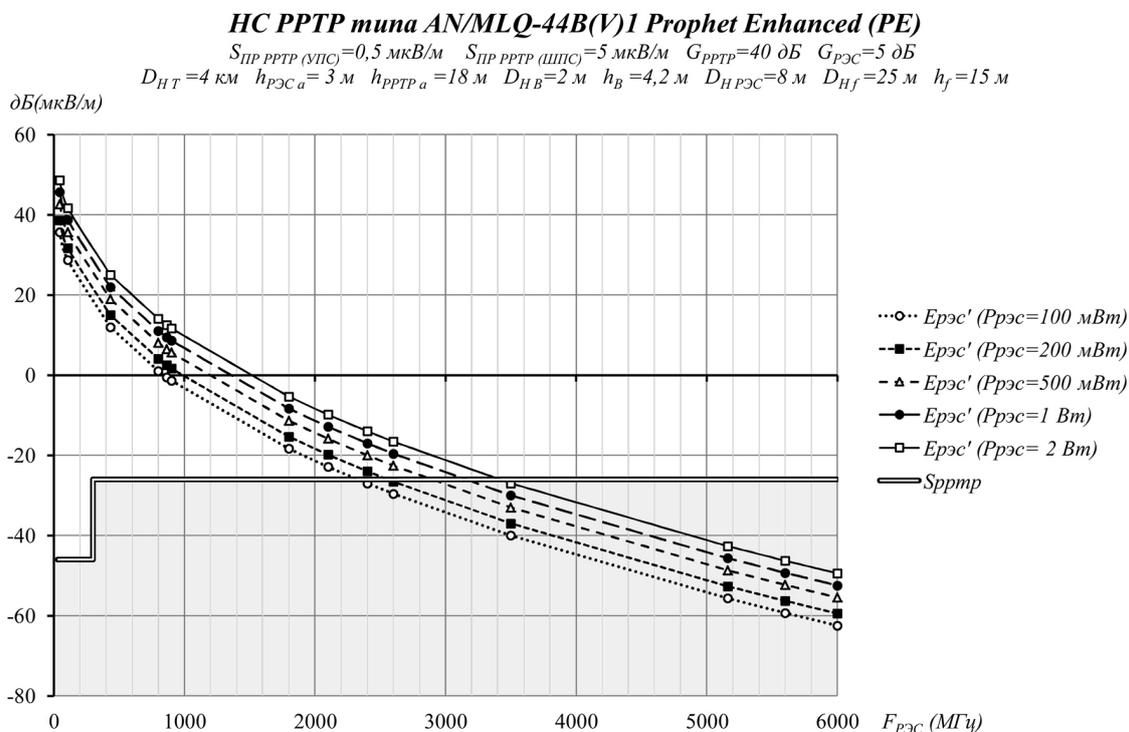


Рис. 4. Графики зависимости напряженности поля радиосигналов  $E_{РЭС}$ , поступающих на приемную антенну НС РРТР, от несущей частоты и ширины полосы радиосигналов и граница чувствительности НС РРТР

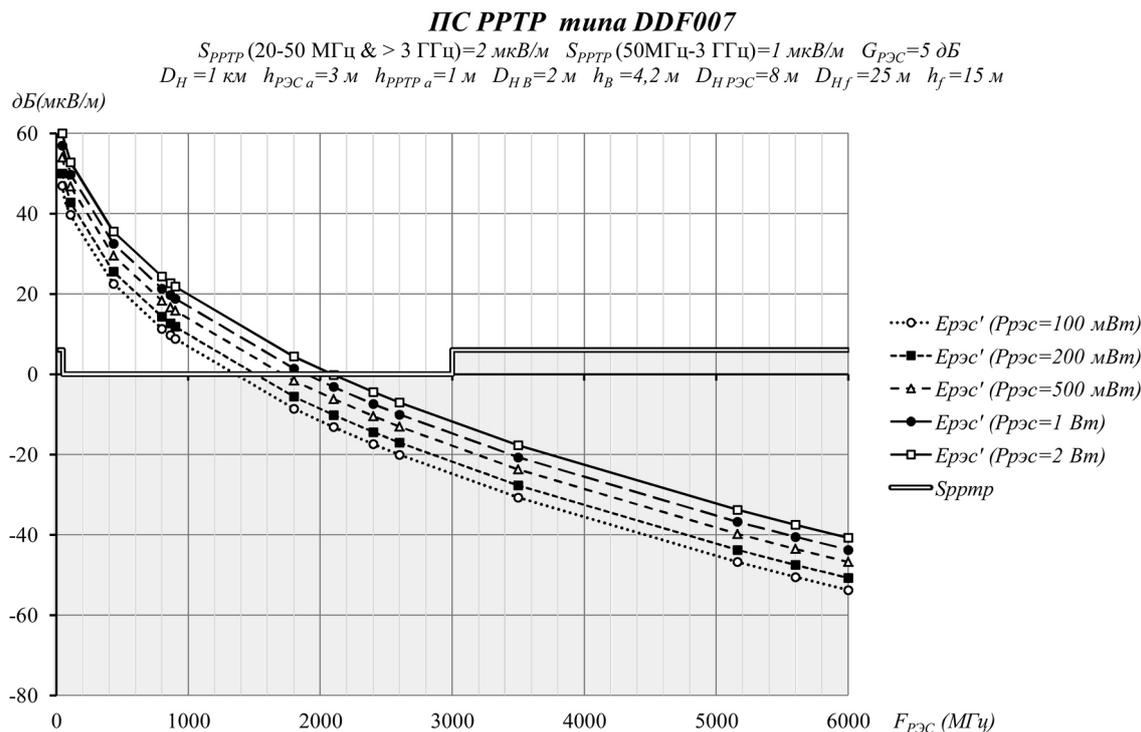


Рис. 5. Графики зависимости напряженности поля сигналов  $E_{РЭС}$ , поступающих на приемную антенну ПС РРТР, от несущей частоты и ширины полосы радиосигналов и граница чувствительности ПС РРТР

### Выводы

Анализ результатов расчетов в условиях сформулированного в работе примера показывают, что обеспечение РЭМ в тактическом звене возможно только путем комплексного использования особенностей рельефа местности и препятствий на земной поверхности для обеспечения затухания радиосигналов РЭС до уровня, исключающего выявление их местоположения средствами РРТР противника.

В первую очередь, мероприятия РЭМ в тактическом звене должны обеспечивать максимально возможное перекрытие первой зоны Френеля на радиотрассах, направленных в сторону ВС, НС и ПС РРТР противника. Кроме того, должны быть максимально использованы рельеф местности, лесные массивы и иные естественные и искусственные препятствия для обеспечения максимально возможного затухания радиосигналов РЭС в направлении комплексов РРТР противника.

Сформированная в настоящей работе методика оценки степени затухания радиосигналов на трассе между радиоэлектронным средством связи и управления и комплексами РРТР противника позволяет для конкретных технических характеристик РЭС, а также климатических и географических условий их расположения определить необходимый состав и содержание мероприятий РЭМ с целью предотвращения выявления противником местоположения РЭС.

Следует отметить, что для оценки затухания радиосигналов на пересеченной местности отечественные и зарубежные исследователи используют и иные модели, отличные от рекомендованных МСЭ-R.

Так, при распространении радиоволн вблизи поверхности Земли в условиях прямой видимости (*LOS*), вместо модели свободного пространства может быть использована модель плоской поверхности Земли (*PE – Plane Earth*), которая учитывает эффект отражения радиоволн от земли [14]. В модели *PE* степень затухания радиосигнала не зависит от его несущей частоты, а зависит от расстояния между передающей антенной

РЭС и приемной антенной комплекса РРТР и высот этих антенн. Модель *PE* показывает большее затухание радиосигналов МВ диапазона, чем модель свободного пространства. При этом в СМВ диапазоне радиоволн с ростом несущей частоты степень затухания примерно выравнивается.

Для оценки затухания радиосигнала в растительных массивах также разработаны модели, отличные от рекомендованных МСЭ-R. Например, Европейской кооперацией в науке и технологиях (*COST*) на основе результатов серии экспериментов была разработана эмпирическая модель затухания в растительном массиве радиосигналов частотой от 200 МГц до 95 ГГц *COST-235* [15], которая может применяться для случаев когда источник и приемник излучения расположены вне растительного массива, расположенного на радиотрассе, а зона Френеля полностью проходит через растительный массив. Модель *COST-235* также показывает большее затухание радиосигналов в лесном массиве по сравнению с моделями, рекомендованными МСЭ-R.

В целом, эмпирические модели, отличные от рекомендованных МСЭ-R, показывают большее затухание радиосигналов на трассах с препятствиями на земной поверхности. Применение этих моделей для анализа возможности обеспечения затухания радиосигналов РЭС до уровня, исключающего выявление их местоположения средствами РРТР противника, может показать менее жесткие требования к мероприятиям РЭМ. Однако применение сформулированной в настоящей работе методики дает более надежную РЭМ РЭС связи и управления в тактическом звене с точки зрения их защиты от обнаружения комплексами РРТР противника.

### Литература

1. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Научно-технические технологии, 2020. – 337 с.
2. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю. М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с.
3. Михайлов Р. Л. Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах США: военно-теоретический труд. – СПб.: Научно-технические технологии, 2018. – 131 с.
4. Симаков А. Средства радиоэлектронной борьбы, радио- и радиотехнической разведки сухопутных войск США // Зарубежное военное обозрение. 2022. № 10. С. 48-53.
5. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214.
6. Романов А., Кошелев А. Космическая радиоэлектронная разведка США // Авиация и космонавтика. 1994. № 5-6. С. 46-47.
7. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. Монография. – СПб.: Научно-технические технологии, 2017. – 546 с.
8. Старков В., Шушков А. Высокая точность и большая мощность // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 1.
9. Меньшаков Ю. К. Виды и средства иностранных технических разведок. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 656 с.
10. Portable Direction Finder R&S®DDF007. Product Brochure. Rohde&Schwars GmbH & Co. KG, 2016. 16 p.
11. Portable monitoring receiver R&S®PR200. Product Brochure. – Rohde&Schwars GmbH & Co. KG, 2023. – 20 p.
12. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2012. – 359 с.
13. Попов В. И. Математические модели распространения радиоволн в лесных массивах // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Технические науки. 2015. № 11 (20). С. 107-117.

14. Ayekomilogbon Olufemi T., Famoriji John O., Olasoji Yekeen O. Evaluation and modeling of UHF Radiowave Propagation in a Forested Environment. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. 2013. V. 2. Is. 12. Pp. 101-106.
15. Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems. Luxembourg. COST 235. 1996. Final Report. 407 p.

### References

1. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyah prednamerennyh destabiliziruyushchih vozdeystvij i vedeniya razvedki* [Communication system models in deliberate destabilizing influences and intelligence conditions]. St. Petersburg. *Naukoemkie tekhnologii* [Science intensive technologies]. 2020. 337 p. (In Russian).
2. Perunov Yu. M., Matsukevich V. V., Vasiliev A. A. *Zarubezhnye radioelektronnye sredstva* [Foreign radio-electronic means]. Edited by Yu.M.Perunov. In 4 books. Book 2. *Sistemy radioelektronnoj bor'by* [Electronic warfare systems]. Moscow. *Radiotekhnika*. 2010. 352 p. (In Russian).
3. Mikhaylov R. L. *Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennyh silah SSHA: voenno-teoreticheskij trud* [Electronic warfare in the US Army: a military theoretical work]. St. Petersburg. *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies]. 2018. 131 p. (In Russian).
4. Simakov A. *Sredstva radioelektronnoj bor'by, radio- i radiotekhnicheskoy razvedki suhoputnyh vojsk SSHA* [US Army electronic warfare, radio and radio technical intelligence means]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review]. 2022. No. 10. Pp. 48-53. (In Russian).
5. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V. Descriptive model of intelligence systems used to detection the elements of an aerospace defense system and target designation when aerospace attack means are doing prompt global strike. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021. No. 1. pp. 190-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10108 (in Russian).
6. Romanov A., Koshelev A. *Kosmicheskaya radioelektronnaya razvedka SSHA* [Space radio-electronic intelligence of the USA]. *Aviatsiya i kosmonavtika* [Aviation and cosmonautics]. 1994. No. 5-6. Pp. 46-47. (In Russian).
7. Makarenko S. I. *Informacionnoe protivoborstvo i radioelektronnaya bor'ba v setecentricheskikh voynah nachala XXI veka* [Information confrontation and electronic warfare in the network-centric wars of the early 21st century]. St. Petersburg. *Naukoemkie tekhnologii* [Science intensive technologies]. 2017. 546 p. (In Russian).
8. Starkov V., Shushkov A. *Vysokaya tochnost' i bol'shaya moshchnost'* [High accuracy and high power]. *Vozdushno-kosmicheskaya oborona*. [Aerospace defense]. 2009. No. 1. (In Russian).
9. Menshakov Yu. K. *Vidy i sredstva inostrannyh tekhnicheskikh razvedok* [Types and means of foreign technical intelligence]. Moscow. *Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana* [Publishing House of Bauman Moscow State Technical University]. 2009. 656 p. (In Russian).
10. Portable Direction Finder R&S®DDF007. Product Brochure. Rohde&Schwars GmbH & Co. KG. 2016. 16 p.
11. KG Portable monitoring receiver R&S®PR200. Product Brochure. Rohde&Schwars GmbH & Co. 2023. 20 p.
12. Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Electronic warfare]. Moscow. University book. 2012. 359 p. (In Russian).
13. Popov V. I. *Matematicheskie modeli rasprostraneniya radiovoln v lesnyh massivah* [Mathematical models of radio wave propagation in forests]. *Evrazijskij Soyuz Uchenyh (ESU). Tekhnicheskie nauki* [Eurasian Union of Scientists (EUU). Technical sciences]. 2015. No. 11 (20). Pp. 107-117. (In Russian).
14. Ayekomilogbon Olufemi T., Famoriji John O., Olasoji Yekeen O. Evaluation and modeling of UHF Radiowave Propagation in a Forested Environment. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. 2013. V. 2. Is. 12. Pp. 101-106.
15. Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems. Luxembourg. COST 235. 1996. Final Report. 407 p.

Статья поступила 21 сентября 2024 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@mail.ru. Адрес: 248000, Россия, г. Калуга, ул. К. Маркса, д. 4.

### Ways to ensure the electronic masking of electronic means in the tactical link

V. A. Turilov

**Annotation. Relevance:** *in the tactical control link, in the conditions of the use by the enemy of modern means of radio intelligence, electronic reconnaissance, electronic countermeasures and high-precision weapons, one of the main requirements for electronic means that are sources of radiation of radio signals is to ensure maximum secrecy of their functioning. In this regard, the aim of the work is to develop a methodology for assessing the degree of attenuation of radio signals on the routes between radio-electronic means of communication and control and space, air, ground and portable (wearable) complexes of enemy radio intelligence when used for radio-electronic masking of terrain features and obstacles on the earth's surface. Methods:* *the methodology is based on the approaches outlined in the ITU-R Recommendations and contains the main theoretical provisions for calculations. The technique is designed to determine the composition and content of radio-electronic masking measures of radio-electronic means in the tactical link in order to prevent the enemy from detecting their location. The results of the calculations performed for a specific example of the functioning of radio-electronic means of communication and control and enemy radio intelligence complexes in the tactical link are presented. The practical significance of the work lies in the fact that the developed methodology for assessing the degree of attenuation of radio signals on the route between the radio-electronic means of communication and control and the enemy's radio-electronic reconnaissance complexes allows for specific technical characteristics of a functioning radio-electronic means, as well as climatic and geographical conditions of their location, to determine the necessary composition and content of radio-electronic masking measures in order to prevent the enemy from detecting the location electronic means, including in the field.*

**Keywords:** *radio signal attenuation; radio electronic means of communication and control; radio and radio engineering intelligence; radio electronic masking.*

### Information about Author

Turilov Valery Aleksandrovich – PhD, associate professor. 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@mail.ru. Address: 4, K. Marks St., Kaluga, 248000.

### Библиографическая ссылка на статью:

Турилов В. А. Пути обеспечения радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 2-17. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-2-17

### Reference for citation:

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). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-2-17

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-18-30

**Актуальные вопросы и перспективные направления обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов различного типа и базирования на основе технологии Robot-to-Everything**

Владыко А. Г., Нестеров А. А., Макаренко С. И.

**Аннотация.** В статье ставится задача по применению систем связи на основе технологии Robot-to-Everything (R2X) с использованием периферийных вычислений, применительно к разнотиповым робототехническим комплексам. **Целью работы** является формирование предложений по выработке перспективных направлений обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов с использованием технологий R2X для совершенствования организации связи и управления робототехническими комплексами различного назначения. В связи с этим в работе рассмотрены основные требования к построению комплексной вычислительной инфраструктуры робототехнических комплексов. Предложена оценка производительности вычислительной инфраструктуры и функциональная схема взаимодействия с робототехническим комплексом на примере безэкипажных транспортных средств. Представлены основные преимущества использования R2X-технологии с поддержкой периферийных вычислений при решении задач управления разнотиповыми робототехническими комплексами. **Новизна работы** состоит в том, что объектом исследования являются R2X-технологии с поддержкой периферийных вычислений, позволяющие реализовать комплекс связи и управления робототехническими комплексами при обеспечении их интероперабельности. **Результат** заключается в том, что предложен научно-обоснованный технологический подход к построению нового направления обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов на основе R2X-технологии. **Практической значимостью:** результаты анализа и представленный вариант решения задачи на базе современных технологий взаимодействия робототехнических комплексов позволяют с единых системных позиций сформировать обоснованные варианты реального практического внедрения предложенных технологий в информационную инфраструктуру и технику средств связи данного типа. Взаимосвязанное использование технологии Robot-to-Everything, концепции интероперабельности и периферийных вычислений является перспективным направлением при создании единой системы управления робототехническими комплексами различного назначения и базирования.

**Ключевые слова:** интероперабельность, робототехнические комплексы, техника средств связи специального назначения, туманные вычисления, robot-to-everything.

**Введение**

В настоящее время существенное развитие получают робототехнические комплексы (РТК) различного типа и базирования для решения разнообразных задач. Проблематика автономного (автоматического) или дистанционного управления РТК широко разработана и в достаточной степени освещена в известных публикациях. Вместе с тем, особенности реального применения имеющихся прототипов РТК показывают [1, 2], что сценарии группового применения разнотиповых групп РТК, действующих в различных средах, в рамках выполнения единой задачи (сценария), требуют как взаимодействия различных роботов-агентов между собой, так и трансляции ряда вычислительных задач, которые не могут быть решены автономно силами вычислительных устройств роботов-агентов, вовне – во внешнюю информационную инфраструктуру. Решение этих задач актуализирует проработку обеспечения интероперабельности полуавтономных (ограниченно-автономных) роботов-агентов, являющихся элементами разнотиповых РТК, как в рамках взаимодействия между собой, так и в рамках взаимодействия с информационной инфраструктурой обеспечения их

функционирования. Именно анализ актуальных вопросов по этой тематике и выработка перспективных направлений обеспечения интероперабельности является целью данной работы.

### Робототехнические комплексы различного типа и базирования.

#### Общая схема использования робототехнических комплексов в различных средах

Общая система управления (СУ) РТК различного типа и базирования, при их использовании в различных средах (на земле, в море и в воздушном пространстве) представлена на рис. 1. Как показано на рисунке, для совместных действия таких РТК в рамках единой системы управления требуется развертывание следующих подсистем:

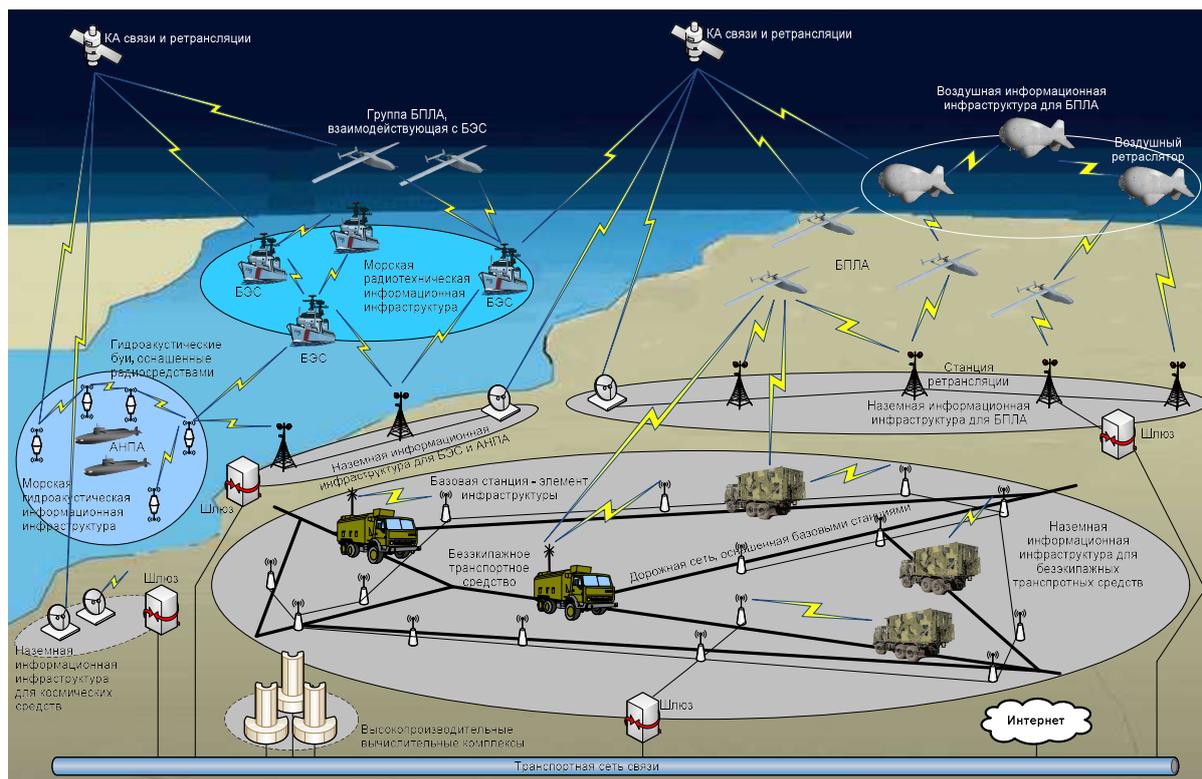


Рис. 1. Общая система управления робототехническими комплексами

#### 1) подсистема мобильных роботов-агентов:

- роботы-агенты наземного базирования – безэкипажные транспортные средства (БЭТС);
- роботы-агенты воздушного базирования – беспилотные летательные аппараты (БПЛА);
- роботы-агенты морского надводного базирования – безэкипажные суда (БЭС);
- роботы-агенты морского подводного базирования – автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА);

#### 2) подсистема стационарной информационной инфраструктуры:

2.1) информационные структуры подключения роботов-агентов (фактически выполняющие роль сетей абонентского доступа):

- наземная информационная инфраструктура для БЭТС, в составе базовых станций (БС), которыми оборудуются дорожные пути движения, объединенных наземной проводной сетью;
- наземная информационная инфраструктура для БПЛА, в составе станций ретрансляции данных, объединенных наземной проводной сетью;

- воздушная информационная инфраструктура для БПЛА, в составе воздушных станций ретрансляции данных, объединенных сетью воздушной радиосвязи. Эта инфраструктура сопрягается с наземной инфраструктурой через станции ретрансляции данных или космические аппараты (КА) связи;
- наземная информационная инфраструктура для БЭС и АНПА. Эта инфраструктура сопрягается с морскими инфраструктурами посредством радиосвязи или КА связи;
- морская радиотехническая информационная инфраструктура для БЭС. Эта инфраструктура сопрягается с наземной инфраструктурой через радиостанции ретрансляции данных или КА;
- морская гидроакустическая информационная инфраструктура для АНПА. Эта инфраструктура сопрягается с наземной инфраструктурой через радиостанции ретрансляции данных или КА связи;
- наземная информационная инфраструктура для космических средств;

2.2) транспортная сеть связи, к которой вышеуказанные информационные инфраструктуры (сети абонентского доступа), подключаются посредством шлюзов;

2.3) высокопроизводительные вычислительные комплексы, обеспечивающие проведение расчетов для отдельных роботов-агентов и управление ими в рамках выполнения единой задачи (сценария).

### Актуальные вопросы обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов

Отработка единой задачи (сценария) силами роботов-агентов различного типа и базирования потребует обеспечения «бесшовного» информационного взаимодействия т. е. обеспечения интероперабельность между:

- а) роботами-агентами;
- б) соответствующей информационной инфраструктурой;
- в) высокопроизводительными вычислительными комплексами.

Теоретические вопросы интероперабельности были рассмотрены в работе [3] и включают в себя различные аспекты на организационном, семантическом и техническом уровнях (рис. 2).

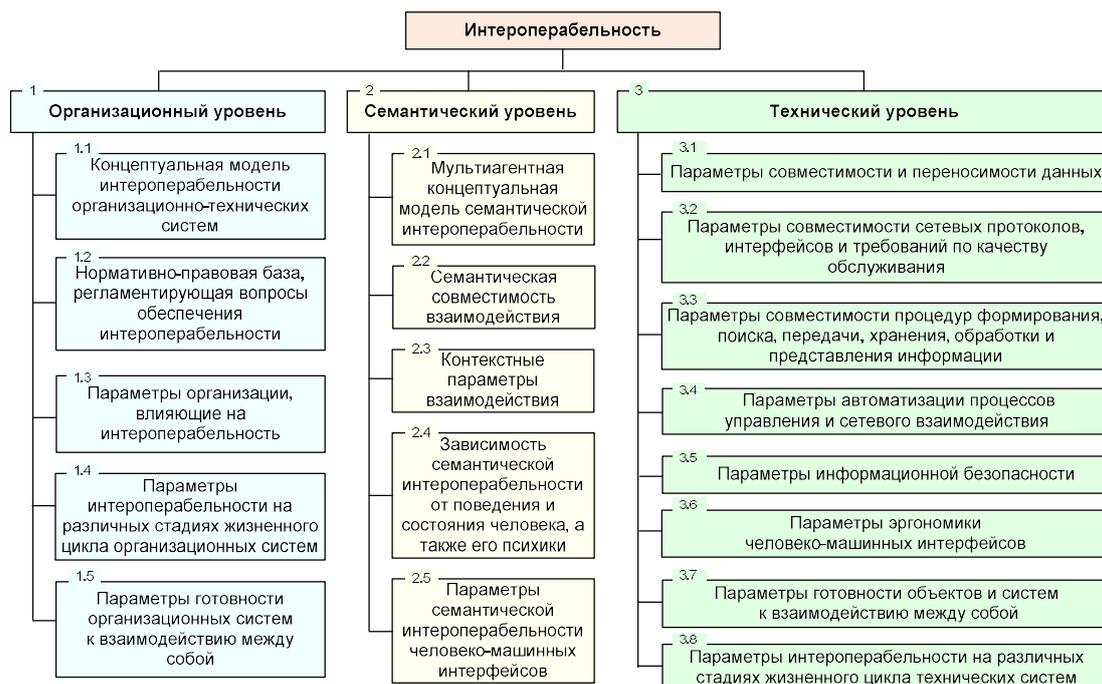


Рис. 2. Уровни интероперабельности

Наиболее важными аспектами практического обеспечения интероперабельности в СУ РТК является фактическая реализация процедур, представленных в блоках 1.2, 2.2, 2.3, 3.1-3.5 на рис. 2. Особенностью организации информационного взаимодействия в СУ РТК является следующее:

а) в каждой информационной инфраструктуре, ориентированной на управление роботами-агентами определённого типа и базирования, могут быть приняты свои профили интероперабельности (здесь и далее под профилем интероперабельности понимается гармонизированная совокупность стандартов, рекомендаций и регламентов, обеспечивающих стандартизацию функций информационного взаимодействия конкретных систем определённого класса);

б) сопряжение профилей интероперабельности между собой осуществляется посредством шлюзов, обеспечивающих инкапсуляцию стандартов профиля каждой инфраструктуры в формат передачи данных, используемый в транспортной сети связи. При трансляции данных из инфраструктуры одного типа в инфраструктуру другого типа (например, из инфраструктуры управления БЭС в инфраструктуру управления БПЛА) шлюзы осуществляют функции преобразования профиля интероперабельности;

в) высокопроизводительные вычислительные комплексы осуществляют решение задач получения данных от роботов-агентов, их «распаковки», обработки, решения вычислительных задач и обратной трансляции решений на роботы-агенты. Вычислительный комплекс, может быть единым для всей СУ РТК (предпочтительный вариант для управления разнотиповыми роботами-агентами), либо в инфраструктуре каждого типа может находиться свой вычислительный комплекс.

При управлении роботами-агентами с ограниченной автономностью часть вычислительных задач транслируется от них в вычислительные комплексы посредством соответствующей инфраструктуры и транспортной сети связи. Рассмотрим более подробно особенности организации этих процессов, которые, в соответствии с рис. 2, относятся к аспектам технической интероперабельности, указанным в блоках 3.2-3.4.

### **Перспективные направления функционирования робототехнических комплексов на основе технологии *Robot-to-Everything***

Развитие технологий *Vehicle-to-Everything* (*V2X*) [4] позволило провести их масштабирование в области мобильных робототехнических комплексов с учетом особенностей таких систем [5, 6].

*Robot-to-Everything* (*R2X*) – это технология беспроводной связи типа *Robot ad hoc Networks* (*RANET*) [7], представляющая собой совокупность всех возможных телекоммуникационных систем для РТК. Данная технология включает в себя такие подсистемы связи как:

- связь между роботами-агентами РТК (*Robot-to-Robot, R2R*);
- связь РТК с полевой инфраструктурой (*Robot-to-Infrastructure, R2I*);
- связь РТК с вычислительными комплексами и др.

В целом, технология *R2X* необходима для обеспечения мобильных РТК, которые должны обмениваться данными между собой и узлами полевой инфраструктуры *FSU* (*Field Side Unit*) в различных тактических ситуациях при эффективной дальности связи. Технология *R2X* должна соответствовать требованиям для систем связи, обеспечивающим низкую сквозную задержку, высокую пропускную способность, отказоустойчивость, качество обслуживания, управление мобильностью и безопасностью [5]. При этом основное отличие *R2X* от *V2X* заключается в обеспечении мобильных узлов более высокой пропускной способностью обмена сообщениями. Ключевые показатели перспективных систем связи робототехнических комплексов на базе *R2X* приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Ключевые показатели перспективных систем связи РТК на базе *R2X*

№	Показатель	Значение
1.	Доступность сети по показателю коэффициент готовности	0,999999
2.	Своевременность передачи	менее 1 мс
3.	Скорость передачи данных в широкополосном радиоканале множественного доступа	до 20 Гбит/с (в перспективных 5G)
4.	Скорость РТК	2 – 200 км/ч
5.	Достоверность передачи по показателю вероятности не доведения сообщения	при решении специальных задач – $10^{-5}$ ; при управлении – $10^{-3}$ ; для службы поддержки – $10^{-2}$

К решаемым задачам РТК на основе технологии *R2X* можно отнести следующие:

- обмен данными между разнотиповыми РТК и узлами *FSU*;
- передача сообщений о складывающейся обстановке и команд управления на РТК, съем с РТК телеметрических данных;
- роуминг РТК в различных сферах применения в процессе выполнения задач;
- обмен РТК данными между собой в интересах координации совместных действий;
- маршрутизация части вычислительной нагрузки с РТК на внешние высокопроизводительные вычислительные узлы с последующим доведением до РТК результатов вычислений.

Принимая во внимание специфику работы технологии *R2X* в РТК, в том числе высокую динамику изменения топологии сети и обмен большими объемами данных, целесообразно выстраивать информационную инфраструктуру на основе периферийных вычислительных систем.

В последнее десятилетие активно развиваются облачные вычисления (*cloud computing*), которые помогают решать проблемы обеспечения вычислительных задач за счет выгрузки части из них в облако (*cloud*). Хотя такой подход позволяет существенно снизить нагрузку и ускорить взаимодействие, облачные ресурсы обычно располагаются довольно далеко от конечного пользователя. Между тем, периферийные вычисления выполняются в непосредственной близости от объекта с меньшими, но достаточными ресурсами для решения большинства локализованных задач. Использование данного подхода позволяет в первую очередь минимизировать время отклика системы и обойтись меньшим количеством вычислительных ресурсов, выведенных из облака на периферию.

При этом целесообразно учитывать исследования в области периферийных вычислений применительно к автотранспортным системам. Так, для решения задач эффективной разгрузки, повышения производительности системы, сокращения времени ожидания часто используется подход, основанный на граничных вычислениях [8–11]. Вычисления, проводимые на границе инфраструктуры (*Edge Computing*) стали перспективной концепцией для управления услугами в *V2X*-системах [12]. Они позволяют обеспечить низкую задержку за счет приближения вычислительных ресурсов к БЭТС. Однако высокая динамика автотранспортных сетей создает значительные трудности при разработке оптимальной схемы предоставления услуг *V2X*. В работах [8, 9] в основном делается акцент на решение задач разгрузки и распределения ресурсов для минимизации общего времени обработки запросов от БЭТС к инфраструктуре. Рост интенсивности вычислений и чувствительных к задержкам бортовых приложений делает довольно сложной задачу обработки данных непосредственно на БЭТС при сохранении необходимого уровня вычислительных мощностей, а значит, и производительности. Тем не менее, схемы разгрузки, в которых все БЭТС перегружают свои задачи на один и тот же граничный сервер

(*edge*), могут тем самым ограничить производительность системы. В этой связи в ряде работ [10, 11] реализуется идея балансировки нагрузки за счет внедрения многопользовательских мультисервисных систем.

Еще одним эффективным методом решения вопросов оптимизации в *V2X*-системах является использование инструмента туманных вычислений (*Fog Computing, Fog*). Понятие туманных вычислений было введено в 2011 г. из-за необходимости расширения облачных вычислений [13]. Многочисленные устройства интеллектуальных транспортных систем одновременно подключаются к облаку и создают чрезмерную нагрузку. Основная идея *Fog* состоит в попытке перенести часть вычислительных задач ближе к «земле». Узлы *Fog* будут собирать необработанные данные (например, от датчиков), и вместо того, чтобы пересылать их на облачные серверы, будут выполнять обработку с использованием своих локальных вычислителей [14–16]. Дополнительным преимуществом является то, что собранные данные, скорее всего, потребуются тем же устройствам, которые их сгенерировали, поэтому при локальной, а не удаленной обработке задержка между вводом и ответом минимизируется.

С учетом отмеченного и принимая во внимание исследования [17, 18], предлагаемую вычислительную инфраструктуру РТК можно представить многоуровневой архитектурой «туман–край–облако» или *FEC (Fog–Edge–Cloud)*, как показано на рис. 3. При этом в отличие от классических многоуровневых вычислительных систем [19] для РТК целесообразно сместить туманные вычисления на нижний уровень предлагаемой архитектуры ввиду универсальности (мобильности) узлов полевой инфраструктуры.

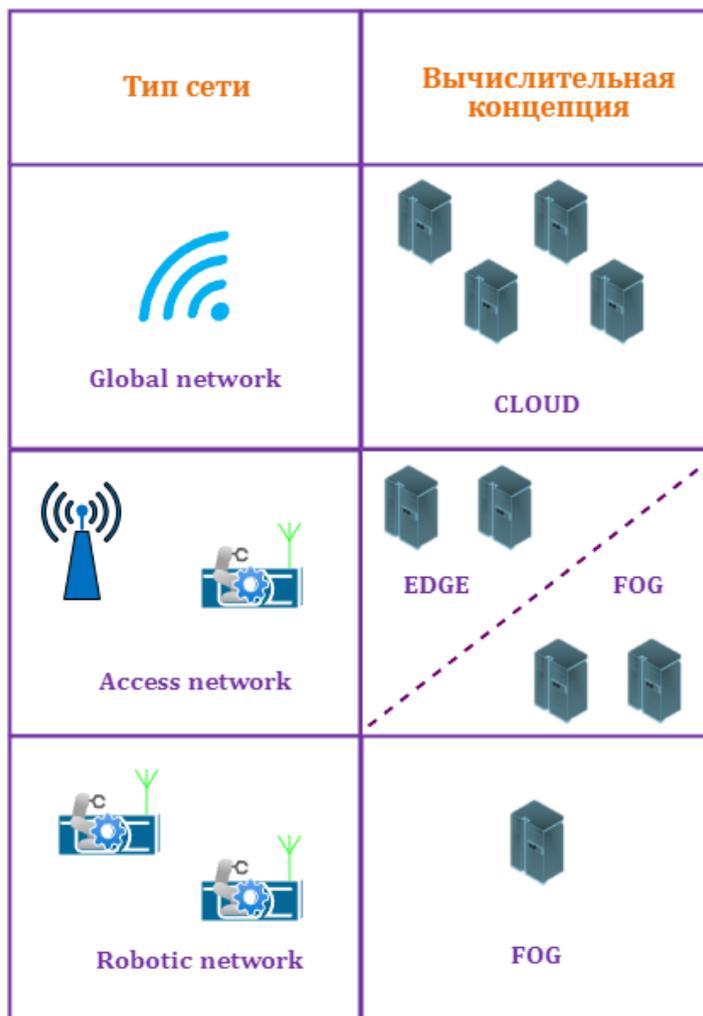


Рис. 3. Вычислительная инфраструктура *FEC* для системы управления робототехническими комплексами

На уровне сети роботов-агентов (*Robotic network*) вычислительная инфраструктура реализуется на основе туманных вычислений *Fog*, где обработку вычислительных задач выполняет узел *FSU*, который используется как туманный узел для вычисления задач, отправленных роботами-агентами. Узел *FSU* выполняет обработку задач самостоятельно или может дополнительно переложить их на более производительный мобильный туманный узел (*mFSU*) на базе соседнего робота-агента [20]. Маршруты *FSU–mFSU* можно планировать таким образом, чтобы они реализовывали сложные участки траекторий, а наличие системы контроля маршрута обеспечивает надежность передаваемых данных. При этом динамическое масштабирование вычислительных мощностей на уровне сети роботов-агентов позволяет рассматривать *mFSU* в качестве узлов *Fog*. Робот-агент перегружает задачу на *FSU* или *mFSU* посредством технологии *R2I* или *R2F*. При этом применяются специальные алгоритмы маршрутизации по определению оптимального пути передачи из набора доступных для разгрузки задач из роботов-агентов в *FSU/mFSU*, либо для получения результатов из *FSU/mFSU* к роботам-агентам.

На уровне сети доступа (*Access network*) вычислительная инфраструктура реализуется путем применения гибридного подхода на базе туманных (*Fog*) и граничных (*Edge*) вычислений. В свою очередь, уровень базовой сети (*Global network*) реализуется посредством облачной инфраструктуры и может быть задействован при необходимости дополнительных вычислений, а также при наличии такой возможности.

Оценка производительности вычислительной инфраструктуры *FEC* может быть произведена, например, в соответствии с работой [21], на основе следующих параметров:

1) Вычислительная сложность  $C_i$ . Вычислительная сложность  $i$ -ой решаемой задачи по показателю полноты задействования вычислительных ресурсов архитектуры *FEC* определяется как:

$$C_i = \frac{N_i^{F/E/C}}{N}, \quad (1)$$

где  $N_i^{F/E/C}$  – количество вычислительных узлов в уровнях *Fog*, *Edge* и *Cloud* при решении  $i$ -ой вычислительной задачи;  $N$  – общее количество узлов в системе *FEC*.

2) Задержка  $d_A$ . Эффективность применения механизмов *Fog* и *Edge* можно оценить улучшением среднесетевой задержки передаваемых данных при обработке задач. Первоначально вычисляется сумма задержек решения для каждой  $j$ -й вычислительной задачи  $d_{aj}$  на всех  $i$ -х узлах (2). Затем суммируются задержки всех задач в отношении к общему числу всех вычислительных узлов, получивших задачи  $N_R$  (3).

$$d_{aj} = \sum_{i=1}^N d_i, \quad (2)$$

$$d_A = \frac{1}{N_R} \sum_{j=1}^{N_R} d_{aj}. \quad (3)$$

3) Коэффициент обработки  $P_k^{F/E/C}$  – это параметр, который описывает эффективность взаимосвязи между уровнями *Fog*, *Edge* и *Cloud* в архитектуре *FEC*. Когда новые вычислительные задачи генерируются на нижнем уровне (*Robotic network*), в зависимости от их сложности принимается решение о передаче задач для обработки на более высокий архитектурный уровень. Однако если вычислительный узел более высокого уровня недоступен, узел нижнего уровня начнет обработку задачи, при одновременном поиске узла более высокого уровня. Прогнозируемое время обработки на узлах нижнего уровня будет постоянно обновляться. Если узел более высокого уровня будет найден, и, если время передачи задач в дополнение к времени обработки на этом узле меньше, чем оставшееся время обработки, задача будет передана на этот узел более высокого уровня. Однако если это условие не выполняется, узел нижнего уровня прекращает поиск узла более высокого

уровня, и вычислительная задача будет полностью обработана на нижнем уровне. Коэффициент обработки  $P_k^{F/E/C}$  рассчитывается как отношение общего количества обработанных задач на соответствующем уровне  $S_i^{F/E/C}$  к общему количеству задач  $S$  (4).

$$P_k^{F/E/C} = \frac{S_i^{F/E/C}}{S}. \quad (4)$$

4) Эффективность обработки  $E_f^{F/E/C}$ . Эффективность обработки данных рассчитывается для каждого уровня  $FEC$ . Измеряется время отправки задачи на вышестоящий уровень  $T_{Tr i}^{HL}$  (время передачи) и получение ответа  $T_{Pr i}^{HL}$  (время обработки) на нижестоящий уровень для каждой  $i$ -й задачи. После этого определяется среднее время передачи и обработки для общего числа задач по которым получен ответ  $N_M^{HL}$  (5). Эффективность обработки задач рассчитывается как отношение среднего времени обработки на узле нижнего уровня  $T_{Pr}^{LL}$  к среднему времени передачи и обработки задач на верхнем уровне  $T_{Tr Pr}^{HL}$  (6).

$$T_{Tr Pr}^{HL} = \frac{\sum_{i=1}^{N_M^{HL}} (T_{Tr i}^{HL} + T_{Pr i}^{HL})}{N_M^{HL}}, \quad (5)$$

$$E_f^{F/E/C} = \frac{Avg \left( \sum_{i=1}^N T_{Pr i}^{LL} \right)}{T_{Tr Pr}^{HL}}. \quad (6)$$

### Перспективные направления обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов в условиях стационарной информационной инфраструктурой на основе технологии R2X

Применение РТК с поддержкой R2X и периферийных вычислений можно рассмотреть в интересах решения задач управления БЭТС, «подключенным» к наземной информационной инфраструктуре.

Функциональная схема предлагаемого решения представлена на рис. 4. При этом, с учетом соответствующих уровней интероперабельности [3, 22], результаты можно представить, как показано в табл. 2.

Представленные в табл. 2 технологии R2X обеспечивают следующие коммуникации:

- R2R – коммуникации между роботами-агентами;
- R2I – коммуникация роботов-агентов с узлами полевой инфраструктуры;
- R2F – коммуникация роботов-агентов с узлами туманных вычислений;
- F2F – коммуникация между узлами туманных вычислений;
- F2E – коммуникация между узлами туманных и граничных вычислений;
- F2C – коммуникация между узлами туманных и облачных вычислений;
- E2C – коммуникация между узлами граничных и облачных вычислений;

В свою очередь, эти типы коммуникаций обеспечиваются следующими аспектами технической интероперабельности, в соответствии с эталонной моделью интероперабельности:

- 3.1 – параметры совместимости и переносимости данных;
- 3.2 – параметры совместимости сетевых протоколов, интерфейсов и требований по качеству обслуживания;
- 3.3 – параметры совместимости процедур формирования, поиска, передачи, хранения, обработки и представления информации;
- 3.4 – параметры автоматизации процессов управления и сетевого взаимодействия;
- 3.5 – параметры информационной безопасности.

Таким образом, реализация технологии R2X с поддержкой периферийных вычислений для БЭТС позволяет масштабировать существующий в ней вычислительный потенциал на всю СУ РТК при одновременном обеспечении интероперабельности коммуникаций между компонентами системы.

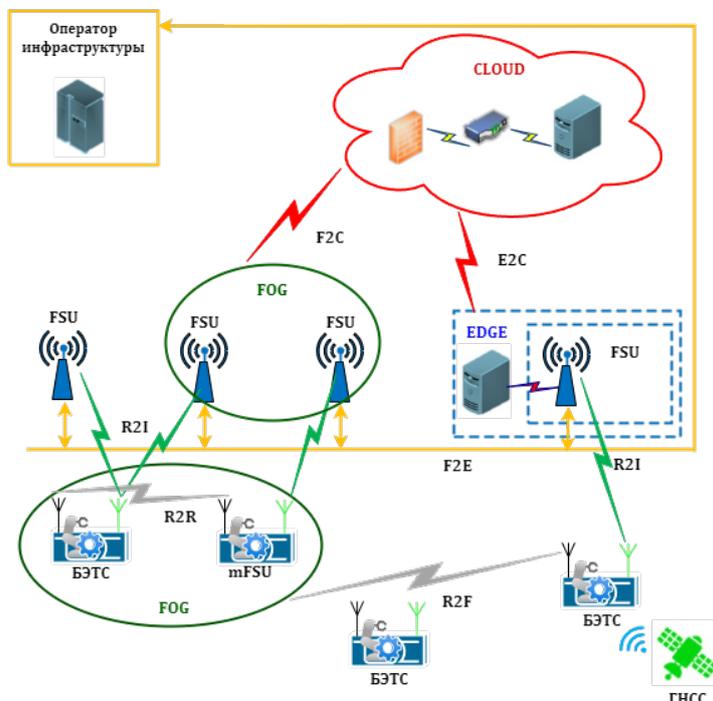


Рис. 4. Функциональная схема взаимодействия БЭТС с информационной инфраструктурой

Таблица 2 – Технологии взаимодействия БЭТС с информационной инфраструктурой

№	Уровень архитектуры FEC	Вычислительная концепция	Технологии R2X	Технологии связи	Аспекты интероперабельности*
1.	Сеть роботов-агентов (Robotic network)	Fog	Robot-to-Robot (R2R); Robot-to-Infrastructure (R2I); Robot-to-Fog (R2F); Fog-to-Fog (F2F)	802.11p; 802.11bd; LTE-V2X; NR-V2X	3.1; 3.2; 3.5
2.	Сеть доступа (Access network)	Fog; Edge	Fog-to-Edge (F2E)	LTE-V2X; NR-V2X	3.3; 3.4; 3.5
3.	Базовая сеть (Global network)	Cloud	Fog-to-Cloud (F2C); Edge-to-Cloud (E2C)	Магистральные линии	3.3; 3.4; 3.5

Примечание: \*аспекты интероперабельности в соответствии с рис. 2.

### Выводы

В статье впервые предложено взаимоувязанное использование технологии *Robot-to-Everything*, концепции интероперабельности и периферийных вычислений для создания единой СУ РТК различного назначения и базирования.

Основные преимущества использования R2X-технологии с поддержкой периферийных вычислений при решении задач управления разнотиповыми РТК:

- обмен данными с робототехническими комплексами с использованием V2X-технологии в режиме реального времени позволяет быстрее реагировать на изменения текущей ситуации;

- эффективная передача информации о складывающейся обстановке и команд управления на РТК, съем с РТК телеметрических данных;
- обмен роботами-агентами данными между собой в интересах координации совместных действий;
- распределение ресурсов с РТК на периферийные вычислительные ресурсы с последующим доведением до РТК результатов вычислений.

Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на поиск оптимальных вариантов развертывания и кластеризации туманных узлов, решение задач кэширования и разгрузки вычислительных задач в предлагаемой *R2X*-системе, а также энергоэффективности ее элементов.

### Литература

1. Пшихопов В. Х., Гонтарь Д. Н., Мартьянов О. В. Концептуальные подходы к формированию сценариев боевого применения групп робототехнических комплексов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 138–182. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-138-182
2. Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю., Медведев М. Ю., Пшихопов В. Х., Соловьев В. В., Титов А. Е., Финаев В. И., Шаповалов И. О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. – М.: Физико-математическая литература, 2015. 305 с.
3. Макаренко С. И. Интероперабельность организационно-технических систем. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 313 с.
4. Mueck M., Karls I. Networking vehicles to everything: Evolving automotive solutions. Boston/Berlin: Walter de Gruyter Inc. 2018. 233 p.
5. Vandenberghe W., Moerman I., Demeester P. Adoption of vehicular ad hoc networking protocols by networked robots // Wireless Personal Communications. 2012. Vol. 64. Pp. 489–522. DOI: 10.1007/s11277-012-0598-2
6. An X., Wu C., Lin Y., Lin M., Yoshinaga T., Ji Y. Multi-Robot Systems and Cooperative Object Transport: Communications, Platforms, and Challenges // IEEE Open Journal of the Computer Society. 2023. Vol. 4. Pp. 23–36. DOI: 10.1109/OJCS.2023.3238324
7. Das S. M., Hu Y. C., Lee C. G., Lu Y. H. Mobility-aware ad hoc routing protocols for networking mobile robot teams // Journal of Communications and Networks. 2007. Vol. 9. Iss. 3. Pp. 296–311. DOI: 10.1109/JCN.2007.6182857
8. Vladyko A., Elagin V., Spirkina A., Muthanna A., Ateya A. A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications // Electronics. 2022. Vol. 11. Pp. 173. DOI: 10.3390/electronics11020173
9. Fan W., Su Y., Liu J., Li S., Huang W., Wu F., Liu Y. Joint Task Offloading and Resource Allocation for Vehicular Edge Computing Based on V2I and V2V Modes // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2023. Vol. 24. Pp. 4277–4292. DOI: 10.1109/TITS.2022.3230430
10. Hou P., Jiang X., Lu Z., Li B., Wang Z. Joint Computation Offloading and Resource Allocation based on Deep Reinforcement Learning in C-V2X Edge Computing // Applied Intelligence. 2023. Vol. 53. Pp. 22446–22466. DOI: 10.1007/s10489-023-04637-x
11. Dai Y., Xu D., Maharjan S., Zhang Y. Joint Load Balancing and Offloading in Vehicular Edge Computing and Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6. Pp. 4377–4387. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2876298
12. Liu L., Chen C., Pei Q., Maharjan S., Zhang Y. Vehicular edge computing and networking: A survey // Mobile Networks and Applications. 2021. Vol. 26. Pp. 1145–1168. DOI: 10.1007/s11036-020-01624-1
13. Bonomi F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing // Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2011). 2011.
14. Khattak H. A., Islam S. U., Din I. U., Guizani M. Integrating fog computing with VANETs: A consumer perspective // IEEE Communications Standards Magazine. 2019. Vol. 3. Pp. 19–25. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2019.1800050
15. Sarrigiannis I., Contreras L. M., Ramantas K., Antonopoulos A., Verikoukis C. Fog-Enabled Scalable C-V2X Architecture for Distributed 5G and Beyond Applications // IEEE Network. 2020. Vol. 34. Pp. 120–126. DOI: 10.1109/MNET.111.2000476

16. Alvi A. N., Javed M. A., Hasanat M. H. A., Khan M. B., Jilani S. A. K., Alkathami M., Farooq U. Intelligent task offloading in fog computing based vehicular networks // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Pp. 4521. DOI: 10.3390/app12094521
17. Плотников П. В., Владыко А. Г. Анализ подходов к оптимизации V2X-систем: кластеризация, граничные и туманные вычисления // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 7–22. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22
18. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladyko A. G. Numerical Analysis of roadside Units Deployment Models in V2X Communication System // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2024. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496720
19. Bierzynski K., Escobar A., Eberl M. Cloud, fog and edge: Cooperation for the future? // 2017 Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). 2017. P. 62–67. DOI: 10.1109/FMEC.2017.7946409
20. Lee, J., Ahn S. Adaptive Configuration of Mobile Roadside Units for the Cost-Effective Vehicular Communication Infrastructure // Wireless Communications and Mobile Computing. 2019. Vol. 2019. Pp. 6594084. DOI: 10.1155/2019/6594084
21. Balen J., Damjanovic D., Maric P., Vdovjak K. Optimized Edge, Fog and Cloud Computing Method for Mobile Ad-hoc Networks // 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). 2021. Pp. 1303–1309. DOI: 10.1109/CSCI54926.2021.00266
22. Нестеров А. А. Оценка уровня готовности систем к взаимодействию на техническом уровне интероперабельности // ИТ-Стандарт. 2024. № 3. С. 97-109.

### References

1. Pshikhopov V. Kh., Gontar D. N., Martyanov O. V. Conceptual Approaches to the Formation of Scenarios for the Combat Use of Groups of Robotic Systems. Systems of Control, Communication and Security. 2022. No. 3. Pp. 138-182. (In Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-138-182
2. Beloglazov D. A., Gaiduk A. R., Kosenko E. Yu., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Soloviev V. V., Titov A. E., Finaev V. I., Shapovalov I. O. *Grupповое управление подвижными объектами в неопределенных средах* [Group control of moving objects in uncertain environments]. Moscow. Fizmatlit. 2015. 305 p. (In Russian).
3. Makarenko S. I. *Interoperabel'nost' organizacionno-tekhnicheskikh sistem* [Interoperability of organizational and technical systems]. Saint Petersburg. Naukoemkie Tehnologii Publ. 2024. 313 p. (In Russian).
4. Mueck M., Karls I. Networking vehicles to everything: Evolving automotive solutions. Boston/Berlin: Walter de Gruyter Inc. 2018. 233 p.
5. Vandenberghe W., Moerman I., Demeester P. Adoption of vehicular ad hoc networking protocols by networked robots. Wireless Personal Communications. 2012. Vol. 64. Pp. 489–522. DOI: 10.1007/s11277-012-0598-2
6. An X., Wu C., Lin Y., Lin M., Yoshinaga T., Ji Y. Multi-Robot Systems and Cooperative Object Transport: Communications, Platforms, and Challenges. IEEE Open Journal of the Computer Society. 2023. Vol. 4. Pp. 23–36. DOI: 10.1109/OJCS.2023.3238324
7. Das S.M., Hu Y.C., Lee C.G., Lu Y.H. Mobility-aware ad hoc routing protocols for networking mobile robot teams. Journal of Communications and Networks. 2007. Vol. 9. Iss. 3. Pp. 296–311. DOI: 10.1109/JCN.2007.6182857
8. Vladyko A., Elagin V., Spirkina A., Muthanna A., Ateya A. A. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications. Electronics. 2022. Vol. 11. Pp. 173. DOI: 10.3390/electronics11020173
9. Fan W., Su Y., Liu J., Li S., Huang W., Wu F., Liu Y. Joint Task Offloading and Resource Allocation for Vehicular Edge Computing Based on V2I and V2V Modes. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2023. Vol. 24. Pp. 4277–4292. DOI: 10.1109/TITS.2022.3230430
10. Hou P., Jiang X., Lu Z., Li B., Wang Z. Joint Computation Offloading and Resource Allocation based on Deep Reinforcement Learning in C-V2X Edge Computing. Applied Intelligence. 2023. Vol. 53. Pp. 22446–22466. DOI: 10.1007/s10489-023-04637-x

11. Dai Y., Xu D., Maharjan S., Zhang Y. Joint Load Balancing and Offloading in Vehicular Edge Computing and Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. Pp. 4377–4387. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2876298
12. Liu L., Chen C., Pei Q., Maharjan S., Zhang Y. Vehicular edge computing and networking: A survey. *Mobile Networks and Applications*. 2021. Vol. 26. Pp. 1145–1168. DOI: 10.1007/s11036-020-01624-1
13. Bonomi F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing. *Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-NETworking (VANET 2011)*. 2011.
14. Khattak H. A., Islam S. U., Din I. U., Guizani M. Integrating fog computing with VANETs: A consumer perspective. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2019. Vol. 3. Pp. 19–25. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2019.1800050
15. Sarrigiannis I., Contreras L.M., Ramantas K., Antonopoulos A., Verikoukis C. Fog-Enabled Scalable C-V2X Architecture for Distributed 5G and Beyond Applications. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34. Pp. 120–126. DOI: 10.1109/MNET.111.2000476
16. Alvi A. N., Javed M. A., Hasanat M. H. A., Khan M. B., Jilani S. A. K., Alkhatami M., Farooq U. Intelligent task offloading in fog computing based vehicular networks. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Pp. 4521. DOI: 10.3390/app12094521
17. Plotnikov P. V., Vladyko A. G. *Analiz podhodov k optimizacii V2X-sistem: klasterizaciya, granichnye i tumannye vychisleniya* [Analysis of Approaches to Optimization of V2X Systems: Clustering, Edge and Fog Computing]. *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi* [Proceedings of Telecommunication Universities]. 2024. Vol. 10. Iss. 3. Pp. 7-22. (In Russian). DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22
18. Plotnikov P. V., Tambovtsev G. I., Vladyko A. G. Numerical Analysis of roadside Units Deployment Models in V2X Communication System. *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2024. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496720
19. Bierzynski K., Escobar A., Eberl M. Cloud, fog and edge: Cooperation for the future? 2017 Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). 2017. Pp. 62–67. DOI: 10.1109/FMEC.2017.7946409
20. Lee, J., Ahn S. Adaptive Configuration of Mobile Roadside Units for the Cost-Effective Vehicular Communication Infrastructure. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019. Vol. 2019. Pp. 6594084. DOI: 10.1155/2019/6594084
21. Balen J., Damjanovic D., Maric P., Vdovjak K. Optimized Edge, Fog and Cloud Computing Method for Mobile Ad-hoc Networks. *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. 2021. Pp. 1303–1309. DOI: 10.1109/CSCI54926.2021.00266
22. Nesterov A. A. *Ocenka urovnya gotovnosti sistem k vzaimodejstviyu na tekhnicheskom urovne interoperabel'nosti* [Assessment of the system readiness level for interaction at the technical level of interoperability]. *IT-Standard*. 2024. No. 3. Pp. 97-109. (In Russian)

**Статья поступила 17 сентября 2024 г.**

### **Информация об авторах**

*Владыко Андрей Геннадьевич* – кандидат технических наук, доцент. Декан факультета радиоэлектронных систем и робототехники. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: разработка телекоммуникационных систем транспортных средств. Тел.: +7-812- 305-12-63. E-mail: vladyko@sut.ru. Адрес: 193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

*Нестеров Алексей Альбертович* – начальник управления организации научной работы и подготовки научных кадров. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: интероперабельность организационно-технических систем. Tel. +7 921 935-15-31. E-mail: nesterov.aa@sut.ru. Адрес: 193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

*Макаренко Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор. Советник генерального директора. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: системы связи, радиотехнические системы, информационное противоборство. Тел. +7 981 820-49-90. E-mail: mak-serg@yandex.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

## Current issues and promising directions for ensuring interoperability of robotic systems of various types and base placements based on Robot-to-Everything technology

A. G. Vladyko, A. A. Nesterov, S. I. Makarenko

**Abstract.** The article aims to examine the application of communication systems on Robot-to-Everything (R2X) technology using edge computing, as related to different types of robotic systems. **Purpose:** The purpose of the work is to formulate proposals for developing promising areas of ensuring robotic systems interoperability using R2X technologies to improve the communication and control of robotic complexes for various purposes. In this regard, the paper considers the main requirements for building a complex computing infrastructure for robotic systems. It offers an assessment of the performance of the computing infrastructure and a functional diagram of interaction with the robotic system using unmanned vehicles as an example. The main advantages of using R2X technology with support for edge computing in solving control problems for different types of robotic systems are presented. **Novelty:** The object of the study is R2X technologies with support for edge computing, which allow implementing a complex of communication and control of robotic systems while ensuring their interoperability. **Results:** A scientifically based technological approach is proposed to build a new direction for ensuring robotic systems interoperability based on R2X technology. **Practical relevance:** The results of the analysis and presented solution to the problem based on modern robotic systems interaction technologies allow, from a unified system position, to provide reasonable options for the real practical implementation of the proposed technologies in the information infrastructure and communication equipment of this type. The interconnected use of Robot-to-Everything technology, the concept of interoperability and edge computing is a promising direction in the creation of a unified control system for robotic complexes of various purposes and locations.

**Keywords:** special-purpose communications equipment, robotic systems, robot-to-everything, fog computing, interoperability

### Information about Authors

*Andrei Gennadievich Vladyko* – PhD, Docent. Dean of the Faculty of Radioelectronic Systems and Robotics. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. Research interests: vehicular communication. Tel. +7 812 305-12-63. E-mail: vladyko@sut.ru. Address: 22 Bolshhevikov ave., building 1, St. Petersburg, 193232, Russia.

*Aleksey Albertovich Nesterov* – Head of the Department for the Organization of Scientific Work. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. Research interests: interoperability of organizational and technical systems. Tel. +7 812 305-12-63. E-mail: nesterov.aa@sut.ru. Address: 22 Bolshhevikov ave., building 1, St. Petersburg, 193232, Russia.

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Advisor to the CEO. JSC "Inteltech". Research interests: communication systems, radio engineering systems, information warfare. Tel. +7 981 820-49-90. E-mail: mak-serg@yandex.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

### Библиографическая ссылка на статью:

Владыко А. Г., Нестеров А. А., Макаренко С. И. Актуальные вопросы и перспективные направления обеспечения интероперабельности робототехнических комплексов различного типа и базирования на основе технологии Robot-to-Everything // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 18-30. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-18-30

### Reference for citation:

Vladyko A. G., Nesterov A. A., Makarenko S. I. Current issues and promising directions for ensuring interoperability of robotic systems of various types and base placements based on Robot-to-Everything technology. Means of Communication Equipment. 2024. No. 3 (167). Pp. 18-30. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-18-30

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 621.317

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-31-41

**Математические модели процесса мониторинга  
технического состояния радиосредств специального назначения**

Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А.

**Аннотация.** *Актуальность* – современная радиосвязь представляет собой большое количество различных технологических решений, которые позволяют осуществлять прием и передачу необходимой оперативной информации. В военных операциях радиосвязь – это один из основных видов связи, она является неотъемлемым инструментом для передачи тактической и стратегической информации, управления войсками и поддержки коммуникаций на поле боя, при этом качество функционирования средств радиосвязи во многом связано с непрерывным наблюдением (мониторингом) их технического состояния. **Цель работы** – разработать интегрированный подход к мониторингу технического состояния военных радиосредств с акцентом на превентивную идентификацию предотказного состояния. В связи с этим в статье рассмотрены основные требования к современным радиосредствам специального назначения, а также существующие математические модели для решения задач мониторинга. **Методы** – в качестве основных выбраны: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, процесс Орнштейна-Уленбека и скрытые марковские модели. В качестве подтверждения эффективности предложенных моделей для прогнозирования параметров радиосредств специального назначения предложены методы машинного обучения, так как они позволяют учитывать сложные и нелинейные зависимости в данных, эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям, а также рекуррентные нейронные сети и алгоритмы градиентного бустинга. **Новизна** исследования заключается в объединении методов математического моделирования, статистического анализа и алгоритмов машинного обучения для повышения точности прогнозирования отказов радиосредств специального назначения. **Результатом** работы стала разработка модели, позволяющей эффективно прогнозировать предотказные состояния радиосредств, что подтверждено экспериментальными исследованиями. **Практическая значимость** заключается в возможности внедрения предложенных методов в системы военной связи для постоянного мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения, что позволит предотвратить срывы управления войсками и повысить боеготовность подразделений.

**Ключевые слова:** алгоритмы машинного обучения, военные радиосредства, математическое моделирование, мониторинг, надежность, предотказное состояние, превентивная идентификация, прогнозирование отказов, радиосвязь, стохастические процессы.

**Введение**

Современные радиосредства специального назначения (далее – РСН) являются критически важными элементами для обеспечения эффективного управления в различных условиях современных военных операций. Надежность их функционирования напрямую влияет на оперативность передачи необходимой информации и успешность выполнения соответствующих задач. Эксплуатация РСН в экстремальных условиях, таких как воздействия противника, перепады температур, повышенная влажность и влияние агрессивных сред, приводит к ускоренному износу оборудования и повышает вероятность отказов [1].

Постоянный мониторинг технического состояния РСН необходим для предотвращения отказов, сбоев и аномалий в процессе их функционирования. Своевременное выявление предотказных состояний, характеризующихся началом деградации параметров систем РСН, позволяет принять превентивные меры для обеспечения непрерывности связи и поддержания работоспособности их оборудования в критических ситуациях.

### **Требования к современным радиосредствам специального назначения**

Радиосредства специального назначения подразделяются на несколько категорий в зависимости от их функционального предназначения и технических параметров [2].

Тактические радиостанции обеспечивают связь на уровне тактического звена управления от командира мотострелкового отделения до командира мотострелковой дивизии. Они характеризуются компактностью, мобильностью и стойкостью к физическим воздействиям, работают в диапазоне ультракоротких волн (далее – УКВ) и обеспечивают связь на дистанциях до 30 км. Стратегические коммуникационные системы предназначены для связи между командными пунктами оперативных объединений и обеспечивают передачу значительных объемов данных на большие расстояния, используя диапазоны коротких волн (далее – КВ) и спутниковые каналы связи. Спутниковые системы связи предоставляют глобальное покрытие и применяются для передачи данных, голосовой связи и навигации, что требует наличия сложной инфраструктуры и высокотехнологичного оборудования. Каждая категория радиосредств имеет технические особенности, которые определяют подходы к мониторингу их технического состояния и диагностике.

Радиосредства специального назначения должны соответствовать высоко регламентированным требованиям. Надежность, характеризующаяся увеличенным средним временем наработки на отказ, достигается за счет качества компонентов и резервирования критически важных элементов. Устойчивость к помехам обеспечивается применением технологий радиоэлектронной защиты, таких как адаптивные антенны и методы помехоустойчивого кодирования. Безопасность передачи данных реализуется с помощью криптографических методов и протоколов, защищающих информацию от перехвата и несанкционированного доступа. Для эксплуатации в экстремальных условиях радиосредства должны сохранять работоспособность при широком диапазоне температур, влажности и механических нагрузок. Соответствие требованиям надежности и нормативным документам по развертыванию и эксплуатации систем радиосвязи является обязательным для заводов изготовителей и органов военного управления, как на стадии разработки, так и в ходе организации контроля за их функционированием.

### **Существующие методы мониторинга**

Существующие методы мониторинга включают визуальное наблюдение функционирования, периодическое техническое обслуживание и последующую диагностику. На данный момент отсутствует возможность получения полной диагностической информации о техническом состоянии радиосредств специального назначения без их выключения и демонтажа [3]. То есть не предполагается возможным проводить глубокую диагностику работающего оборудования, до его отключения и демонтажа для детального анализа всех компонентов.

Периодическое обслуживание представляет собой выполнение регламентных работ по установленному плану, основанному на среднем времени наработки на отказ, без учета индивидуальных особенностей эксплуатации каждого устройства. Недостатками данного подхода являются отсутствие гибкости, что не позволяет учитывать фактическое состояние радиосредств, риск внезапных отказов между периодами обслуживания, а также высокие эксплуатационные затраты, вызванные преждевременной заменой компонентов.

Последующая диагностика проводится после возникновения сбоя или отклонения в работе, что не позволяет предотвратить отказ, а лишь устраняет его последствия. Основные недостатки включают высокие риски, связанные с возможными серьезными последствиями до обнаружения отказа, время простоя, что неприемлемо в условиях

ведения боевых действий, и повышенные расходы ресурсов на срочный ремонт и замену оборудования.

Следовательно, существующие методы мониторинга не соответствуют современным требованиям по надежности и оперативности [3], и требуют разработки новых превентивных подходов для прогнозирования их технического состояния в процессе функционирования.

### Превентивная идентификация предотказного состояния

В общем случае предотказное состояние характеризуется началом деградации параметров системы (РСН), которые еще не приводят к отказу, но указывают на повышенную вероятность его наступления [4]. При этом важно определить ключевые показатели, изменение которых свидетельствуют о начале деградации.

Определим  $X(t)$  как вектор параметров системы в момент времени  $t$ . предотказное состояние наступает, если существует такое  $t_0$ , что для  $t > t_0$  выполняется условие:

$$\exists \delta > 0 : \|X(t) - X_{\text{ном}}\| > \delta, \quad (1)$$

где  $X_{\text{ном}}$  – номинальные значения параметров,  $\|\cdot\|$  – норма в соответствующем пространстве.

Статистический анализ позволяет выявить закономерности в возникновении отказов и определить критические параметры. Рассматриваются функции распределения времени до отказа и интенсивности отказов.

Функция интенсивности отказов  $\lambda(t)$  определяется как:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t \mid T \geq t)}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $T$  – случайная величина времени до отказа.

Таким образом, превентивная идентификация направлена на прогнозирование отказов РСН путем непрерывного мониторинга их параметров. С этой целью могут применяться различные методы. Наиболее предпочтительным методом с точки зрения его простоты и эффективности является анализ временных рядов. Он позволяет исследовать изменения параметров системы во времени и выявлять закономерности, предшествующие сбоям. Хотя этот метод менее сложен по сравнению с другими, он обеспечивает достаточную точность для раннего обнаружения аномалий и прогнозирования отказов, что делает его удобным для применения в реальных условиях мониторинга. Анализ временных рядов включает использование методов автокорреляции и спектрального анализа, позволяющих выявлять аномалии в параметрах системы. Стохастическое моделирование основывается на применении марковских процессов и процессов восстановления для оценки вероятности наступления отказа. Дополнительно применяются алгоритмы машинного обучения, которые, используя исторические данные, прогнозируют вероятность возникновения будущих отказов. Сочетание этих подходов может позволить эффективно проводить превентивную диагностику и снижать вероятность возникновения отказов РСН путем раннего обнаружения деградации параметров.

### Математические модели для решения задач мониторинга

Для обеспечения надежного и непрерывного функционирования радиосредств критически важно своевременно обнаруживать и прогнозировать возможные отказы. Это требует применения эффективных математических моделей, которые позволяют анализировать процессы отказов, динамику параметров системы и скрытые состояния оборудования.

Существуют различные типы моделей, используемых в мониторинге и диагностике технического состояния РСН:

1. Статистические модели отказов, такие как *экспоненциальное распределение* и *распределение Вейбулла*, которые описывают время до отказа компонентов. Они позволяют количественно оценивать надежность оборудования и учитывать различные режимы отказов.

2. Стохастические процессы, в частности *процесс Орнштейна-Уленбека*, применяемые для моделирования динамики изменения критических параметров с учетом случайных воздействий. Эти модели важны для прогнозирования поведения системы и своевременного обнаружения отклонений от нормы.

3. *Скрытые марковские модели* (далее – СММ), используемые для анализа последовательностей наблюдений, где истинные состояния системы не могут быть напрямую измерены. СММ позволяют идентифицировать скрытые состояния, такие как предотказное состояние, и принимать превентивные меры.

Для моделирования времени до отказа РСН при условии постоянной интенсивности отказов  $\lambda$  широко применяется *экспоненциальное распределение*. Основное предположение данной модели заключается в том, что вероятность отказа системы в любой момент времени не зависит от ее возраста, то есть процесс является независимым.

Функция плотности вероятности отказа будет иметь вид:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \quad (3)$$

где  $f(t)$  – плотность вероятности отказа в момент времени  $t$ ,  $\lambda$  – постоянная интенсивность отказов.

Функция надежности  $R(t)$ , определяющая вероятность безотказной работы [4] до момента времени  $t$ , выражается как:

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Среднее время наработки на отказ (*MTTF*) для экспоненциального распределения вычисляется как:

$$MTTF = E[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (5)$$

Дисперсия времени до отказа:

$$\text{Var}[T] = E[T^2] - (E[T])^2 = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (6)$$

Интенсивность отказов является постоянной и не зависит от времени –  $\lambda(t) = \lambda$ .

*Распределение Вейбулла* [5] является более универсальным и позволяет моделировать различные режимы отказов, учитывая изменение интенсивности отказов со временем.

Функция плотности вероятности отказа:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t \geq 0, \quad (7)$$

где  $\eta$  – параметр масштаба,  $\beta$  – параметр формы.

Функция надежности:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (8)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1}. \quad (9)$$

Среднее время наработки на отказ (*MTTF*):

$$MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \quad (10)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция.

Интерпретация параметра формы  $\beta$ :

$\beta < 1$ : интенсивность отказов уменьшается со временем (характерно для периода приработки, называемого иногда периодом «детских» или ранних отказов);

$\beta = 1$ : модель сводится к экспоненциальному распределению с постоянной интенсивностью отказов;

$\beta > 1$ : интенсивность отказов увеличивается со временем (характерно для износа и старения оборудования).

В системах мониторинга применение распределения Вейбулла позволяет адаптировать модели прогнозирования отказов к реальным условиям эксплуатации и более точно оценивать надежность оборудования.

Следующей математической моделью, широко применяемой для моделирования динамики критических параметров оборудования, которые стремятся к некоторому среднему значению под воздействием случайных факторов, используется процесс Орнштейна-Уленбека. Этот стохастический процесс используется для моделирования динамики параметров системы, которые стремятся к некоторому среднему значению  $\mu$  с наличием случайных флуктуаций.

Стохастическое дифференциальное уравнение (СДУ):

$$dX_t = \theta(\mu - X_t)dt + \sigma dW_t, \quad (11)$$

где  $X_t$  – значение параметра в момент времени  $t$ ,  $\theta > 0$  – скорость возврата к среднему  $\mu$ ,  $\mu$  – среднее (долгосрочное) значение параметра,  $\sigma$  – интенсивность случайных воздействий,  $dW_t$  – дифференциал винеровского процесса.

Решение СДУ позволяет прогнозировать поведение параметра и оценивать вероятность выхода за допустимые пределы:

$$X_t = X_0 e^{-\theta t} + \mu(1 - e^{-\theta t}) + \sigma e^{-\theta t} \int_0^t e^{\theta s} dW_s. \quad (12)$$

Математическое ожидание:

$$E[X_t] = \mu + (X_0 - \mu)e^{-\theta t}. \quad (13)$$

Дисперсия:

$$\text{Var}[X_t] = \frac{\sigma^2}{2\theta} (1 - e^{-2\theta t}). \quad (14)$$

Автокорреляционная функция:

$$\text{Corr}[X_s, X_t] = e^{-\theta|t-s|}. \quad (15)$$

Применение в мониторинге технического состояния элементов РСН включает моделирование температуры компонентов, при котором температура стремится к равновесному значению с учетом внешних воздействий. Также применяется моделирование дрейфа параметров, что позволяет учитывать тенденцию параметра возвращаться к нормальному значению после отклонения.

*Пример применения.*

Рассмотрим, как процесс Орнштейна-Уленбека может быть применен для моделирования температуры транзистора в радиосредстве. Температура транзистора является критическим параметром, который влияет на его производительность и долговечность. В процессе работы температура транзистора подвергается случайным колебаниям из-за изменений в нагрузке, окружающей среде и других факторов. При этом наблюдается тенденция возвращения температуры к некоторому среднему значению после отклонений, что соответствует свойствам процесса Орнштейна-Уленбека.

Допустим, температура транзистора в радиосредстве описывается процессом Орнштейна-Уленбека с параметрами:  $\theta = 0,05$ ,  $\mu = 70^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 2^\circ\text{C}$ .

Начальное значение  $X_0 = 80^\circ\text{C}$ .

Тогда математическое ожидание температуры в момент времени  $t$ :

$$E[X_t] = 70 + (80 - 70)e^{-0,05t} = 70 + 10e^{-0,05t}. \quad (16)$$

При  $t = 20$  часов:

$$E[X_{20}] = 70 + 10e^{-1} \approx 70 + 10 \cdot 0,3679 \approx 73,68^\circ\text{C}. \quad (17)$$

Дисперсия температуры:

$$\text{Var}[X_{20}] = \frac{2^2}{2 \cdot 0,05} (1 - e^{-2 \cdot 0,05 \cdot 20}) = \frac{4}{0,1} (1 - e^{-2}) = 40(1 - 0,1353) \approx 34,59. \quad (18)$$

Стандартное отклонение:

$$\sigma_{X_{20}} = \sqrt{\text{Var}[X_{20}]} \approx \sqrt{34,59} \approx 5,88^\circ\text{C}. \quad (19)$$

Это позволяет оценить вероятность того, что температура превысит критическое значение.

Для эффективного прогнозирования состояния РСН и диагностики их компонентов целесообразно использовать математический аппарат, основанный на *скрытых марковских моделях*. Эти модели позволяют анализировать последовательности наблюдений, в которых истинные состояния системы скрыты и не могут быть напрямую измерены.

Основные компоненты СММ:

- множество скрытых состояний  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ;
- множество возможных наблюдений  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ;
- матрица переходов  $A = [a_{ij}]$ , где  $a_{ij} = P(s_j|s_i)$ ;
- матрица вероятностей наблюдений  $B = [b_j(k)]$ , где  $b_j(k) = P(v_k|s_j)$ ;
- вектор начальных вероятностей  $\pi = [\pi_i]$ , где  $\pi_i = P(s_i)$ .

Задача прогнозирования: по наблюдениям  $O = (o_1, o_2, \dots, o_T)$  определить наиболее вероятную последовательность скрытых состояний  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_T)$ .

Для решения этой задачи предпочтительнее использовать *алгоритм Витерби*, так как он позволяет сделать наиболее вероятное предположение о последовательности состояний СММ на основе последовательности наблюдений.

Шаги алгоритма Витерби:

1) Инициализация

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(o_1), \quad \psi_1(i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

2) Рекурсия (для  $t = 2, 3, \dots, T$ )

$$\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(o_t), \quad \psi_t(j) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}]. \quad (21)$$

3) Терминация

$$P^* = \max_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i), \quad q_T^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \delta_T(i). \quad (22)$$

4) Обратный ход (для  $t = T - 1, T - 2, \dots, 1$ )

$$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*) \quad (23)$$

При этом:

$\delta_t(i)$  – наибольшая вероятность пути, ведущего в состояние  $s_i$  в момент времени  $t$ ;

$\psi_t(i)$  – индекс состояния, из которого пришли в состояние  $s_i$  в момент времени  $t$ .

*Пример применения.*

Предположим, система имеет три состояния:

$s_1$  – нормальное функционирование;

$s_2$  – предотказное состояние;

$s_3$  – отказ.

И наблюдения:

$v_1$  – нормальные значения параметров;

$v_2$  – отклонения параметров;

$v_3$  – критические значения.

Матрица переходов  $A$  и матрица эмиссий  $B$  заданы. Имея последовательность наблюдений  $O$ , можно использовать алгоритм Витерби для определения вероятного момента перехода системы в предотказное состояние.

Практическое применение алгоритма Витерби заключается в следующем:

- диагностика состояния системы позволяет определить скрытые состояния на основе наблюдаемых параметров [5];
- прогнозирование отказов позволяет определить раннее обнаружение перехода в предотказное состояние и дает возможность принять превентивные меры [6, 7];
- алгоритм эффективен при обработке длинных последовательностей наблюдений, что критически важно для реального времени мониторинга РСН.

Таким образом, разработка математических моделей для мониторинга технического состояния радиосредств является ключевым элементом в повышении надежности и эффективности их функционирования. При этом модели на основе экспоненциального и вейбулловского распределений позволяют количественно оценивать надежность оборудования и прогнозировать вероятность отказов, учитывая различные режимы работы и условия эксплуатации. Применение процессов Орнштейна-Уленбека дает возможность моделировать динамику изменения критических параметров с учетом случайных воздействий, что важно для своевременного обнаружения отклонений от нормы. Использование скрытых марковских моделей и алгоритма Витерби обеспечивает эффективный анализ последовательностей наблюдений и позволяет идентифицировать скрытые состояния системы, такие как предотказное состояние, с высокой точностью. Все эти модели в совокупности создают основу для современных систем мониторинга, способных в реальном времени обнаруживать и прогнозировать потенциальные отказы, что является критически важным для обеспечения непрерывности и надежности систем связи специального назначения.

### Экспериментальные исследования

Для подтверждения эффективности рассмотренных выше моделей был проведен эксперимент с участием 100 радиостанций тактического звена управления. В течение 6 месяцев осуществлялся непрерывный сбор данных о параметрах функционирования (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические характеристики параметров

Параметр	Среднее ( $\mu$ )	Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	Коэффициент вариации (CV)
Мощность выходного сигнала (Вт)	48	2,5	5,2 %
Уровень шума (дБ)	4	0,8	20 %
Температура (°C)	78	3,2	4,1 %
Напряжение питания (В)	12	0,6	5 %
Частота ошибок (%)	0,5	0,1	20 %

Данные собирались с частотой 1 раз в 10 минут и хранились в централизованной базе данных для последующего анализа.

Корреляционный анализ продемонстрировал, что повышение температуры и уровня шума связано с увеличением частоты ошибок, что свидетельствует о возможном переходе системы в предотказное состояние.

Для прогнозирования параметров системы целесообразнее применять *методы машинного обучения*, так как они позволяют учитывать сложные и нелинейные зависимости в данных, а также эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям. Методы, такие как *рекуррентные нейронные сети* и *алгоритмы градиентного бустинга* [8], обеспечивают высокий уровень гибкости и точности, что делает их предпочтительным выбором для анализа и предсказания динамики параметров.

Для прогнозирования были выбраны нижеприведенные алгоритмы, позволяющие учитывать специфические особенности данных:

- *рекуррентные нейронные сети* (далее – *RNN*), которые наиболее подходят для анализа временных рядов [9];
- *долговременная краткосрочная память* (далее – *LSTM*), являющаяся разновидностью *RNN* и обладающая способностью запоминать долгосрочные зависимости;
- *алгоритмы градиентного бустинга* (далее – *XGBoost*), поскольку они эффективны при работе с табличными данными и позволяют выявлять нелинейные зависимости.

В процессе обучения и тестирования данные были разделены на обучающую (70 %) и тестовую (30 %) выборки. Для настройки параметров моделей использовалась кросс-валидация. Результаты применения указанных методов машинного обучения [10] оценивались с использованием метрик, приведенных в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты применения методов машинного обучения

Алгоритм	Точность	Полнота	Точность предсказания	F1-мера
RNN	90 %	88 %	89 %	88,5 %
LSTM	95 %	93 %	94 %	93,5 %
XGBoost	92 %	90 %	91 %	90,5 %

Модель *LSTM* показала наилучшие результаты, что свидетельствует о ее способности эффективно обрабатывать временные зависимости в данных.

Проведенная валидация на независимой выборке данных подтвердила эффективность моделей. Модель *LSTM* смогла предсказать 93 % предотказных состояний за 24 часа до их фактического наступления, что свидетельствует о высокой точности прогнозирования.

### Заключение

В рамках проведенного исследования разработаны математические модели мониторинга состояния функционирования радиосредств специального назначения, ориентированные на раннюю диагностику предотказных состояний. С учетом сложных эксплуатационных условий, характерных для использования радиосредств в современных военных операциях, таких как разнообразие географических зон, экстремальные метеорологические условия и строгие требования к безопасности передачи данных, предложенный подход объединяет методы математического моделирования, статистического анализа и алгоритмы машинного обучения.

Применение стохастических моделей, включая функции Вейбулла и процессы Орнштейна-Уленбека, позволило более точно описать процессы деградации параметров РСН в экстремальных условиях эксплуатации. Алгоритмы машинного обучения, особенно глубокие нейронные сети, доказали свою эффективность в анализе больших объемов данных и выявлении скрытых закономерностей, предвещающих возможные отказы [8-10].

Экспериментальные исследования подтвердили высокую точность и надежность разработанной модели в прогнозировании предотказных состояний. Это обеспечивает возможность своевременного принятия превентивных мер, предотвращения срывов в управлении войсками и повышения общей боеготовности подразделений.

Практическое внедрение предложенных математических моделей и методов в системы военной связи позволит обеспечить постоянный мониторинг технического

состояния РСН, повысить их надежность и эффективность функционирования. Это особенно важно в тактическом и оперативно-тактическом звеньях управления, где непрерывность и качество связи напрямую влияют на успешность выполнения боевых задач.

### Литература

1. Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Модели для анализа прогнозируемых воздействий на систему мониторинга техники связи на узле связи пункта управления оперативного объединения // IX Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции: Сборник материалов. СПб.: ВАС, 2024. С. 14-21.
2. Дворников С. В., Калинин В. И., Чудаков А. М. Системы радиосвязи военного назначения. Учебник: в 2 частях. Часть 1: Радиостанции малой мощности. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2014. 304 с.
3. Боговик А. В., Сафиулов Д. М. Проблемы организации мониторинга телекоммуникационного оборудования узлов связи пунктов управления оперативного объединения и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 196-198.
4. Сугак Е. В. Прикладная теория надежности: учебник для вузов: в 3 частях. Часть 3: Испытания и контроль. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 288 с.
5. Шмидт А. А., Косырев А. В. Анализ научно-методического аппарата диагностики и контроля, мониторинга и прогнозирования технического состояния военной техники связи // Техника средств связи. 2023. № 4 (164). С. 81-92.
6. Будко П. А., Шмидт А. А., Голунов М. В., Сафиулов Д. М. Прогнозирование технического состояния в системе технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления // IX Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции: Сборник материалов. СПб.: ВАС, 2024. С. 40-44.
7. Будко П. А., Шмидт А. А., Голунов М. В., Сафиулов Д. М. Анализ методов прогнозирования технического состояния средств радиосвязи // IX Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции: Сборник материалов. СПб.: ВАС, 2024. С. 45-49.
8. Морозова В. И. Прогнозирование методом машинного обучения // Молодой ученый. 2022. № 21 (416). С. 202-204.
9. Пономарева К. А. Применение искусственных нейронных сетей при решении задач прогнозирования // Наука без границ. 2020. № 1(41). С. 42-47.
10. Вьюгин В. В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. М.: 2013, 2018. 484 с.

### References

1. Bogovik A.V., Safiulov D. M., Schmidt A. A. *Modeli dlya analiza prognoziruemy`x vozdeystvij na sistemu monitoringa texniki svyazi na uzle svyazi punkta upravleniya operativnogo ob`edineniya* [Models for the analysis of predicted impacts on the monitoring system of communication equipment at the communication node of the control point of the operational association]. IX Interuniversity scientific and practical conference «Problems of technical support of troops in modern conditions». Proceedings of the conference. Collection of materials. St. Petersburg. Military Academy of Communications, 2024. Pp. 14-21. (In Russian).
2. Dvornikov S. V., Kalinin V. I., Chudakov A.M. *Sistemy radiosvyazi voennogo naznacheniya* [Military radio communication systems. Studies in 2 parts. Part 1: Low-power radio stations]. St. Petersburg. Military Academy of Communications, 2014. 304 p. (In Russian).
3. Bogovik A. V., Safiulov D. M. *Problemy` organizacii monitoringa telekommunikacionnogo oborudovaniya uzlov svyazi punktov upravleniya operativnogo ob`edineniya i puti ix resheniya* [Problems of organization of monitoring of telecommunication equipment of communication nodes of control points of

the operational association and ways of their solution]. Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 5. Pp. 196-198. (In Russian).

4. Sugak E. V. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti: uchebnik dlya vuzov: v 3 chastyax. Chast` 3: Ispy`taniya i kontrol`* [Applied theory of reliability. Textbook for universities in 3 parts. Part 3. Testing and control]. St. Petersburg. Lan, 2022. 288 p. (In Russian).

5. Schmidt A. A., Kosyrev A. V. Analysis of the scientific and methodological apparatus for diagnostics and control, monitoring and forecasting of the technical condition of military communications equipment. Means of Communication Equipment. 2023. No 4 (164). Pp. 81-92. DOI:10.24412/2782-2141-2023-4-81-92 (In Russian).

6. Budko P. A., Schmidt A. A., Golyunov M. V., Safiulov D. M. *Prognozirovanie texnicheskogo sostoyaniya v sisteme texnicheskogo obespecheniya svyazi i avtomatizirovanny`x sistem upravleniya* [Forecasting the technical condition in the system of technical support of communications and automated control systems]. IX Interuniversity scientific and practical conference «Problems of technical support of troops in modern conditions». Proceedings of the conference. Collection of materials. St. Petersburg. Military Academy of Communications, 2024. Pp. 40-44. (In Russian).

7. Budko P. A., Schmidt A. A., Golyunov M. V., Safiulov D. M. *Analiz metodov prognozirovaniya texnicheskogo sostoyaniya sredstv radiosvyazi* [Analysis of methods for predicting the technical condition of radio communications equipment]. IX Interuniversity scientific and practical conference «Problems of technical support of troops in modern conditions». Proceedings of the conference. Collection of materials. St. Petersburg. Military Academy of Communications, 2024. Pp. 45-49. (In Russian).

8. Morozova V. I. *Prognozirovanie metodom mashinnogo obucheniya* [Forecasting by machine learning]. Young Scientist. 2022. No 21 (416). Pp. 202-204. (In Russian).

9. Ponomareva K. A. *Primenenie iskusstvenny`x nejronny`x setej pri reshenii zadach prognozirovaniya* [The use of artificial neural networks in solving forecasting problems]. Science without borders. 2020. No 1(41). Pp. 42-47. (In Russian).

10. Vyugin V. V. *Matematicheskie osnovy` mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya* [Mathematical foundations of machine learning and forecasting]. Moscow. 2013, 2018. 484 p. (In Russian).

Статья поступила 15 сентября 2024 г.

### Информация об авторах

*Боговик Александр Владимирович* – кандидат технических наук, профессор. Профессор кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. Тел.: +7 (812) 247–98–42, E-mail: bogovikav@mail.ru.

*Сафиулов Давлет Муратович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адыонкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. Тел.: +7 (812) 247–98–42, E-mail: davletzas@mail.ru.

*Шмидт Анна Алексеевна* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адыонкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи. Область научных интересов: мониторинг информационных ресурсов; сбор и обработка информации. Тел.: +7 (812) 247–98–42, E-mail: anutikaaa@mail.ru.

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

### Mathematical models of the process of monitoring the technical condition of special-purpose radio equipment

A. V. Bogovik, D. M. Safiullof, A. A. Schmidt

**Annotation.** Modern radio communication represents a large number of different technological solutions that allow the reception and transmission of necessary operational information. In military operations, radio communication is one of the main types of communication, it is an integral tool for

transmitting tactical and strategic information, managing troops and supporting communications on the battlefield, while the quality of functioning of radio communications is largely related to the continuous monitoring of their technical condition. In this regard, the article discusses the basic requirements for modern special-purpose radio equipment, as well as existing mathematical models for solving monitoring problems. The main ones are: exponential distribution, Weibull distribution, Ornstein-Uhlenbeck process and hidden Markov models. As a confirmation of the effectiveness of the proposed models for predicting the parameters of special-purpose radio equipment, machine learning methods are proposed, since they allow taking into account complex and nonlinear dependencies in data, effectively adapting to changing conditions, as well as recurrent neural networks and gradient boosting algorithms. **The aim** of the work is to develop an integrated approach to monitoring the technical condition of military radio equipment with an emphasis on preventive identification of the pre-failure condition. **The novelty** of the research lies in the combination of mathematical modeling methods, statistical analysis and machine learning algorithms to improve the accuracy of predicting failures of special-purpose radio equipment. **The result** of the work was the development of a model that makes it possible to effectively predict the pre-failure states of radio equipment, which is confirmed by experimental studies. **The practical significance** lies in the possibility of introducing the proposed methods into military communications systems for constant monitoring of the technical condition of special-purpose radio equipment, which will prevent disruptions of command and control and increase the combat readiness of units.

**Keywords:** machine learning algorithms, military radio equipment, mathematical modeling, monitoring, reliability, pre-failure status, preventive identification, failure prediction, radio communications, stochastic processes.

#### Information about Authors

*Alexander Vladimirovich Bogovik* – PhD, Professor. Professor at the department of technical support of communication and automation of the Military Academy of Communications. Field of research: information monitoring; data acquisition. Tel.: +7 (812) 247-98-42. E-mail: bogovikav@mail.ru.

*Davlet Muratovich Safiullov* – The postgraduate student at the Department of technical support of communication and automation of the Military Academy of Communications. Field of research: information monitoring; data acquisition. Tel.: +7 (812) 247-98-42. E-mail: davletzas@mail.ru.

*Anna Alekseevna Schmidt* – The postgraduate student at the Department of technical support of communication and automation of the Military Academy of Communications. Field of research: information monitoring; data acquisition. Tel: +7 (812) 247-98-42. E-mail: anutikaaa@mail.ru.

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Математические модели процесса мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 31-41. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-31-41

#### Reference for citation:

Bogovik A. V., Safiullov D. M., Schmidt A. A. Mathematical models of the process of monitoring the technical condition of special-purpose radio equipment. *Means of Communication Equipment*. 2024. № 3 (167). Pp. 31-41. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-31-41

УДК 004.94

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-42-51

## Модель мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, как объекта компьютерной разведки

Гречишников Е. В., Федяев Ю. Ю., Гречишникова Т. А.

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод моделирования разведывательных воздействий компьютерной разведкой на элементы мультисервисных сетей связи и мультисервисные сети связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации в целом. Целью моделирования является получение зависимостей вероятности вскрытия компьютерной разведкой элементов и мультисервисной сети связи в целом, в условиях использования ее ресурсов, от времени функционирования сети (элементов мультисервисной сети связи). **Целью работы** является моделирование разведывательных воздействий компьютерной разведкой на элементы мультисервисных сетей связи для получения зависимостей вероятности вскрытия компьютерной разведкой элементов и мультисервисной сети связи в целом, в условиях использования ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, от времени функционирования сети (элементов мультисервисной сети связи). **Новизна работы:** рассмотренная в статье модель мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, как объекта компьютерной разведки позволяет определить частные показатели функционирования мультисервисной сети связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации при воздействии на нее компьютерной разведки злоумышленников и в дальнейшем с помощью разработанной методики оценки защищенности и надежности элементов мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации решить задачу по реализации требуемой защищенности мультисервисных сетей связи. Получены следующие **результаты:** определены зависимости вероятности вскрытия компьютерной разведкой элементов и мультисервисной сети связи в целом, в условиях использования ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, от времени функционирования мультисервисной сети связи и ее элементов. **Практическая значимость** состоит в возможности решать задачу по реализации требуемой защищенности сетей связи.

**Ключевые слова:** время квазистационарного состояния элемента мультисервисной сети связи, демаскирующие признаки, Единая сеть электросвязи Российской Федерации, компьютерная разведка, мультисервисные сети связи, элементы сетей связи.

### Введение

Проведенный анализ существующих моделей и методик по оценке и обеспечению защищенности системы и сетей связи, показал, что существующие модели и методики не в полной мере учитывают изменившиеся условия функционирования сетей связи, использующих сетевые ресурсы Единой сети электросвязи Российской Федерации (ЕСЭ РФ), не учитывают динамику изменения оперативной обстановки, а также не учитывают комплексный характер объектов (узлов) связи.

В проводимом исследовании выбран объект исследования, которым являются мультисервисные сети связи (МСС), функционирующие на базе мобильных многофункциональных комплексов связи с использованием сетевых ресурсов ЕСЭ РФ, а также учитывается значительное количество исходных данных, что позволит повысить достоверность и точность получаемых результатов. В некоторых работах предполагалось развертывание и функционирование системы связи с использованием ресурсов ЕСЭ РФ или каких-либо других сетей связи, однако не учитывалось многообразие демаскирующих признаков (ДМП), которыми обладают элементы МСС и элементы ЕСЭ РФ, не производилось ранжирование и сокращение числа ДМП, а также не достаточно учитывалась степень информированности противника, которая считалась, как правило, постоянной (либо злоумышленник знает все, либо ничего о нашей системе и сетях связи).

## **1. Постановка задачи на разработку модели мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов ЕСЭ РФ, как объекта компьютерной разведки**

Целью моделирования является получение зависимостей вероятности вскрытия компьютерной разведкой (КР) элементов и МСС в целом, в условиях использования ресурсов ЕСЭ РФ, от времени функционирования МСС (элементов МСС).

Цель моделирования осуществляется через имитацию процессов обмена информационными сообщениями между пользователями всех типов и выявления, наблюдения и регистрации идентификационных характеристик, связанных с компонентами сетевой структуры в рамках КР [1].

Задача моделирования МСС, как объекта компьютерного анализа в рамках применения ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, предполагает выполнение ряда ключевых шагов:

- отбор и аргументация ключевых показателей защищенности сетевых компонентов при осуществлении киберразведки и вредоносных программных манипуляций;
- подробное представление сетевой модели с использованием средств Единой сети электросвязи Российской Федерации, как потенциального объекта воздействия злоумышленника;
- принятие решения и аргументация выбранной среды программирования;
- создание имитационной модели МСС, с применением средств ресурсов ЕСЭ РФ, как объекта атаки злоумышленника и её анализ.

При отборе и обосновании ключевых показателей защищенности компонентов МСС, а также среды программирования для моделирования МСС, как точки воздействия злоумышленника, необходимо руководствоваться требованиями нормативных документов.

Используя ресурсы ЕСЭ РФ в качестве объекта компьютерной разведки, целесообразно провести подробное представление сетевой модели МСС с учетом особенностей использования МСС в ходе информационной войны. Подробное представление сетевой модели включает:

- создание схемы универсальной модели сетевых коммуникаций как объекта манипуляции со стороны хакера;
- создание структуры фрагмента ЕСЭ РФ с использованием каналов связи в интересах МСС;
- осуществление разработки алгоритмов моделирования (симуляции программных воздействий).

При создании схемы универсальной модели сетевых коммуникаций как объекта манипуляции со стороны хакера важно учитывать ключевые факторы, воздействующие на безопасность элементов МСС.

При создании структуры фрагмента ЕСЭ РФ необходимо учитывать схему, топологию и состав МСС, список телекоммуникационных услуг, доступных в указанном регионе. Именно задействование МСС в ЕСЭ РФ обеспечивает доступ к ключевым элементам КР [2].

В процессе формирования модели МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ в качестве объекта КР, необходимо учитывать деструктивные программные воздействия (ДПВ) на основе анализа статистических данных и их прогнозирования. Важно выделить ключевые типы воздействий на элементы МСС и ранжировать их по степени влияния как на защищенность МСС, так и на качество обслуживания абонентов различных категорий.

При разработке моделирующего алгоритма имитации ДПВ необходимо учесть ошибки при обнаружении и распознавании элементов МСС компьютерной разведкой злоумышленника.

Разрабатывать имитационную модель МСС с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, как объекта КР, предлагается следующим образом:

- определить и подтвердить математические методы для создания модели;
- разработать алгоритм моделирования МСС в качестве объекта воздействия злоумышленника с учетом его совместного функционирования с ЕСЭ РФ;
- спланировать программную реализацию модели;
- оценить качество разработанной модели.

В ходе определения и подтверждения математических методов для создания модели, необходимо:

- проанализировать разработанный алгоритм моделирования МСС с точки зрения возможности представления его различными методами моделирования;
- выбрать язык моделирования [3].

МСС и ЕСЭ РФ как сети массового обслуживания необходимо представить в виде графов с описанием схемы с помощью матриц согласованности и маршрутизации.

Алгоритм моделирования МСС в качестве объекта воздействия злоумышленника с учетом его совместного функционирования с ЕСЭ РФ, должен пояснять полное описание функционирования МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ:

- отобранных путей передачи применяемых основных и резервных каналов связи, цифровых потоков;
- подобранных алгоритмов моделирования КР и ДПВ злоумышленника с учетом характеристик современных средств манипуляции сетями связи и содержания информационного противостояния;
- симуляции системы восстановления.

Реализацию математической модели в программном обеспечении рекомендуется осуществить с учетом следующих требований:

- программа должна функционировать в реальном времени с учетом имеющихся ресурсов персонального компьютера, таких как производительность и объем оперативной памяти;
- структура программы должна гарантировать возможность обновления, расширения и добавления функций модели;
- программа должна отличаться простотой и удобством использования.

Основными исходными данными являются:

- число элементов МСС –  $n$ ;
- количество ДМП, принадлежащих элементам МСС –  $K$ ;
- среднее время функционирования элемента МСС –  $\bar{t}_{n\ ij}$ ;
- количество точек доступа ЕСЭ –  $m$ ;
- среднее время функционирования точек доступа ЕСЭ –  $\bar{t}_{m\ ij}$ ;
- согласованность сети –  $S_{yc}$ ;
- число абонентов –  $N_a$ ;
- пропускная способность объекта связи –  $Pr_y$ ;
- пропускная способность линии связи –  $Pr_i$ ;
- пакет оказываемых услуг связи –  $N_c$ ;
- повторяемость оказания услуг связи –  $Tc_i$ ;
- необходимая пропускная способность услуги связи –  $Pr_{ci}$ ;
- средняя продолжительность демонстрации ДМП –  $t_{ci}$ ;
- ресурс разведки –  $S_{pj}$ ;
- количество разведываемых одновременно объектов –  $N_{pj}$ ;
- среднее время разведки –  $T_{pj}$ ;
- коэффициент защищенности  $i$ -го элемента от  $j$  разведки –  $K_{conpj}$ ;

- период проявления ДМП элемента МСС –  $T_{\text{проявл.}}$  ;
- время наблюдения ДМП элемента МСС –  $t_{\text{набл.}}$  ;
- коэффициент значимости ДМП элемента МСС –  $K_{\text{знач.}}$  ;
- среднее время вскрытия ДМП –  $t_{Rj}$  ;
- коэффициент, характеризующий вес  $i$ -ого ДМП  $j$ -го элемента МСС.

Допущениями выступают:

- ДМП элементов МСС характеризуются временем и периодичностью их проявления;
- элемент МСС считается вскрытым, если КР зафиксировано 80 % его ДМП;
- применительно к этапу моделирования периода непосредственной угрозы, возможности воздействий злоумышленником на МСС рассматривается как стационарный, так полевой компоненты МСС;
- МСС считается вскрытой, если вскрыто не менее 80 % ее элементов.

Ограничениями выступают:

- ресурс и возможности КР имеют ограничения;
- временные возможности КР имеют ограничения;
- изучаются признаки, которые могут выдавать средства связи элементов МСС;
- время, необходимое для обнаружения элемента сетей связи с помощью сил и средств видовой разведки, значительно больше, чем время, затрачиваемое на обнаружение этого элемента с помощью компьютерной разведки.

Частными показателями являются:

- $T_{\text{набл ДМП}_{ij}}$  – период проявления ДМП элементов МСС;
- $N_{\text{вскр. } j}$  – количество вскрытых элементов МСС;
- $t_{\text{КСС узССН}}$  – время квазистационарного состояния элемента МСС;
- $t_{\text{КСС Аб}}$  – время квазистационарного подключения абонента МСС к элементу

(объекту связи).

Основными выходными результатами являются функциональные зависимости основных показателей защищенности элементов МСС: вероятности вскрытия элементов МСС от времени их функционирования  $P_{\text{вскр.эл.}} = f(t_{\text{функц.эл.}})$ , вероятности вскрытия МСС от времени ее функционирования  $P_{\text{вскр.МСС}} = f(t_{\text{функц.МСС}})$ .

## 2. Выбор и обоснование основных показателей защищенности элементов МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ в условиях ведения КР

Выбор и обоснование основных показателей защищенности элементов МСС является одной из важнейших задач при разработке модели МСС, как объекта компьютерной разведки. Выбор номенклатуры показателей защищенности элементов МСС целесообразно осуществлять на основе классификации системы по признакам, характеризующих ее назначение, последствия ведения КР в виде программного подавления с использованием ДПВ на элементы МСС [4, 5].

Основными признаками, учитываемыми при выборе и обосновании основных показателей защищенности элементов МСС должны быть:

- способности КР в области выявления и документирования компонентов МСС;
- назначение МСС, функционирующей с использованием ресурсов ЕСЭ РФ;
- количество потенциальных состояний телекоммуникационной сети в условиях осуществления КР и деструктивных программ;
- возможности по программному подавлению элементов МСС в период угрозы воздействий злоумышленника на МСС.

Рассмотрим основные показатели защищенности элементов МСС в период угрозы воздействий злоумышленника на МСС в зависимости от соотношения и характеристик различных факторов.

Самым важным показателем КР является время ее осуществления –  $t_{кр}$ . Учитывая, что временной, технической и человеческий ресурсы ограничены, то время ведения КР имеет определенный предел  $t_{кр} \leq t_{кр}^{треб}$ , который в свою очередь должен быть достаточен для обнаружения и вскрытия элементов МСС.

В свою очередь элементы МСС обладают групповыми и индивидуальными ДМП, которые в зависимости от мероприятий по защите элементов МСС, могут быть выявлены и зафиксированы КР противника. Следовательно, одним из показателей защищенности элементов МСС является вероятность фиксации  $P_{фикс\ x_{ij}}$  (обнаружения)  $i$ -го ДМП  $j$ -го, (где  $x$  – значение ДМП элемента МСС) и среднее время его проявления  $\bar{t}_{K\ ij}$  (где  $K$  – количество ДМП элемента МСС).

Каждый элемент МСС, в зависимости от режима функционирования, обладает определенным набором ДМП. При этом степень вскрытия элемента МСС в конкретный момент времени зависит от количества и полноты вскрытия его ДМП. В связи с этим, одним из основных показателей защищенности элементов МСС является вероятность вскрытия элемента МСС –  $P_{вскр\ эл}$ .

Учитывая то, что МСС в период угрозы воздействий злоумышленника на неё функционирует с использованием ресурсов ЕСЭ РФ, то компоненты МСС при оказании услуг связи пользователям будут осуществлять подключения к ЕСЭ РФ. Исходя из этого, важным показателем защищенности компонентов МСС будет представлено время квазистационарного состояния компонента МСС к ЕСЭ РФ –  $t_{ксс}$ .

Использование МСС ресурсов ЕСЭ РФ при обеспечении связи часто приводит к необходимости применения типовой аппаратуры и оборудования. Однако учитывая разнообразие услуг, предоставляемых абонентам, а также особенности элементной базы аппаратуры и оборудования, используемого при функционировании МСС, одним из основных показателей защищенности ее элементов можно выделить значения ДМП элементов МСС –  $x_{ij}$ .

### 3. Содержательное описание модели мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов ЕСЭ РФ, как объекта компьютерной разведки

Основными этапами содержательного описания модели являются:

- разработка структуры обобщенной модели (построение концептуальной модели);
- разработка моделирующих алгоритмов (имитации компьютерных воздействий, имитации эксплуатационных отказов и повреждений, имитация функционирования подсистемы диагностирования) и их программная реализация.

При функционировании МСС, происходит свободный анализ злоумышленником ДМП компонентов МСС. Одной из основных причин этого является то, что ресурсами ЕСЭ РФ могут пользоваться как добросовестные пользователи, так и злоумышленники [6].

Исходя из этого, схема обобщенного алгоритма модели МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ, как объекта компьютерной разведки представлена на рис. 1.

В блоке 1 осуществляют ввод исходных данных, в котором задают: число элементов МСС –  $n$ , количество ДМП принадлежащих элементам МСС –  $K$ ; среднее время функционирования элемента МСС –  $\bar{t}_{n\ ij}$ ; количество элементов ЕСЭ –  $m$ ; среднее время функционирования элемента ЕСЭ –  $\bar{t}_{m\ ij}$ ; согласованность сети –  $S_{yc}$ ; число абонентов –  $Na$ ;

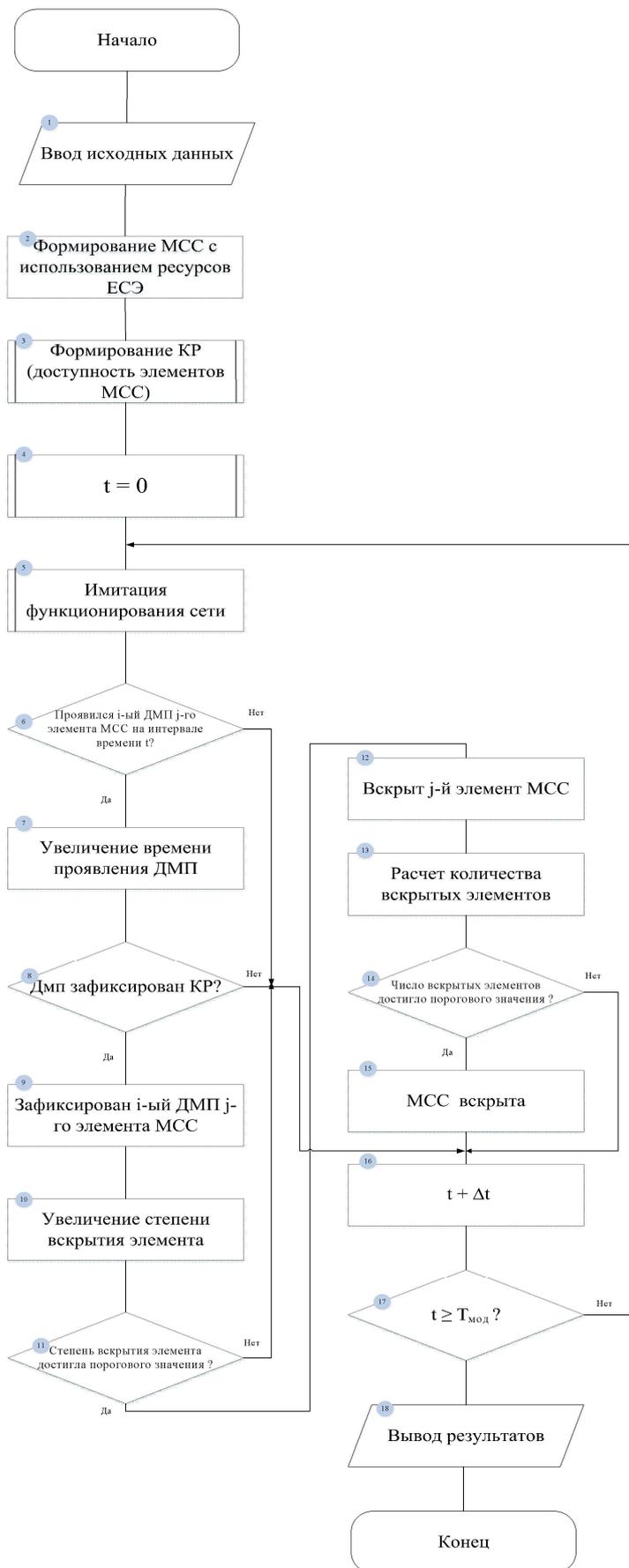


Рис. 1. Схема обобщенного моделирующего алгоритма МСС как объекта компьютерной разведки

пропускная способность объекта связи –  $Pr_y$ ; пропускная способность линии связи –  $P_{rl}$ ; пакет оказываемых услуг связи –  $N_c$ ; повторяемость оказания услуг связи –  $T_{ci}$ ; необходимая пропускная способность услуги связи –  $P_{rci}$ ; средняя продолжительность демонстрации ДМП –  $t_{Ci}$ ; ресурс разведки –  $S_{pj}$ ; количество разведываемых одновременно объектов –  $N_{pj}$ ; среднее время разведки –  $T_{pj}$ ; коэффициент защищенности  $i$ -го элемента от  $j$  разведки –  $K_{conpj}$ .

В блоке 2 осуществляется формирование среды моделирования функционирования МСС.

В блоке 3 осуществляют формирование КР, при этом генерируют: время вскрытия ДМП –  $t_R$ ; количество разведываемых объектов –  $N_R$  время вскрытия объекта –  $t_{вскр}$ .

В блоке 4 устанавливается моделирующий счетчик в начальное положение  $t = 0$

В блоке 5 осуществляют имитацию функционирования МСС.

В блоке 6 выполняется проверка условия проявления  $i$ -го ДМП  $j$ -го элемента МСС на интервале времени  $t$ . При этом если ДМП проявился, то управление передается блоку 7, если же ДМП не проявился, тогда ДМП не зафиксирован разведкой противника и управление передается блоку 16.

В блоке 7 увеличивают время наблюдения ДМП на заданный шаг  $\Delta t$ .

В блоке 8 проверяется выполнение условия достаточности времени наблюдения ДМП для его фиксации разведкой противника. При этом если время наблюдения ДМП КР противника меньше требуемого (заданного), тогда управление передается блоку 16. Если же время наблюдения ДМП больше либо равно заданному значению ( $T_{набл.ДМП(i,j)} \geq T_{фикс(i,j)}$ ), тогда управление передается блоку 9.

В блоке 9 производится фиксация ДМП МСС во времени.

В блоке 10 происходит увеличение степени вскрытия ДМП элемента МСС на заданную величину  $K_{набл.об_i} = K_{набл.об_i} + K_{ДМП(i,j)}$ .

В блоке 11 проверяется выполнение условия достаточности степени вскрытия элемента МСС, при этом, если степень вскрытия элемента не достигла порогового значения, тогда управление передается блоку 16. Если же степень вскрытия элемента МСС превысила или стала равна пороговому значению ( $K_{набл.об_i} \geq K_{порог_i}$ ), тогда управление передается блоку 12.

В блоке 12 фиксация времени вскрытия элемента МСС.

В блоке 13 происходит увеличение числа вскрытых элементов МСС  $N_{вскр.об_j} = N_{об_j} + 1$  на единицу.

В блоке 14 проверяется выполнение условия по количеству вскрытых элементов МСС, при этом если количество вскрытых элементов МСС не достигло порогового значения, то управление передается блоку 16. Если же количество вскрытых элементов превысило или стало равно пороговому значению ( $N_{вскр} \geq N_{порог}$ ), то управление передается блоку 15.

В блоке 15 фиксация времени вскрытия МСС.

В блоке 16 увеличивают время моделирования на заданный шаг моделирования  $t + \Delta t$ .

В блоке 17 осуществляют проверку выполнения условия, при котором общее время  $t < T_{мод}$ , тогда управление передается блоку 5 и цикл моделирования выполняется заново, если же  $t \geq T_{мод}$ , то управление передается блоку 18.

В блоке 18 осуществляют вывод результатов моделирования в табличном или графическом виде.

Имитационная модель МСС как объекта КР реализована на языке программирования *Any logic*. При реализации моделирующего алгоритма в программной среде *Any logic*, получены основные выходные зависимости. Причем при задании исходных данных для элементов МСС, задаем время квазистационарного состояния (время подключения элемента к точке доступа ЕСЭ РФ)  $t_{КСС} = \text{const}$ .

После получения вероятностей вскрытия для каждого элемента МСС, можно получить вероятность вскрытия для МСС в целом.

Разработанная аналитико-имитационная модель позволяет получать зависимости вероятностей вскрытия элементов МСС при подключении к различным точкам доступа ЕСЭ РФ, но при фиксированных на время одного цикла моделирования значениях характеристик (демаскирующих признаков) элементов МСС. Основные выходные результаты, полученные в результате моделирования МСС как объекта КР, в дальнейшем используются в методике оценки защищенности элементов МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ от КР.

### Заключение

Рассмотренная в статье модель МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ, как объекта компьютерной разведки позволяет определить частные показатели функционирования МСС с использованием ресурсов ЕСЭ РФ при воздействии на нее КР злоумышленников и в дальнейшем с помощью разработанной методики оценки защищенности и надежности элементов мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов ЕСЭ РФ решить задачу по реализации требуемой защищенности мультисервисных сетей связи.

### Литература

1. Гречишников Е. В., Стародубцев Ю. И., Стукалов И. В. Моделирование системы связи, интегрированной в единую сеть электросвязи России, при ведении информационного противоборства // Материалы международного конгресса. Научно-практическая конференция «Инфокоммуникации в решении задач тысячелетия» (Санкт-Петербург, 12-13 ноября 2010 г.). – СПб.: ООО «ПИФ СОМ», 2010. – 307 с., С. 172-180.

2. Гречишников Е. В., Комарович В. Ф., Белов А. С. и др. Способ моделирования сетей связи / Патент РФ на изобретение №2379750 от 20.01.2010 г.

3. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: Учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с., Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов/ Советов Б. Я., Яковлев С. А. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2003. – 295 с.

4. Гречишников Е. В., Белов А. С., Трахинин Е. Л. и др. Способ моделирования процессов обоснования требуемого уровня живучести распределенных сетей связи вышестоящей системы управления в условиях вскрытия и внешних деструктивных воздействий / Патент РФ на изобретение № 2702503 от 08.10.2019 Бюл. № 25.

5. Гречишников Е. В., Добрышин М. М., Белов А. С., Анисимов В. Г. и др. Способ моделирования процессов обеспечения структурной живучести распределенных сетей связи многоуровневых систем управления в условиях деструктивных воздействий / Патент РФ на изобретение № 2698407 от 26.08.2019. Бюл. № 24.

6. Гречишников Е. В., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Сысуев С. Ю. и др. Способ моделирования процессов обеспечения живучести распределенных сетей связи разноуровневых систем управления / Патент РФ на изобретение № 2702902 от 14.10.2019. Бюл. № 25.

### References

1. Grechishnikov E. V., Starodubtsev Yu. I., Stukalov I. V. *Modelirovanie sistemy svyazi, integrirovannoj v edinuyu set' elektrosvyazi Rossii, pri vedenii informacionnogo protivoborstva* [Modeling of a communication system integrated into a single telecommunication network of Russia in the conduct of information warfare]. *Materialy mezhdunarodnogo kongressa. Nauchno-prakticheskaya konferenciya «Infokommunikacii v reshenii zadach tysyacheletiya»* [Materials of the International Congress. Scientific and practical conference “Infocommunications in solving the problems of the millennium”]. (St. Petersburg, November 12-13, 2010). St. Petersburg. PIF SOM LLC, 2010. 307 p. Pp. 172-180. (In Russian).

2. Grechishnikov E. V., Komarovich V. F., Belov A. S. and others. *Sposob modelirovaniya setej svyazi* [A method for modeling communication networks]. Patent for invention N° 2379750 dated 20.01.2010. (In Russian).

3. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [Modeling of systems. GPSS World Tools]. St. Petersburg. BHV-Petersburg Publ. 2004. 368 p., Soviets B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem. Praktikum : ucheb. posobie dlya vuzov* [Modeling of systems. Workshop. studies. handbook for universities]. Moscow. Higher School. 2003. 295 p. (In Russian).

4. Grechishnikov E. V., Belov A. S., Trakhinin E. L. et al. *Sposob modelirovaniya processov obosnovaniya trebuемого urovnya zhivuchesti raspredelennykh setej svyazi vyshestoyashchej sistemy upravleniya v usloviyah vskrytiya i vneshnih destruktivnykh vozdeystvij* [A method for modeling the processes of substantiating the required level of survivability of distributed communication networks of a higher-level control system in conditions of opening and external destructive influences]. Patent of the Russian Federation for Invention № 2702503 dated 08.10.2019. Issue № 25. (In Russian).

5. Grechishnikov E. V., Dobryshin M. M., Belov A. S., Anisimov V. G., etc. *Sposob modelirovaniya processov obespecheniya strukturnoj zhivuchesti raspredelennykh setej svyazi mnogourovnevnykh sistem upravleniya v usloviyah destruktivnykh vozdeystvij* [A method for modeling the processes of ensuring the structural survivability of distributed communication networks of multilevel control systems under conditions of destructive influences]. Patent of the Russian Federation for invention № 2698407 dated 08.26.2019. Issue № 24. (In Russian).

6. Grechishnikov E. V., Anisimov V. G., Anisimov E. G., Sysuev S. Yu. et al. *Sposob modelirovaniya processov obespecheniya zhivuchesti raspredelennykh setej svyazi raznourovnevnykh sistem upravleniya* [A method for modeling the processes of ensuring the survivability of distributed communication networks of multi-level control systems]. Patent of the Russian Federation for invention № 2702902 dated 10.14.2019. Issue № 25. (In Russian).

Статья поступила 18 сентября 2024 г.

### Информация об авторах

*Гречишников Евгений Владимирович* – доктор технических наук, профессор, директор по научно-техническому развитию ОАО «НИИ «Рубин»». Область научных интересов: разработка методологии информационного противоборства в технической сфере. Тел.: +7(812)670–89–72, E-mail: pechijhod67@mail.ru. Адрес: г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 5.

*Федяев Юрий Юрьевич* – преподаватель кафедры Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)247–98–42, E-mail: veajdef@mail.ru. Адрес: г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

*Гречишникова Татьяна Анатольевна* – научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: разработка методологии информационного противоборства в технической сфере. Тел.: 8(812)2479842, E-mail: veajdef@mail.ru. Адрес: Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т., 3.

### A model of multiservice communication networks using the resources of the European Economic Area of the Russian Federation as an object of computer intelligence

E. V. Grechishnikov, Yu. Yu. Fedyayev, T. A. Grechishnikova

**Annotation.** *The article considers the method of modeling the intelligence effects of computer intelligence on the elements of multiservice communication networks and multiservice communication networks using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation as a whole. The purpose of the simulation is to obtain the dependences of the probability of opening by computer intelligence of elements and a multiservice communication network as a whole, under conditions of using its resources, on the time of operation of the network (elements of a multiservice communication network). The purpose of the work is to simulate the intelligence effects of computer intelligence on the elements of multiservice communication networks in order to obtain dependencies on*

*the probability of computer intelligence opening elements and a multiservice communication network as a whole, under conditions of using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation, on the time of network operation (elements of a multiservice communication network). **The novelty** of the work: the model of multiservice communication networks considered in the article using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation, as an object of computer intelligence, it allows us to determine the private indicators of the functioning of a multiservice communication network using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation when exposed to computer intelligence by intruders and further using the developed methodology for assessing the security and reliability of elements of multiservice communication networks using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation to solve the task of implementing the required security of multiservice communication networks. **The following results** were obtained: the dependences of the probability of computer intelligence opening the elements and the multiservice communication network as a whole, under conditions of using the resources of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation, on the time of operation of the multiservice communication network and its elements were determined. **The practical significance** lies in the ability to solve the problem of implementing the required security of communication networks.*

**Keywords:** *elements of communication networks, computer intelligence, Unified Telecommunication network of the Russian Federation, unmasking signs, multiservice communication networks, time of quasi-stationary state of an element of a multiservice communication network.*

#### **Information about authors**

*Evgeny Vladimirovich Grechishnikov*– Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Scientific and Technical Development of JSC Scientific Research Institute Rubin. Research interests: development of the methodology of information warfare in the technical field. Tel.: +7(812)670-89-72, E-mail: pechijhod67@mail.ru. Address: St. Petersburg, Kantemirovskaya, 5.

*Yuri Yuryevich Fedyayev*– is a lecturer at the Department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)247-98-42, E-mail: veajdef@mail.ru. Address: St. Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

*Tatyana Anatolyevna Grechishnikova*– is a researcher at the Scientific Research Center Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. Research interests: development of the methodology of information warfare in the technical field. Tel.: +7(812)247-98-42, E-mail: veajdef@mail.ru. Address: St. Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

#### **Библиографическая ссылка на статью:**

Гречишников Е. В., Федяев Ю. Ю., Гречишникова Т. А. Модель мультисервисных сетей связи с использованием ресурсов Единой сети электросвязи Российской Федерации, как объекта компьютерной разведки // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 42-51. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-42-51

#### **Reference for citation:**

Grechishnikov E.V., Fedyayev Yu.Yu., Grechishnikova T.A. Model of Multiservice communication networks using the Resources of the European Economic Area of the Russian Federation as an object of computer intelligence. Means of Communication Equipment. 2024. № 3 (167). Pp. 42-51. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-42-51

УДК 621.391

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-52-66

## Имитационное моделирование помехозащищённых декаметровых каналов, функционирующих в режиме псевдослучайной перестройки радиочастоты

Катанович А. А., Пыков Е. В., Цыванюк В. А., Густов А. А.

**Аннотация:** *Постановка задачи:* задача повышения показателей достоверности, помехоустойчивости и помехозащищённости приёма радиосигналов в помехозащищённых радиоканалах декаметрового диапазона может быть решена на основе совершенствования способов приёма и обработки радиосигнала. Среда распространения радиоволн декаметрового диапазона характеризуется статистически неоднородными физическими параметрами. Затруднения, возникающие при определении параметров сигнала, могут быть решены на основе непараметрических статистических способов оценки. **Цель работы:** получить на основе метода компьютерного имитационного моделирования декаметрового канала связи, функционирующего в режиме псевдослучайной перестройки радиочастоты, результаты сравнительного анализа демодуляторов сигнала многопозиционной частотной телеграфии, в которых реализованы некогерентный корреляционный и непараметрический ранговый способ приёма сигналов. **Используемые методы:** решение задачи основывается на непараметрических ранговых методах оценки, устойчивых к существенно отличающимся значениям сигнальной выборки, а также методах приёма радиосигнала в условиях априорной неопределённости параметров канала связи. **Новизна:** в работе получены результаты компьютерного имитационного моделирования и численных экспериментов, которые подтверждают эффективность применения разработанного непараметрического рангового способа демодуляции сигналов многопозиционной частотной телеграфии для декаметровых радиоканалов связи по показателю средней вероятности ошибки на символ для различных условий распространения радиоволн и воздействующих помех. Приводятся основные **результаты** сравнительного анализа эффективности функционирования некогерентного корреляционного детектора сигналов многопозиционной частотной телеграфии и непараметрического рангового детектора сигналов многопозиционной частотной телеграфии, которые накапливают оценки параметров принимаемого сигнала на длительности сигнала частотно-временной матрицы в условиях обихих и интерференционных замираний, учитывается воздействия импульсных и сосредоточенных помех. **Практическая значимость:** определены значения показателей эффективности и устойчивости функционалов оценки для некогерентного корреляционного и непараметрического рангового демодуляторов. Получены основные закономерности и взаимосвязи значений и свойств функций влияния функционалов оценки применяемых в демодуляторах сигналов при воздействии импульсных и сосредоточенных помех.

**Ключевые слова:** асимптотическая относительная эффективность, импульсные и сосредоточенные помехи, корреляционный интеграл, непараметрический ранговый функционал оценки, функция влияния.

### Введение

Решения многих задач в радиотехнике могут встречать затруднения, когда аналитические способы вычислений становятся на практике не применимы по причине значительной математической сложности. Эффективной мерой по преодолению таких затруднений является применение при исследованиях методов компьютерного имитационного моделирования. Оно обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами исследования: гибкостью, экономичностью, универсальностью. Имитационное моделирование позволяет разрешить проблему сложности аналитических выражений.

Задачу имитационного компьютерного моделирования радиосигналов, помех и случайных процессов можно сформулировать как задачу нахождения алгоритмов, позволяющих получить в среде модельно-ориентированного программирования дискретные реализации моделируемых процессов. Это самостоятельная и довольно сложная задача синтеза дискретных случайных процессов, которые имитируют непрерывные процессы

с заданными статистическими характеристиками. Решение этой задачи реализуется путём разработки эффективных алгоритмов для реализации в программной среде, в которой разрабатывается имитационная модель. Одним из наиболее эффективных методов имитационного моделирования является преобразование случайных величин с равномерной, нормальной или логнормальной функциями распределения и неограниченным спектром в реализации случайных процессов с заданными статистическими характеристиками.

Построенные в модельно-ориентированной среде разработки алгоритмы имитационного моделирования должны точно или с допустимой погрешностью преобразовывать дискретные реализации входных параметров модели в дискретные реализации соответствующих выходных эффектов моделируемых объектов и процессов, учитывая заданные характеристики моделируемых систем и случайных процессов (функции распределения и автокорреляционные функции), которые протекают в этих системах.

Предложенная в [1, 2] компьютерная имитационная модель декаметрового помехозащищённого радиоканала, функционирующего в режиме быстрой псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), отличается от известных тем, что учитывает скачкообразное изменение параметров канала связи, общие и частотно-селективные (интерференционные) замирания, характерные для ионосферного распространения радиоволн декаметрового диапазона, воздействие импульсных и сосредоточенных помех. Наиболее значительным отличием разработанной модели от существующих является возможность автоматического определения показателей эффективности и устойчивости функционалов оценки, применяемых в демодуляторах для вычисления оценок параметров распределения вероятности характеристик сигнала и помехи.

Показатели эффективности определяются автоматически в вычислительном модуле на основе результатов имитационного моделирования.

Имитатор радиоканала является одним из основных элементов модели и определяет стохастические свойства ионосферного канала. Учитывая положения Рекомендации международного союза электросвязи ITU-R F.1487\* «Исследование КВ модемов с шириной полосы частот до 12 кГц при использовании имитаторов ионосферных каналов», диапазон частот, в котором выполняется ППРЧ  $\Delta F_{\Pi}$ , сегментирован на  $J$  поддиапазонов с шириной полосы частот  $\Delta f_{sc(j)}$  [3, 4]:

$$\Delta F_{\Pi} = \sum_{j=1}^J \Delta f_{sc(j)} .$$

Сделано допущение о равномерности параметров канала связи в полосе  $\Delta f_{sc(j)}$ . Вероятность попадания рабочей частоты в поддиапазон  $\Delta f_{sc(j)}$  распределена равномерно в пределах полосы перестройки частоты  $\Delta F_{\Pi}$ . Каждому поддиапазону  $\Delta f_{sc(j)}$  ставится в соответствие комплексный коэффициент передачи канала связи  $\mu_j(t)$ , свойства которого определяются параметрами модели Ваттерсона [3, 4].

Модель предусматривает применение для приёма сигналов многопозиционной частотной телеграфии (МПЧТ) двух видов демодулятора:

- некогерентного демодулятора сигналов МПЧТ;
- непараметрического рангового демодулятора сигналов МПЧТ (рис. 1) [1].

Одновременное применение двух видов демодулятора позволяет по результатам моделирования произвести их сравнительный анализ по нескольким показателям эффективности и устойчивости функционалов оценки и по показателю достоверности – средней вероятности ошибки на символ для различных условий распространения радиоволн, определяемых входными параметрами модели.

В современных SDR системах радиосвязи декаметрового диапазона широко применяются некогерентные схемы приёма сигналов МПЧТ, которые являются оптимальными схемами приёма для канала связи с медленными релеевскими замираниями, аддитивной гауссовой

помехой и случайной начальной фазой. В демодуляторе радиоприёмного устройства вычисляется значение функционала оценки, на основе которого принимается решение о значении информационного символа. Основными требованиями, которые предъявляются к функционалам оценки, являются эффективность и устойчивость. Степень достижения указанных требований можно оценить, сравнивая предлагаемый функционал оценки с применяемым, например, некогерентным корреляционным функционалом оценки.

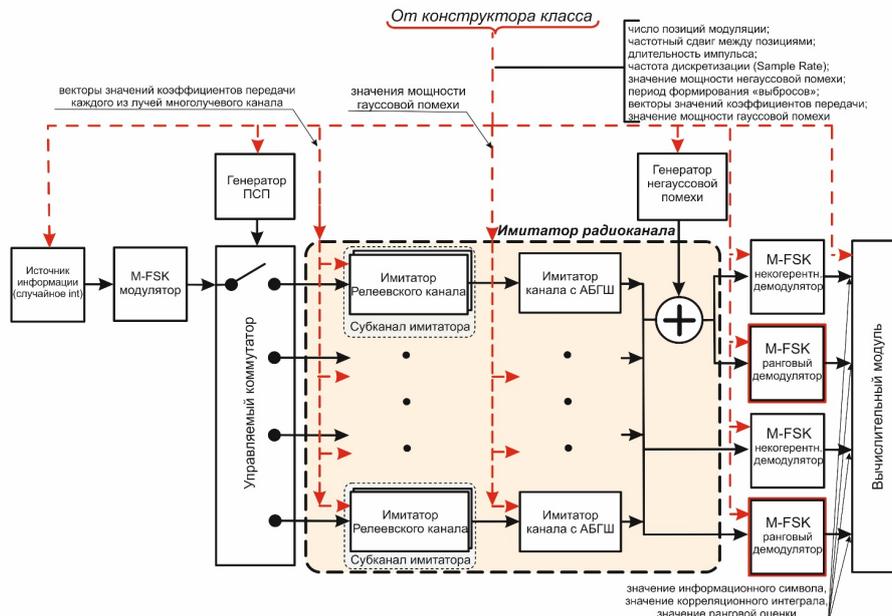


Рис. 1. Компьютерная модель помехозащищённого декаметрового радиоканала с перестройкой рабочих частот по псевдослучайному закону, функционирующего в режиме ППРЧ в условиях общих и интерференционных замираний, импульсных и сосредоточенных помех

Разработанная компьютерная модель позволяет оценить устойчивость и эффективность предложенного функционала непараметрической ранговой оценки [2, 5] по отношению к функционалу оценки некогерентного корреляционного оптимального демодулятора по двум показателям: асимптотической относительной эффективности и функции влияния.

Указанные показатели введены в теорию оценки в работах Д. Тьюки, Г. Ван Триса, П. Хьюбера, Ф. Хампеля [6, 7]. Применение выбранных показателей эффективности в теории электрической связи рассмотрено в работах Б. Левина, П. Бакута, В. Богдановича [8].

Асимптотическая относительная эффективность показывает, как соотносятся рассеяния оценок, вычисленные с помощью двух сравниваемых функционалов оценки за одинаковое количество экспериментов (при одинаковом объёме выборки). Определить асимптотическую эффективность можно выражением в предельной форме [6, 7]:

$$e_{r,c} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\frac{D(T_{rank})}{(E(T_{rank}))^2}}{\frac{D(T_{corr})}{(E(T_{corr}))^2}}, \tag{1}$$

где  $D(T_{rank})$  – дисперсия ранговой оценки;  $T_{rank}$  – функционал ранговой оценки;  $E(T_{rank})$  – математическое ожидание ранговой оценки;  $D(T_{corr})$  – дисперсия оценки корреляционной функции;  $T_{corr}$  – функционал оценки корреляционной функции;  $E(T_{corr})$  – математическое ожидание оценки корреляционной функции. При этом фундаментальным инструментом теории устойчивых оценок, введённым Ф. Хампелем, является функция влияния [6, 7].

$$IC(x, F, T) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{T((1-\varepsilon) \cdot F + \varepsilon \cdot \delta_x) - T(F)}{\varepsilon}, \tag{2}$$

где  $\varepsilon = \frac{n_d}{n}$  – относительная частота появления «выбросов»;  $T$  – функционал оценки;  $x$  – случайная величина;  $\delta_x$  – значения выборки «загрязняющего» распределения, отличающегося от основного распределения  $F$ ;  $n_d$  – число появившихся выбросов из выборки размера  $n = 1024$ ;  $n$  – общий размер выборки.

Анализ предельного выражения (2) показал, что оценивается отношение приращение значения функционала оценки  $T(x)$ , к относительной частоте появления существенно отличающихся значений  $\varepsilon$ , при стремлении  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Д. Тьюки была предложена модель зашумления основной выборки [6, 7, 9]:

$$F(x) = (1 - \varepsilon) \cdot \Phi\left(\frac{x - m_x}{\sigma_x}\right) + \varepsilon \cdot \delta_x, \quad (3)$$

где  $\Phi$  – функция распределения нормальной случайной величины;  $m_x$  – математическое ожидание нормальной случайной величины;  $\sigma_x$  – среднее квадратичное отклонение случайной величины.

Выборка дискретной случайной величины, представляет собой аддитивную смесь аналитического сигнала МПЧТ, гауссовой помехи и существенно отличающихся значений («выбросов», «хвостов распределений»), появляющимися с относительной частотой  $\varepsilon$ .

Разработанная компьютерная модель (рис. 1) учитывает предложенную Д. Тьюки модель зашумления основной выборки случайной величины (3), соответствующей нормальному закону распределения, «выбросами» и позволяет определить по результатам моделирования рассмотренные показатели эффективности функционалов оценки: относительную асимптотическую эффективность  $e_{r,c}$  одного функционала оценки относительно другого и функции влияния  $IC(x, F, T)$  для каждого из функционалов оценки.

### Результаты имитационного моделирования и вычисления показателей устойчивости и эффективности корреляционного и рангового функционалов оценки

Определение показателей эффективности и устойчивости функционалов оценки, асимптотической относительной эффективности  $e_{r,c}$  и функций влияния функционалов корреляционной  $IC(x, F, T_{corr})$  и ранговой оценок  $IC(x, F, T_{rank})$  производится в вычислительном модуле на основе использования промежуточных и выходных параметров имитационной компьютерной модели (рис. 2).

При выполнении моделирования процесса передачи информации на выходе некогерентных и ранговых демодуляторов формируются по две выборки корреляционных оценок  $T_{corr}(x_{i(\varepsilon)})$ ,  $T_{corr}(x_i)$  (значений комплексной огибающей) и по две выборки ранговых оценок  $T_{rank}(x_{i(\varepsilon)})$ ,  $T_{rank}(x_i)$ . По одной из каждого вида выборки сформированы с учётом аддитивного воздействия существенно отличающихся значений «выбросов»  $T_{corr}(x_{i(\varepsilon)})$ ,  $T_{rank}(x_{i(\varepsilon)})$ . На каждом цикле моделирования уменьшается относительная частота появления «выбросов»  $\varepsilon = \frac{n_d}{n}$  в диапазоне значений от  $\frac{1024}{1024}$  до  $\frac{1}{1024}$ .

Вычисленные оценки непараметрического рангового и некогерентного корреляционного функционалов записываются в массивы оценок и структурируются в порядке убывания относительной частоты появления существенно отличающихся значений в сигнальной выборке.

Асимптотическая относительная эффективность определяется на основе массивов значений оценок комплексной огибающей  $T_{corr}(x_{i(\varepsilon)})$  и ранговых оценок  $T_{rank}(x_{i(\varepsilon)})$ , полученных по результатам моделирования. На каждой итерации цикла в вычислительном модуле рассчитываются массивы значений математического ожидания (среднего

выборочного) и выборочной дисперсии корреляционной и непараметрической ранговой оценок при увеличивающейся на каждой итерации цикла относительной частоте появления сильно отличающихся значений выборки  $\varepsilon$ . На основе вычисленных значений массивов математического ожидания (среднего выборочного) и выборочной дисперсии в соответствии с выражением (1) определяется асимптотическая относительная эффективность непараметрического рангового функционала оценки относительно некогерентного корреляционного функционала оценки. Результаты вычислений представлены на (рис. 3).

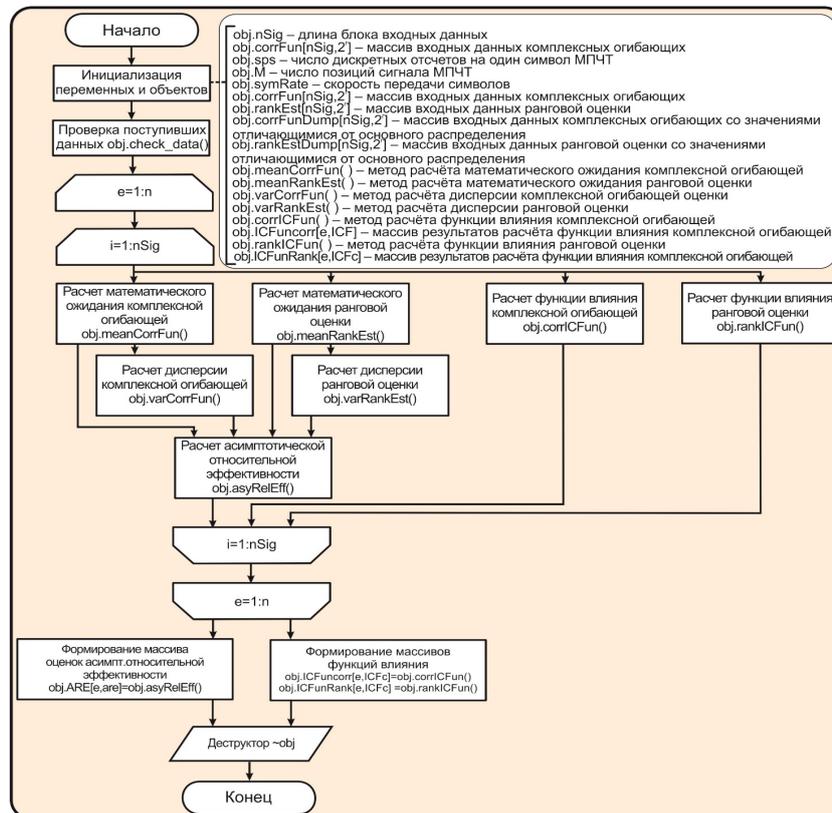


Рис. 2. Программный алгоритм функционирования вычислительного модуля имитационной модели

Асимптотическая относительная эффективность определена на замкнутом интервале (отрезке) значений относительной частоты появления «выбросов»  $\varepsilon \in [0, 1]$ . Анализируя результаты моделирования на рис. 3, можно сделать вывод, что ранговый функционал оценки  $T_{rank}$  эффективней функционала оценки корреляционной функции  $T_{corr}$ , по показателю асимптотической относительной эффективности  $e_{r,c} < 1$ , когда основная выборка «загрязнена» значениями, сильно отличающимися от значений соответствующих основному закону распределения, которые составляют до 33 % объёма выборки. Необходимо отметить, что если треть элементов выборки не относится к основному закону распределения  $\Phi(x)$ , то сделать вывод о принадлежности элементов выборки к распределению  $\Phi(x)$  становится невозможным и некорректным независимо от применяемого функционала оценки.

На основе полученных по результатам моделирования выборок значений ранговых и корреляционных оценок, вычисленных с учётом «выбросов»  $T_{rank}(x_{i(\varepsilon)})$ ,  $T_{corr}(x_{i(\varepsilon)})$  и только с учётом аддитивной смеси сигнала и гауссовой помехи  $T_{rank}(x_i)$ ,  $T_{corr}(x_i)$ , в вычислительном модуле имитационной модели вычисляются значения функций влияния непараметрического рангового и некогерентного корреляционного функционалов оценки (рис. 4).

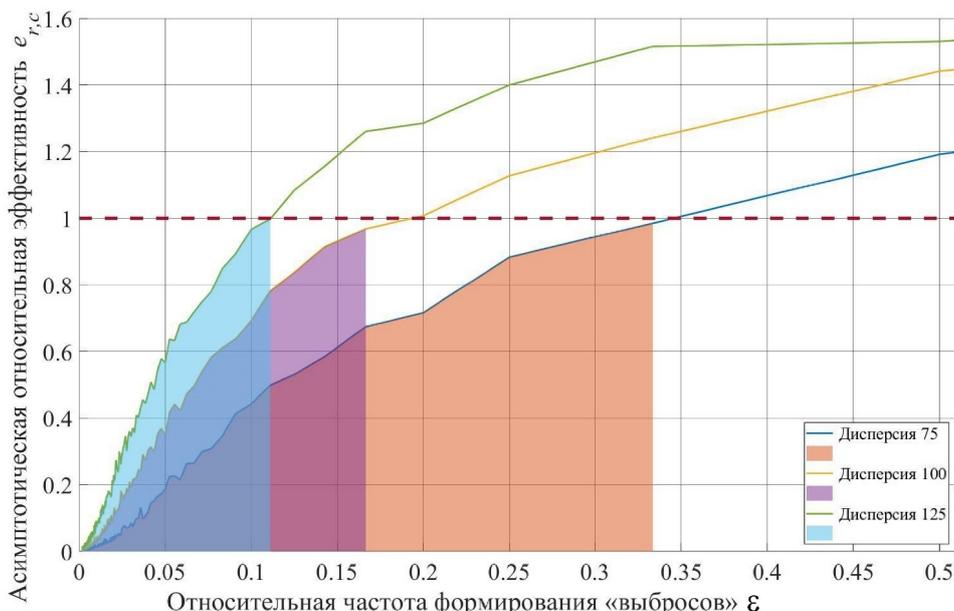


Рис. 3. Асимптотическая относительная эффективность рангового функционала оценки относительно функционала оценки корреляционного интеграла

На рис. 4 представлены результаты вычисления значений функций влияния корреляционного  $IC(x, F, T_{corr})$  и рангового  $IC(x, F, T_{rank})$  функционалов оценки.

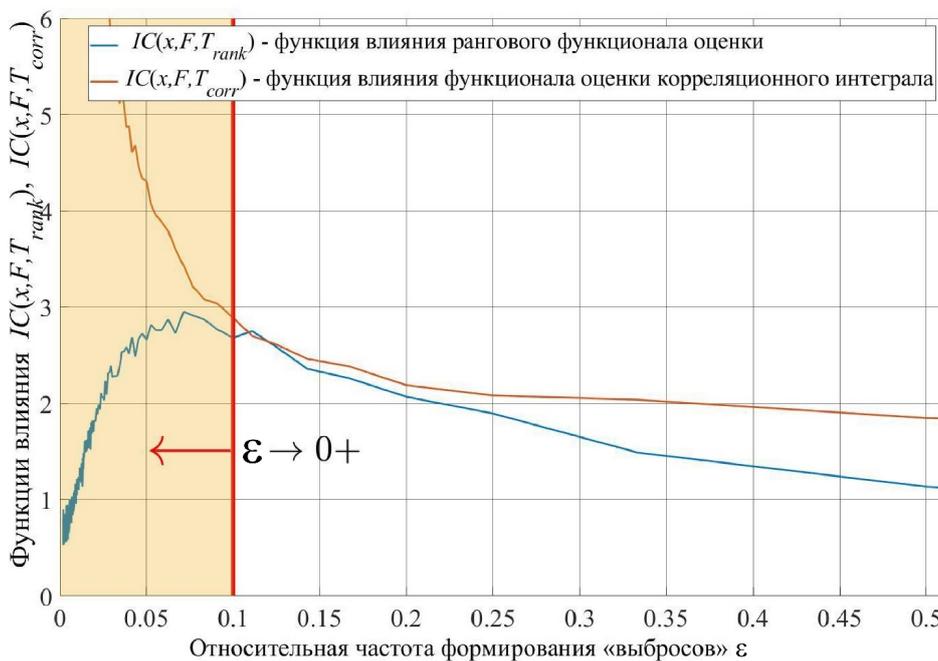


Рис. 4. Графики функций влияния корреляционного интеграла  $IC(x, F, T_{corr})$  и рангового функционалов оценки  $IC(x, F, T_{rank})$

Учитывая соотношения, которые определены выражением (2) для функции влияния  $IC(x, F, T)$  при итеративном уменьшении относительной частоты появления существенно отличающихся значений  $\varepsilon \rightarrow 0+$  (при стремлении к 0 справа), функция влияния корреляционного функционала оценки  $IC(x, F, T_{corr})$  асимптотически возрастает.

Анализ полученных значений функций влияния  $IC(x, F, T_{corr})$  и  $IC(x, F, T_{rank})$  показывает, что оценка, определённая посредством вычисления корреляционного интеграла,

чувствительна к значениям выборки, которые существенно отличаются от значений выборки соответствующих основному закону распределения.

Можно сделать выводы: что уже одно значительно отличающееся значение сигнальной выборки оказывает существенное воздействие на результат вычисления корреляционного функционала оценки – взаимно корреляционного интеграла; что корреляционная оценка непосредственно зависит от вычисленного значения взаимно корреляционного интеграла.

Функция влияния рангового функционала оценки  $IC(x, F, T_{rank})$  убывает (рис. 4) при относительной частоте, стремящейся к 0 справа  $\varepsilon \rightarrow 0+$ . Необходимо обратить внимание на то, что  $IC(x, F, T_{rank})$  является ограниченной на всем интервале  $\varepsilon \in [0, 1] \mid \varepsilon \in \mathbb{Q}$ .

Анализируя результаты проведённого моделирования, можно выделить свойство функции влияния функционала оценки, которое определяет его устойчивость [10]. Функция влияния применяемого функционала оценки должна быть ограничена в области определения на всём интервале относительных частот  $\varepsilon \in [0, 1] \mid \varepsilon \in \mathbb{Q}$ . Устойчивость непараметрического рангового функционала оценки характеризуется поведением функции влияния  $IC(x, F, T_{rank})$  в области малых значений относительной частоты появления «выбросов».

Таким образом, проявляются редуцирующие свойства рангового функционала оценки по отношению к значительно отличающимся значениям в выборке. Анализируя результаты вычисления асимптотической относительной эффективности и функции влияния рангового функционала оценки, можно сделать вывод, что предложенный функционал непараметрической ранговой оценки  $T_{rank}$  устойчив к появлению в сигнальной выборке относительно небольшого числа существенно отличающихся значений.

### Оценка средней вероятности ошибки на символ для декаметрового радиоканала с ППРЧ по результатам имитационного моделирования

Для радиолиний дальней декаметровой радиосвязи, применяемых для доведения информации в направлении «берег-корабль», характерно использование способов временного и частотно разнесенного приёма. Композиция этих способов совместно с быстрой ППРЧ (когда длительность передачи одного символа больше времени излучения на одной рабочей частоте  $T_{sym} > T_{fh}$ ) образует частотно-временную матрицу, в которой рабочая частота выбирается из диапазона ППРЧ –  $\Delta F_{II}$  по псевдослучайному закону [11]. Время передачи одного информационного символа для радиолиний, функционирующих в режиме быстрой ППРЧ, определяется выражением:

$$T_{sym} = K_{accum} \cdot T_{fh},$$

где  $K_{accum}$  – размер частотно-временной матрицы;  $T_{fh}$  – длительность излучения сигнала (элементарной посылки) МПЧТ на одной частоте.

Разработанная модель [1] позволяет получить оценку средней вероятности ошибки на символ МПЧТ для декаметрового канала связи с ППРЧ в условиях общих и интерференционных замираний, воздействия гауссовой шумовой помехи в точке приёма, а также воздействия импульсных и сосредоточенных помех. В вычислительном модуле предложенной имитационной модели средняя вероятность ошибки на символ  $P_{ser}$  вычисляется для нескольких демодуляторов сигнала МПЧТ, в которых реализованы различные способы приёма:

- с накоплением суммы корреляционных оценок, вычисленных на временном интервале излучения на одной рабочей частоте  $T_{fh}$  для каждой частотной позиции сигнала МПЧТ;
- с накоплением ранговых оценок на временном интервале  $T_{sym}$ , рассчитанных на интервале  $T_{fh}$  для каждой частотной позиции сигнала МПЧТ.

Решение о значении информационного символа принимается по критерию максимума для каждого вида оценок независимо.

Схема фрагмента частотно-временной матрицы сигнала МПЧТ с размером частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum} = 5$  представлена на рис. 5. В каждом сегменте указана ранговая оценка  $\max(R_{est}(S_i(n\Delta t), a))$  и приведена схема спектра.

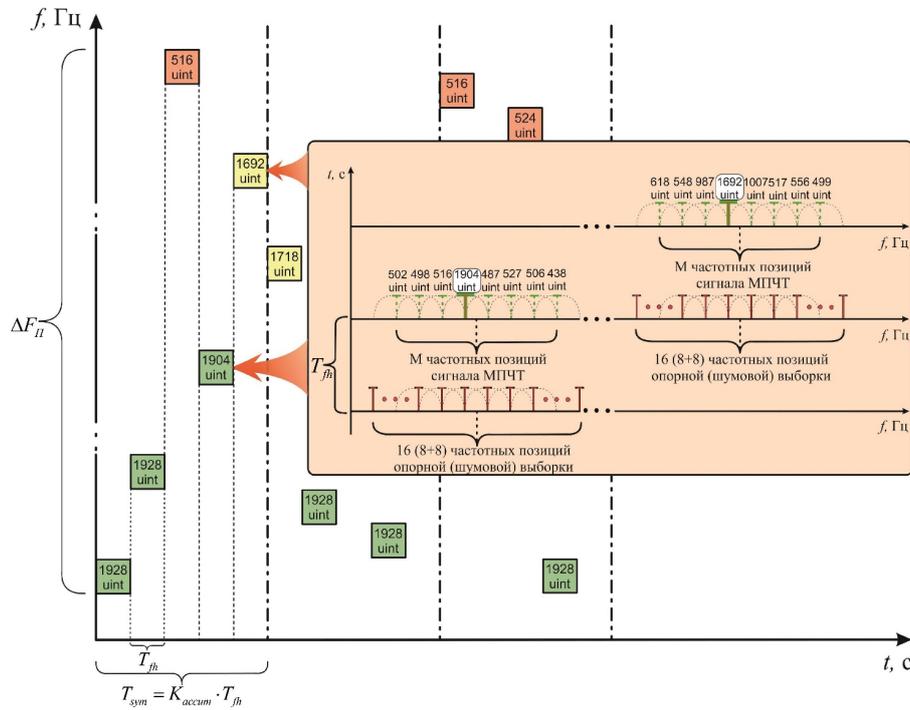


Рис. 5. Схема фрагмента частотно-временной матрицы сигнала МПЧТ с размером частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum} = 5$

Подробнее рассмотрим алгоритм вычисления ранговой оценки с учётом накопления.  $R_{est}(S_i(n\Delta t), a)$  – ранговая оценка для  $i$ -ой частотной позиции на длительности временного интервала  $T_{fm}$ , для элемента с номером  $a \in [1, \dots, K_{accum}]$  элементов можно определить в соответствии с выражением [1, 2]:

$$T_{rank(accum)} : \tilde{y}_i \rightarrow R_{est}(S_i(n\Delta t), a),$$

тогда значение ранговой оценки на длительности элементарной посылки  $T_{fm}$  можно определить выражением:

$$R_{est}(S_i(n\Delta t), a) = \sum_{rank=1} \{rank(d_l(S_i(n\Delta t))) \in [1, 2, \dots, M \times N_k] | d_l > 0, l \in [1, \dots, M \times N_k]\} \quad (4)$$

при  $a \in [1, 2, \dots, K_{accum}], i \in [1, \dots, M]$ , где  $M$  – число позиций МПЧТ (M-FSK);  $d_l$  – порядковый номер элемента сигнальной выборки, ранжированного в вариационном ряду в порядке возрастания модулей значений;  $N_k$  – число элементов опорной выборки (для схемы на рис. 5  $N_k = 16$ ).

Ранговая оценка вычисляется отдельно для каждой частотной позиции сигнала МПЧТ из  $M$  возможных позиций на интервале  $T_{fm}$  (рис. 5). Далее, для каждой информационной позиции вычисляется суммарная ранговая оценка:

$$R_{est(accum)}(S_i(n\Delta t), T_{sym}) = \sum_{a=1}^{K_{accum}} R_{est}(S_i(n\Delta t), a).$$

Решение о значении информационного символа принимается по критерию максимума ранговой оценки, вычисленной для каждой информационной частотной позиции  $S_i(n\Delta t)$  сигнала МПЧТ на интервале времени  $T_{sym}$  [5]:

$$\max(R_{est(accum)}(S_i(n\Delta t), T_{sym})) \rightarrow C_i. \quad (5)$$

Радиоканалы декаметрового диапазона всегда подвержены воздействию импульсных и сосредоточенных помех. Всякое излучение в декаметровом диапазоне создаёт заметную напряжённость поля на значительных расстояниях от радиопередающего устройства. В условиях воздействия импульсных и сосредоточенных помех схемы некогерентного корреляционного приёма перестают быть оптимальными. Проведено исследование моделей каналов связи, функционирующих в условиях общих и частотно-селективных замираний, а также воздействия импульсных и сосредоточенных помех. Рассмотрены модели радиоканала, отличающиеся воздействующими на приём сигналов факторами. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования для некогерентного корреляционного и непараметрического рангового демодуляторов сигналов МПЧТ по показателю средней вероятности ошибки на символ с учётом применения помехоустойчивых кодов, исправляющих ошибки. В модели учтены корреляционные свойства комплексных коэффициентов передачи субканалов имитатора радиоканала.

Для исправления ошибок, возникающих в каналах связи декаметрового диапазона, используют помехоустойчивые коды Рида – Соломона. Важным свойством кодов Рида – Соломона является исправляющая способность, которая определяется границей Синглтона, как для кодов с максимально достижимым кодовым расстоянием:

$$t_c = \frac{d-1}{2} = \frac{r}{2},$$

где  $d$  – кодовое расстояние;  $r$  – число проверочных символов кодовой комбинации.

При этом исправляющая способность зависит только от числа проверочных символов в кодовой комбинации  $r$ , что позволяет исправлять группы ошибок, которые характерны для каналов связи с памятью, к которым можно отнести декаметровые каналы связи с медленными релейскими замираниями.

Сравнительный анализ результатов моделирования процесса передачи информации выполняется для моделей декаметрового помехозащищённого радиоканала, функционирующего в режиме с ППРЧ и использовании канального кода Рида – Соломона (255, 205) над расширением поля  $GF(2^8)$ .

Рассмотрены две модели декаметрового радиоканала. Первая модель не учитывает воздействие импульсных и сосредоточенных помех, радиоканал функционирует в режиме ППРЧ, в полосе перестройки рабочей частоты происходят медленные релейские замирания, среднее отношение сигнал/шум для всех субканалов помехой  $h_0^2 = 8$  дБВт. Параметры имитатора канала установлены таким образом, что выполняется условие  $T_{fh} \ll \tau_{corr}$ . Вторая модель, по сравнению с первой, дополнительно учитывает воздействие импульсных и сосредоточенных помех. Сравнительный анализ показателей эффективности демодуляторов сигнала МПЧТ, выполняющих накопление оценок на длительности частотно-временной матрицы, выполнен по результатам моделирования.

В канале связи, функционирующем в режиме ППРЧ, при изменении рабочей частоты скачкообразно меняется комплексный коэффициент передачи канала связи  $\mu_j(t)$ , который в конкретный момент времени определяется коэффициентом передачи одного из  $J$  поддиапазонов канала связи (субканалов имитатора), который выбирается в соответствии со значением псевдослучайной последовательности. Коэффициенты передачи частотных поддиапазонов  $\mu_j(t)$  (субканалов имитатора) независимые комплексные случайные величины  $\{\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_j(t), \dots, \mu_J(t)\}$  с ограниченным спектром [1, 3]. Следовательно, ошибки, возникающие при приёме сигнала, не группируются, и появление ошибок можно считать событием, не зависящим от вероятности ошибки при приёме предыдущей элементарной посылки  $T_{fh}$ . Таким образом, при функционировании канала связи в режиме ППРЧ происходит декорреляция ошибок, возникающих в канале связи.

Результаты моделирования показали, что значение оценки взаимно корреляционного интеграла при увеличении длительности интервала интегрирования становятся не

устойчивыми по причине флуктуации фазы сигнала, которая возникает при доплеровском рассеивании. Поэтому необходимо, чтобы интегрирование выполнялось на временном интервале длительности элементарной посылки сигнала МПЧТ, которая много меньше времени корреляции медленных замираний  $T_{fh} \ll \tau_{corr}$ .

Для демодулятора, выполняющего оценку на основе суммы значений корреляционных интегралов, вычисленных на интервалах  $T_{fh} \ll \tau_{corr}$ , с увеличением размера частотно-временной матрицы  $K_{accum}$  среднюю вероятность ошибки на символ  $P_{ser}$  можно сделать сколь угодно малой (рис. 6). Непараметрический ранговый демодулятор незначительно проигрывает некогерентному корреляционному демодулятору, вычисляющему оценку как сумму корреляционных интегралов. Это объясняется тем, что редукция данных при ранжировании, которое выполняется при вычислении ранговой статистики, приводит к потере части информации о значении оценки. Полученные в ходе моделирования данные подтверждают соответствие принятым в научном сообществе теоретическим результатам о том, что некогерентный корреляционный демодулятор является оптимальной схемой приёма в канале с медленными релеевскими замираниями, аддитивной гауссовой помехой и случайной фазой.



Рис. 6. Зависимость средней вероятности ошибки на символ для некогерентного и непараметрического рангового демодуляторов сигналов МПЧТ в зависимости от размера частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum}$  в канале с интерференционными замираниями и аддитивной гауссовой помехой  $h_0^2 = 8$  дБВт

Аналитические вычисления средней вероятности ошибки на символ выполнены для сигналов МПЧТ с ППРЧ, ортогональных в усиленном смысле (при размере частотно-временной матрицы  $K_{accum} = 1$ ), и использовании схемы некогерентного корреляционного приёма. Результаты вычислений средней вероятности ошибки на символ проведенных аналитическим путём и с помощью имитационного моделирования практически совпадают (рис. 6).

Выражение для средней вероятности ошибки на символ для канала с медленными релеевскими замираниями можно записать в виде [12]:

$$P_{ser(j)} = \sum_{i=1}^{M-1} \frac{(-1)^{i+1} \cdot C_{M-1}^i}{1+i+i \cdot h_0^2}, \quad (6)$$

где  $M$  – число позиций МПЧТ (M-FSK);  $C_{M-1}^i$  – биномиальный коэффициент, количество сочетаний из  $M - 1$  по  $i$  позициям;  $h_0^2 = \frac{E_s}{N_0}$  – среднее значение отношения сигнал/шум (на символ).

Формула (6) определяет среднюю вероятность ошибки на символ и справедлива, если только коэффициент передачи субканала на длительности временного интервала  $T_{sym}$  можно считать постоянным, для чего необходимо чтобы выполнялось условие  $T_{sym} \ll \tau_{corr}$ .

Выражение для вычисления средней вероятности ошибки на символ для канала связи, функционирующего в режиме с ППРЧ, имеет вид:

$$P_{ser_{fhs}} = \sum_{j=1}^J P_{ser(j)} \cdot \frac{\Delta f_{sc(j)}}{\Delta F_{\Pi}}. \quad (7)$$

Результаты моделирования показали, что в канале связи с ППРЧ при использовании кода Рида – Соломона (255, 205) и применении сигнала с частотно-временной матрицей с размером  $K_{accum} = 3$ , можно исправить все ошибки, возникающие при приёме сигнала (рис. 6).

Ранговый демодулятор незначительно (около 0,9 %) проигрывает схеме некогерентного корреляционного демодулятора оптимального для рассматриваемой модели канала связи.

Рассмотрим результаты моделирования для второй модели канала связи, которая дополнительно учитывает воздействие импульсных и сосредоточенных помех в точке приёма. Указанная модель канала по воздействующим на приём сигнала факторам наиболее близка к помехозащищённым каналам связи декаметрового диапазона Военно-Морского Флота, представляющим практический научный интерес.

Воздействие импульсных и сосредоточенных помех является причиной появления значительно отличающихся значений статистической выборки смеси сигнала и помехи, что существенно влияет на результат вычисления некогерентного корреляционного функционала оценки (взаимно корреляционного интеграла). Вычисленные значения взаимно корреляционного интеграла на длительности элементарной посылки  $T_{fh}$ , как отдельные слагаемые итоговой оценки сигнала частотно-временной матрицы, значительно влияют на результат её вычисления. Зависимость средней вероятности ошибки на символ для некогерентного и непараметрического рангового демодуляторов сигналов МПЧТ от размера частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum}$  в канале с интерференционными замираниями, аддитивной гауссовой помехой  $h_0^2 = 8$  дБВт и импульсной помехой приведена на рис. 7.

Ранговый функционал оценки  $T_{rank}$  обеспечивает устойчивую оценку выборки аддитивной смеси сигнала и гауссовой помехи, в которой присутствуют существенно отличающиеся значения, причиной появления которых является воздействие импульсных и сосредоточенных помех. Значение ранговой оценки сигнала частотно-временной матрицы устойчиво к искажениям отдельных ранговых оценок элементарных посылок сигналов МПЧТ частотно-временной матрицы. Увеличение размера частотно-временной матрицы позволяет минимизировать значение средней вероятности ошибки на символ для двух видов демодулятора.

В условиях воздействия импульсных помех ранговый демодулятор обеспечивает выигрыш по сравнению с некогерентным демодулятором. При выполнении демодуляции с использованием непараметрического рангового демодулятора каналный декодер кода Рида – Соломона исправляет все ошибки, возникающие в канале при размере частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum} = 5$ , а при демодуляции с использованием некогерентного корреляционного демодулятора – при размере частотно-временной матрицы  $K_{accum} = 9$  (рис. 7). Таким образом, пропускная способность канала связи, в котором демодуляция сигнала выполняется с помощью непараметрического рангового демодулятора, может быть увеличена в 1,8 по сравнению с использованием некогерентного корреляционного демодулятора.



Рис. 7. Зависимость средней вероятности ошибки на символ для некогерентного и непараметрического рангового демодуляторов сигналов МПЧТ от размера частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum}$  в канале с интерференционными замираниями, аддитивной гауссовой помехой  $h_0^2 = 8$  дБВт и импульсной помехой

На рис. 7 приведены результаты вычисления средней вероятности ошибки на символ при приёме сигналов МПЧТ частотно-временной матрицы с размером  $K_{accum} = 5$ , полученные по результатам моделирования:

- для некогерентного демодулятора  $P_{ser} = 0,074$ ;
- для рангового демодулятора  $P_{ser} = 0,016$ .

Анализ результатов моделирования при размере частотно-временной матрицы сигнала  $K_{accum} = 5$  показал, что импульсные и сосредоточенные помехи значительно влияют на достоверность приёма сигналов, так при воздействии и без воздействия импульсной помехи средняя вероятность ошибки на символ для схемы некогерентного корреляционного демодулятора составляет  $P_{ser imp} = 0,074$  и  $P_{ser} = 0,0004$  соответственно – (отношение 185 раз). Для рангового демодулятора средняя вероятность ошибки на символ составляет  $P_{ser imp} = 0,016$  и  $P_{ser} = 0,0014$  соответственно – (отношение 11 раз).

### Выводы

Предложенная компьютерная модель позволяет получить результаты, не противоречащие теории электрической связи и теории оценок. Применяемые показатели оценки эффективности чувствительны к изменению входных параметров модели.

Предложенный непараметрический ранговый способ демодуляции сигналов МПЧТ реализует математический аппарат, обладающий статистической устойчивостью. Способ учитывает особенности приёма сигналов в условиях общих и интерференционных замираний, априорной неопределенности параметров сигнала в точке приёма. В проведённом исследовании показана устойчивость непараметрического рангового функционала оценки к воздействию импульсных и сосредоточенных помех.

Сравнительный анализ непараметрического рангового и корреляционного функционалов оценки по показателям асимптотической относительной эффективности  $e_{r,c}$ , а также значениям и свойствам функций влияния  $IC(x, F, T)$  и показателю средней вероятности ошибки на символ  $P_{ser corr} > P_{ser rank}$  в декаметровых каналах связи с общими и интерференционными замираниями в условиях воздействия импульсных и сосредоточенных

помех показывает, что ранговый функционал оценки эффективней корреляционного функционала оценки. Анализ результатов моделирования процесса передачи информации в декаметровом канале связи функционирующего в режиме с ППРЧ с учётом воздействия сосредоточенных и импульсных помех, непараметрический ранговый демодулятор выигрывает до 8 % по показателю средней вероятности ошибки на символ у схемы некогерентного корреляционного демодулятора.

### Литература

1. Пыков Е. В., Строганова Е. П., Дворников С. В. Модель помехозащищённого радиоканала декаметрового диапазона с системой автоматической оценки эффективности функционалов оценки детекторов сигнала МПЧТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 7. С. 21-36.
2. Катанович А. А., Пыков Е. В. и др. Способ оценки отношения сигнал/шум в устройствах беспроводной связи // Патент на изобретение RU 2809969 С1, опубл. 19.12.2023, бюл. № 35.
3. Recommendation ITU-R 520-2, P. 1–4.
4. Recommendation ITU-R F.1487\*, P. 1–11.
5. Программа детектирования сигналов многопозиционной частотной телеграфии (МПЧТ) (M-FSK) и расчёта непараметрической ранговой статистики качества принимаемого сигнала, устойчивой к нестационарности параметров сигнала на временном интервале оценки / Пыков Е.В. и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2024661272 от 06.03.2024
6. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
7. Хампель Ф., Рончетти Э. и др. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
8. Акимов П. С., Бакут П. А., Богданович В. А. и др. Теория обнаружения сигналов. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
9. Tukey J. W. (1960) A Survey of Sampling from Contaminated Distributions. In: Oklin, I., Ed., Contributions to Probability and Statistics, Stanford University Press, Redwood City, CA.
10. Устойчивые статистические методы оценки данных / Под ред. Н. Г. Волкова – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
11. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищённость систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Своё издательство, 2013. – 166 с.
12. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1970. – 496 с.

### References

1. Pykov E. V., Stroganova E. P., Dvornikov S. V. Model' pomexozashchishchyonnogo radiokanala dekametrovogo diapazona s sistemoy avtomaticheskoy ocenki effektivnosti funkcionalov ocenki detektorov signala MPCHT [A model of an interference-proof decameter-range radio channel with a system for automatic evaluation of the efficiency of the functional evaluation of the MPCT signal detectors]. T-Comm: Telekommunikacii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]. 2024. T. 18. No. 7. Pp. 21-36. (In Russian).
2. Katanovich A. A., Pykov E. V. et al. Sposob ocenki otnosheniya signal/shum v ustrojstvah besprovodnoj svyazi [A method for evaluating the signal-to-noise ratio in wireless communication devices]. Patent for invention RU 2809969 C1, publ. 12.19.2023, issue No. 35. (In Russian).
3. Recommendation ITU-R 520-2, P. 1–4.
4. Recommendation ITU-R F.1487\*, P. 1–11.
5. Pykov E.V. et al. Programma detektirovaniya signalov mnogopozicionnoj chastotnoj telegrafii (MPCHT) (M-FSK) i raschyota neparametricheskoy rangovoy statistiki kachestva prinimaemogo signala, ustojchivoj k ne stacionarnosti parametrov signala na vremennom intervale ocenki [A program for detecting signals of multi-position frequency telegraphy (M-FSK) and calculating nonparametric rank statistics of the quality of the received signal, resistant to non-stationarity of signal parameters in the evaluation time interval]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of the computer program] No. RU 2024661272 dated 03.06.2024. (In Russian).
6. H'yuber Dzh. P. Robastnost' v statistike [Robustness in statistics]. Moscow. Mir Publ. 1984. 304 p. (In Russian).
7. Hampel F., Ronchetti E., et al. Robastnost' v statistike. Podhod na osnove funkcij vliyaniya [Robustness in statistics. An approach based on influence functions]. Moscow. Mir Publ. 1989. 512 p. (In Russian).

8. Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. et al. *Teoriya obnaruzheniya signalov* [The theory of signal detection]. Moscow. Radio i svyaz' Publ. 1984. 440 p. (In Russian).
9. Tukey, J.W. (1960) A Survey of Sampling from Contaminated Distributions. In: Oklin, I., Ed., *Contributions to Probability and Statistics*, Stanford University Press, Redwood City, CA.
10. *Stable statistical methods of data evaluation* [Ustojchivye statisticheskie metody ocenki dannyh]. Edited by N.G. Volkov. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1984. 232 p. (In Russian).
11. Makarenko S. I, Ivanov M. S, Popov S. A. *Noise immunity of communication systems with pseudorandom adjustment of the operating frequency* [Pomekhozashchishchyonnost' sistem svyazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochej chastity]. St. Petersburg. *Svoyo izdatel'stvo* [Svoje publishing house]. 2013. 166 p. (In Russian).
12. Fink L. M. *Theory of transmission of discrete messages* [Teoriya peredachi diskretnyh soobshchenij]. Moscow. Sov. Radio Publ. 1970. 496 p. (In Russian).

Статья поступила 24 сентября 2024 г.

### Информация об авторах

*Катанович Андрей Андреевич* – доктор технических наук, профессор. Заслуженный деятель науки Российской Федерации. Заслуженный работник связи Российской Федерации. Заслуженный изобретатель Российской Федерации. Главный научный сотрудник. Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства Военно-Морского Флота Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: телекоммуникационные системы Военно-Морского Флота. Тел.: +7 921 318 46 07. E-mail: andrei.katanovitch@yandex.ru

*Пыков Евгений Владимирович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Заместитель начальника отдела. Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства Военно-Морского Флота Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: помехозащищённые радиоканалы СДВ, ДВ, КВ диапазонов радиоволн. Тел.: +7 981 852 42 39. E-mail: eugene354057@list.ru

*Цыванюк Вячеслав Александрович* – кандидат военных наук. Почетный изобретатель Министерства обороны Российской Федерации. Старший научный сотрудник. Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства Военно-Морского Флота Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: телекоммуникационные системы Военно-Морского Флота. Тел.: +7 911 267 38 27. E-mail: ciwoniuk@mail.ru

Адрес: 198516, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Разводная, д. 17.

*Густов Александр Александрович* – доктор военных наук, профессор. Заместитель директора научно-исследовательского центра по научной работе. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7 911 917 47 15. E-mail: a.gustov@inteltech.ru. Адрес: 197342, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

### Simulation of noise-proof decimeter channels operating in the mode of frequency-hopping spread spectrum

A. A. Katanovich, E. V. Pykov, V. A. Tsyvanyuk, A. A. Gustov

**Annotation. Purpose:** The problem of increasing the reliability and noise immunity of radio signal reception in noise-resistant radio channels in the decimeter frequency band can be addressed by improving the techniques for receiving and processing radio signals. Radio wave propagation in the decimeter band is characterized by statistically varying physical parameters, which can complicate the determination of signal parameters. However, these difficulties can be overcome through the use of non-parametric statistical estimation

*methods. This study aims to conduct a comparative analysis of different signal demodulation techniques for multiple frequency-shift keying in decimeter communications, including incoherent correlation methods and non-parametric rank-based signal reception. This analysis will be conducted using computer simulation of a decimeter channel operating in frequency-hopping spread spectrum. **Methods employed:** The solution to the problem is based on non-parametric rank estimation techniques that are resilient to significant variations in the signal sample values, as well as techniques for receiving a radio signal in conditions of a priori uncertainty regarding the parameters of the communication channel. **Novelty:** This paper presents the findings of computer simulations and numerical experiments that validate the efficacy of the developed non-parametric ranking approach for demodulation of multiple frequency-shift keying signals for decimetre radio communication channels, in terms of average symbol error rate for various propagation conditions of radio waves and interferences. The main findings of a comparative study on the performance of an incoherent correlation signal demodulator for multiple frequency-shift keying and a non-parametric rank signal demodulator, which accumulates estimates of received signal parameters over the duration of a time-frequency matrix, under conditions of both general and interference-induced fading, are presented. The effects of pulse and concentrated interference are considered. **Practical relevance:** The values of efficiency and stability indices for evaluation functionals in incoherent correlational and non-parametric rank demodulation are determined. Basic patterns and interrelationships between the values and characteristics of influence functions for evaluation functionals under pulse and concentrated interference conditions are obtained.*

**Keywords:** asymptotic relative efficiency, impulse and concentrated interference, correlation integral, nonparametric rank estimation functional, influence function.

#### Information about Authors

*Andrey Andreevich Katanovich* – PhD, Chief Researcher, Professor. Honored Scientist of the Russian Federation. Honored Worker of Communications of the Russian Federation. Honored Inventor of the Russian Federation. Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development of the Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy». Research interests: telecommunications systems of the Navy. Tel.: +7 921 318 46 07. E-mail: andrei.katanovitch@yandex.ru. Address: 198516, St. Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

*Evgeny Vladimirovich Pykov* – is a candidate for the degree of Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of the department. The Scientific Research Institute of Operational and Strategic Studies of the Construction of the Navy of the Military Training and Scientific Center of the Navy "Naval Academy". Research interests: interference-proof radio channels of the SDV, DV, KV radio wave bands. Tel.: +7 981 852 42 39 . E-mail: eugene354057@list.ru. Address: 198516, St. Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

*Vyacheslav Alexandrovich Tsyvanyuk* – is a candidate of military Sciences. Honorary Inventor of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Senior researcher. The Scientific Research Institute of Operational and Strategic Studies of the Construction of the Navy of the Military Training and Scientific Center of the Navy "Naval Academy". Research interests: telecommunications systems of the Navy. Tel.: +7 911 267 38 27. E-mail: ciwoniuk@mail.ru. Address: 198516, St. Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

*Alexander Alexandrovich Gustov* – Doctor of Military Sciences, Professor. Deputy Director of the Research Center for Scientific work. Public Joint Stock Company "Information Telecommunication Technologies" (PJSC "Inteltech"). Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7 911 917 47 15. E-mail: a.gustov@inteltech.ru Address: 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Катанович А. А., Пыков Е. В., Цыванюк В. А., Густов А. А. Имитационное моделирование помехозащищённых декаметровых каналов, функционирующих в режиме псевдослучайной перестройки радиочастоты // Техника средств связи. 2024. №3 (167). С. 52-66. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-52-66

#### Reference for citation:

Katanovich A. A., Pykov E. V., Tsyvanyuk V. A., Gustov A. A. Simulation of noise-proof decimeter channels operating in the mode of frequency-hopping spread spectrum. Means of Communication Equipment. 2024. № 3 (167). Pp. 52-66. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-52-66

## Обобщенная модель функционирования системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций

Морозов А. Н.

**Аннотация.** *Цель:* разработка модели системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций в интересах создаваемой системы их электроэнергетического обеспечения. **Методы:** в работе используются методы теории надежности, в частности – расчет такого комплексного показателя надежности как коэффициент оперативной готовности. **Новизна:** поскольку во многих предшествующих исследованиях авторы при формировании системы электроэнергетического обеспечения далеко не в полной мере учитывали взаимосвязь между её структурой и условиями использования аккумуляторных батарей и средств заряда, то в предложенной модели данное обстоятельство учитывается. При этом в модели в качестве частных показателей эффективности наряду с временем разряда аккумуляторных батарей в радиостанциях, временем обслуживания аккумуляторной батареи в полевой зарядной базе, учитывается также и время перемещения (доставки) аккумуляторной батареи от радиостанций к полевой зарядной базе и обратно, позволяя оценить эффективность электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций системы радиосвязи. **Результат:** Дано определение системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций, указана ее основная задача, а также роль и важность в обеспечении функционирования вышестоящей системы. Представлена разработанная обобщенная структурная схема и варианты построения системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций, а также частные показатели ее эффективности. Показаны критерии оценки технической и экономической эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций. При этом обобщенная модель функционирования перспективной системы электроэнергетического обеспечения представлена в виде функциональной схемы существующего варианта её построения с размещением подвижной зарядной базы на пункте управления подразделения, т. е. при максимальном удалении от переднего края (специальных позиций).

**Ключевые слова:** аккумуляторные батареи, зарядные средства, носимые и портативные радиостанции, обеспечение электроэнергией, система электроэнергетического обеспечения.

### Введение

Одной из важных составляющих системы связи является система радиосвязи (СРС), организуемая на основе носимых и портативных радиостанций. При этом обеспечение портативными радиостанциями существенно возросло в настоящее время. Данное обстоятельство увеличивает нагрузку на электроэнергетическое обеспечение СРС, поскольку общее количество портативных и носимых радиостанций весьма велико.

Неотъемлемой составной частью СРС являются средства заряда, накопители электроэнергии (НЭ), обеспечивающие функционирование радиостанций, и средства доставки НЭ к средствам заряда. Автором предлагается разобщенные элементы обеспечения функционирования радиостанций рассматривать как единую систему – систему электроэнергетического обеспечения (СЭО), которая представляет собой совокупность технических сил и средств, предназначенных для обеспечения электроэнергией носимых и портативных средств радиосвязи в необходимом количестве, требуемого качества в заданном районе выполнения задачи [1, 2].

В общем случае структура СЭО определяется организационно-тактическим построением специальных подразделений и представляет собой многоуровневую иерархическую систему взаимодействующих органов и должностных лиц, технических средств (аккумуляторные

батареи (АКБ) зарядные средства (ЗС)), а также включает в себя маршруты и средства доставки АКБ на заряд и обратно после заряда в подразделения.

Совершенствование и расширение функций СРС приводит к всевозрастающей, зачастую запредельной нагрузке на систему электроэнергетического обеспечения, что, в свою очередь, определяет необходимость ее доработок для обеспечения необходимого уровня эффективности.

В настоящее время СЭО имеет ряд недостатков, поскольку в ранее проводимых исследованиях при разработке конкретных технических средств СЭО (АКБ, зарядные устройства (ЗУ), ЗС и т.п.), не уделялось должного внимания вопросам их эффективного использования и взаимоувязывания в системе, а также определения комплексных параметров, которые существенно влияют на технический уровень СЭО в целом [3-5]. Кроме того, многолетние исследования автора в данной предметной области позволяют сделать вывод о том, что многие ученые при формировании СЭО далеко не в полной мере учитывали взаимосвязь между структурой СЭО и условиями использования СРС [6, 7]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что вопрос исследования эффективности СЭО СРС, является актуальным.

### Основное содержание модели системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций

Обобщённая модель функционирования СЭО представлена в виде функциональной схемы существующего варианта построения СЭО с размещением подвижной зарядной базы (ПЗБ) на пункте управления (ПУ) подразделения, т. е. при максимальном удалении от специальных позиций (рис. 1).

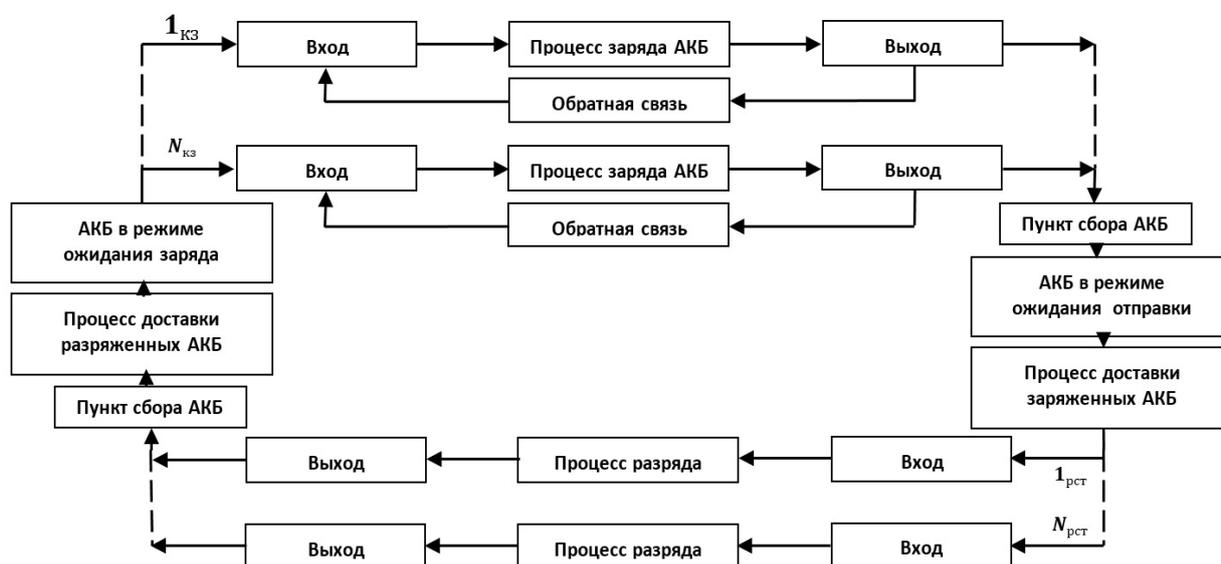


Рис. 1. Обобщённая модель функционирования СЭО

Каждый канал заряда характеризуется входом, процессом заряда, выходом и обратной связью. Часть АКБ могут находиться в ожидании очереди заряда, поскольку количество поступающих на заряд АКБ превышает количество каналов заряда в ПЗБ.

Основным условием функционирования СРС в специальных условиях является непрерывная работа радиостанций. Это условие может быть выполнено в том случае, если за время разряда одной АКБ, к радиостанции будет доставлена другая заряженная АКБ. Как следует из рис. 1, разряженные АКБ доставляются на пункты сбора АКБ (ПСАБ), организуемых на специальных позициях, например, на контрольных пунктах подразделений

непосредственно членами подразделений. Дальнейшее перемещение АКБ осуществляется с помощью транспортного средства. Доставка АКБ к ПЗБ и обратно к радиостанциям может быть длительной, что затрудняет своевременную поставку заряженных АКБ к радиостанциям. Процесс доставки АКБ на заряд и обратно может быть существенно изменён путём приближения зарядных средств (ПЗБ, ЗУ) к местам эксплуатации радиостанций (МЭР).

В первом варианте на заряд доставляются все АКБ в масштабе всего подразделения, а ПЗБ размещается на самом большом расстоянии от МЭР. Для перевозки АКБ требуется транспортное средство с высокой проходимостью. Одним из способов сокращения длительности перемещения АКБ является вариант СЭО с размещением ПЗБ на пункте одного из подразделений. В этом случае требуется несколько ПЗБ (по количеству подразделений) и транспортные средства с высокой проходимостью, однако, сокращается количество заряжаемых АКБ на один канал заряда в ПЗБ. Далее рассматривается возможность размещения многоканальных ЗУ. При этом ЗУ размещается в машине руководителей, а доставка АКБ на заряд и обратно осуществляется с помощью выделенных для этой цели лиц, эксплуатирующих радиостанции. Время доставки АКБ на порядок меньше, чем в вышерассмотренных вариантах, и, кроме того, не требуется транспортных средств для перевозки АКБ. Если разместить многоканальное ЗУ в транспортные средства, в которых перевозятся эксплуатанты радиостанций, то время перемещения АКБ может сократиться от нескольких часов до нескольких минут. Кроме того, количество АКБ на один канал заряда существенно снизится, однако, увеличится общее количество ЗУ, так как ими должны быть оснащены все транспортные средства.

Как и другие виды специальной техники, элементы, входящие в СЭО, характеризуются множеством различных показателей. Так, ток разряда АКБ определяется режимами работы радиостанции (передача информации, приём и дежурный приём), которые имеют соответствующий ток потребления. Время работы радиостанции от одной заряженной АКБ может быть выражено в виде

$$t_{\text{рст}} = \frac{C_{\text{н}}}{I_1} + \frac{C_{\text{н}}}{I_2} + \frac{C_{\text{н}}}{I_3} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (1)$$

где  $C_{\text{н}}$  – номинальная ёмкость АКБ;  $I_1$  – ток потребления радиостанции в режиме передачи информации;  $I_2$  – ток потребления радиостанции в режиме приёма информации;  $I_3$  – ток потребления радиостанции в режиме дежурного приёма;  $t_1$  – время работы радиостанции в режиме передачи информации;  $t_2$  – время работы радиостанции в режиме приёма информации;  $t_3$  – время работы радиостанции в режиме дежурного приёма. Показатель  $t_{\text{рст}}$  является принадлежностью СРС, который связывает СЭО с СРС как подсистему и представляет собой время разряда АКБ  $t_{\text{рз}}$ . Этот показатель должен стремиться к максимуму.

После разряда, АКБ переходит из одного системного объекта (радиостанции) в другой (ПЗБ или ЗУ), где организуется ее заряд. При этом АКБ становится принадлежностью СЭО. Время заряда АКБ  $t_3$  является важным показателем СЭО, от которого зависит своевременная доставка заряженных АКБ к радиостанциям, поэтому  $t_3$  можно считать частным показателем эффективности, а его значение должно быть минимальным.

Зарядные средства СЭО характеризуются следующими показателями: количество каналов заряда в ЗУ  $N_{\text{кз1}}$ , общее количество каналов заряда в ПЗБ  $N_{\text{кз}}$ , ток заряда  $I_{\text{зн}}$ . Количество каналов заряда в ПЗБ определяется массогабаритными показателями применяемых в ней ЗУ. Существующая ПЗБ для размещения на специальном пункте формирования имеет 120 каналов заряда, что не обеспечивает своевременный заряд поступающих АКБ, поскольку их количество кратно превышает количество каналов заряда. Дальнейшее увеличение  $N_{\text{кз}}$  в ПЗБ ограничено объёмом кузовов-фургонов транспортных средств. Недостаточное количество каналов заряда в ПЗБ существенно снижает ее производительность и увеличивает общее время заряда АКБ (общее время

нахождения АКБ в СЭО). В ПЗБ АКБ заряжаются партиями, часть которых должны находиться в режиме ожидания с временем  $t_{ож}$ . Помимо показателей  $t_3$  и  $t_{ож}$  в ПЗБ предусмотрен режим доразряда АКБ никель-кадмиевой электрохимической системы, когда они поступают с остаточной ёмкостью. Этот процесс характеризуется временем доразряда АКБ  $t_{дрз}$ , которое также увеличивает время обслуживания АКБ  $t_{обс}$ . Кроме того, затрачивается время на установку АКБ в ячейки ЗУ  $t_{уз}$ , поскольку мгновенно установить, 120 АКБ в ПЗБ не удастся. Время обслуживания АКБ в ПЗБ характеризуется показателем, который можно принять в качестве частного показателя эффективности

$$t_{обс} = t_{з1} + t_{ож} + t_{дрз} + t_{уз}, \quad (2)$$

где  $t_{з1}$  – время заряда одной партии АКБ.

Из вышеизложенного следует, что СЭО характеризуется следующими важными частными показателями эффективности: время разряда АКБ в радиостанциях –  $t_{рз}$ , время обслуживания АКБ в ПЗБ –  $t_{обс}$ , время перемещения (доставки) АКБ от радиостанций к ПЗБ и обратно –  $t_д$ , которые дают возможность оценить эффективность электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций СРС.

Зарядные средства должны обеспечивать обслуживание АКБ за минимальное время, соответствующее неравенству  $t_{обс} \leq t_{рз}$ , а с учётом процесса доставки разряженных и заряженных АКБ отвечать неравенству  $t_{са} = (t_д + t_{обс}) \leq t_{рз}$ , где  $t_{са}$  – время нахождения АКБ в системе. Поскольку СРС также характеризуется временем до перерыва связи из-за влияния СЭО  $t_{доПС}$ , то данный показатель определяет своевременность поступления заряженных АКБ к средствам радиосвязи в течение периода непрерывной эксплуатации радиостанций, и определяется значением времени  $t_{са}$ . Если  $t_{са} > t_{рз}$ , то  $t_{доПС} = t_{рз}$ . Если  $t_{са} \leq t_{рз}$ , то обеспечивается возможность своевременного поступления заряженных АКБ к средствам радиосвязи, и, соответственно, обеспечивается непрерывная работа радиостанций (время простоя  $t_{прст} = 0$ ). В таком случае  $t_{доПС}$  будет определяться наработкой АКБ до проведения контрольно-тренировочных циклов (КТЦ) (50 циклов заряд/разряд, продолжительность каждого из которых порядка  $t_{доПСц} = 15$  часов) и составит 750 часов. Количественное значение  $t_{обс}$  будет определяться производительностью ПЗБ, а  $t_{са}$  – функционированием СЭО в целом. Время функционирования СРС определено длительностью периода непрерывной эксплуатации радиостанций  $t_{оп}$ , т. е. при проведении последующих циклов непрерывной эксплуатации радиостанций, цикл функционирования СРС повторяется с восстановлением технических характеристик СЭО и СРС.

В общем случае СРС может находиться в одном из следующих состояний: работа радиостанций обеспечивается непрерывно путём достаточной и своевременной доставки заряженных АКБ ( $t_{доПС} = 50t_{ц}$ ); в работе радиостанций возможен перерыв из-за неудовлетворительного функционирования СЭО ( $t_{доПС} = t_{рз}$ ). Время восстановления электропитания радиостанции (время простоя) может быть определено из выражения  $t_{прст} = t_{са} - t_{рз}$ .

В качестве критерия технической эффективности СЭО принят коэффициент оперативной готовности СЭО, включающий в себя коэффициент готовности  $K_{ГСЭО}$  и вероятность безотказного электроэнергетического обеспечения  $P_{ЭО}$  радиостанций в системе радиосвязи. Выражение для оценки  $K_{огСЭО}$

$$K_{огСЭО} = K_{ГСЭО} \times P_{ЭО}, \quad (3)$$

$$P_{ЭО} = e^{-\frac{t}{t_{доПС}}}; K_{ГСЭО} = \frac{t_{доПС}}{t_{доПС} + t_{прст}}, \quad t \in [0; 750].$$

где

Решить задачу непрерывного функционирования радиостанций возможно как за счёт технического совершенствования электрооборудования СЭО, так и за счёт увеличения

количества резервных АКБ в комплекте одной радиостанции. Однако, неоправданное увеличение резервных АКБ приведёт к повышенным экономическим затратам. Общую стоимость СЭО можно определить из выражения

$$Z_{\text{сэо}} = Z_{1A}N_{1A}N_{\text{рст}} + Z_2N_{\text{пзб}} + Z_3N_3 + Z_4N_{\text{зу}}, \quad (4)$$

где  $Z_{1A}$  – стоимость одной АКБ;  $N_{1A}$  – количество АКБ в одном комплекте радиостанции,  $N_{\text{рст}}$  – количество радиостанций в формировании;  $Z_2$  – стоимость ПЗБ;  $N_{\text{пзб}}$  – количество ПЗБ в формировании;  $Z_3$  – стоимость средства доставки АКБ;  $N_3$  – количество средств доставки в формировании;  $Z_4$  – стоимость ЗУ;  $N_{\text{зу}}$  – количество ЗУ.

Необходимо отметить, что в ходе моделирования введены следующие ограничения и допущения: радиостанции комплектуются однотипными АКБ; внутренняя структура элементов СЭО считается неизменной в процессе исследования; рассматриваемые варианты СЭО имеют идентичные элементы; для сбора и доставки АКБ на заряд и обратно применяются транспортные средства; предполагаемые потери радиостанций не учитываются и их количество считается заданным в соответствии со штатным обеспечением; надёжностные характеристики элементов СЭО не учитываются в показателях эффективности, т. к. процесс функционирования СЭО рассматривается на небольшом интервале времени, равным  $t_{\text{оп}}$ , который значительно меньше наработки на отказ; считается, что фактическая емкость всех АКБ соответствует номинальной.

Функционирование СЭО в специальных условиях связано с тем, что большинство процессов (разряд, сбор и доставка АКБ на заряд, постановка на заряд и заряд) являются событиями, в которых переход из одного состояния в другое происходит случайно и в неопределенный момент времени. Зарядная база представляет собой станцию с  $n$  каналами заряда, а поставляемые АКБ на заряд – поток заявок, поступающих на обслуживание. Исходя из этого ПЗБ (ЗУ) рассматривается как многоканальная система массового обслуживания с ожиданием и характеризуется следующими показателями: относительной пропускной способностью  $Q_{\text{зб}}$ , средним временем заряда одной партии АКБ  $t_{\text{з1}}$ , средним временем ожидания в очереди  $t_{\text{ож}}$  и общим временем обслуживания АКБ в ПЗБ  $t_{\text{пзб}} = t_{\text{то}}$ . Общее время пребывания АКБ в СЭО определяется из выражения

$$t_{\text{са}} = t_{\text{пзб}} + t_{\text{дрз}} + t_{\text{уз}} + t_{\text{пз}} + t_{\text{д}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{пзб}} = t_{\text{з}} + t_{\text{ож}}$ .

Таким образом, разработанная модель учитывает мероприятия по перемещениям (доставке) АКБ к средствам заряда и обратно к МЭР, доразряду, обслуживанию, заряду и позволяет адекватно описывать процесс функционирования СЭО и количественно оценивать эффективность СЭО по выбранному критерию – коэффициенту оперативной готовности электроэнергетического обеспечения с учетом финансовых затрат на построение СЭО. При этом функционирование СЭО рассматривается в период непрерывной эксплуатации радиостанций с учетом взаимодействия с вышестоящей системой – системой радиосвязи. Кроме того, впервые, разобщенные технические средства заряда и накопления электроэнергии объединены в систему с описанием процессов, происходящих в ней.

### Заключение

Непрерывное развитие портативных и носимых средств связи, их активно расширяющаяся номенклатура, эволюция системы связи, определяющая необходимость увеличения штатного количества средств связи, оказывают существенное влияние на систему электроэнергетического обеспечения. Отмеченные обстоятельства определяют необходимость совершенствования существующей СЭО. Это, в свою очередь, обеспечит возможность построения эффективной системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций.

### Литература

1. Морозов А. Н., Слепов С. Н. Задачи и основные направления развития системы войсковой эксплуатации аккумуляторных батарей переносных средств связи тактического звена управления // Сборник трудов по проблемам электроэнергетики. М.: ВА РВСН, 2009. С. 71–75.
2. Морозов А. Н., Слепов С. Н. Анализ состояния и тенденции развития химических источников тока для войсковых переносных радиостанций // Сборник трудов МСНТ «Взаимодействие бизнеса и науки». М.: ОАО «Энергия», 2014. С. 44–48.
3. Охтилев П. А., Бахмут А. Д., Крылов А. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов на основе обобщенных вычислительных моделей // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 73–82.
4. Бартош В. В., Винограденко А. М., Веселовский А. П. Основные проблемы и перспективы развития АСЭС // Материалы НПК «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб.: Военная академия связи, 2018. С. 136–140.
5. Абрамкин Р. В., Яговитов Д. С. К вопросам функционирования подсистемы электроэнергетического обеспечения программно-конфигурируемых инфокоммуникационных сетей специального назначения // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1-2 (151–152). С. 98–106.
6. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.
7. Рембеза А. И. Надежность и эффективность в технике. Справочник. М.: Машиностроение, 1996. 224 с.

### Reference

1. Morozov A. N., Slepov S. N. *Zadachi i osnovnye napravleniya razvitiya sistemy vojskovojsk ekspluatatsii akkumulyatornyh batarej perenosnyh sredstv svyazi takticheskogo zvena upravleniya* [Tasks and main directions of development of the system of military operation of batteries of portable communication devices of the tactical management link]. *Sbornik trudov po problemam elektroenergetiki* [Collection of works on problems of electric power industry]. Moscow. VA RVSN [MA SMF]. 2009. Pp. 71-75. (In Russian).
2. Morozov A. N., Slepov S. N. *Analiz sostoyaniya i tendencii razvitiya himicheskikh istochnikov toka dlya vojskovykh perenosnykh radiostancij* [Analysis of the state and trends in the development of chemical current sources for military portable radio stations]. *Sbornik trudov MSNT «Vzaimodejstvie biznesa i nauki»* [Proceedings of the MSNT "Interaction of business and science"]. Moscow. JSC "Energiya". 2014. Pp. 44-48. (In Russian).
3. Ohtilev P. A., Bahmut A. D., Krylov A. V., Ohtilev M. Y., Sokolov B. V. *Podhod k ocenivaniyu strukturnykh sostoyanij slozhnykh organizacionno-tekhnicheskikh ob'ektov na osnove obobshchennykh vychislitel'nykh modelej* [Approach to estimation of structural states of complex organizational and technical objects based on generalized computational models]. H&ES Research. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 73-82. (In Russian)/
4. Bartosh V. V., Vinogradenko A. M., Veselovskiy A. P. *Osnovnye problemy i perspektivy razvitiya ASES* [Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems]. *Materialy NPK «Problemy tekhnicheskogo obespecheniya vojsk v sovremennykh usloviyah»* [«Main problems and prospects for development of autonomous power supply systems»]. St. Petersburg. *Voennaya akademiya svyazi* [Military Academy of Communications]. 2018. Pp. 136-140. (In Russian).
5. Abramkin R.V., Yagovitov D.S. *K voprosam funkcionirovaniya podsistemy elektroenergeticheskogo obespecheniya programmno-konfiguriruemykh infokommunikacionnykh setej special'nogo naznacheniya* [On the functioning of the subsystem of electric power supply of software-configurable infocommunication networks for special purposes]. *Voprosy oboronnoj tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu* [Issues of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism]. 2021. № 1-2 (151-152). Pp. 98-106. (In Russian).
6. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. *Upravlenie ekspluatatsiej sistem otvetstvennogo naznacheniya* [Responsible systems management]. Vladivostok. Dal'nauka Publ. 2000. 200 p. (In Russian).
7. Rembeza A.I. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike* [Reliability and efficiency in engineering]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1996. 224 p. (In Russian).

Статья поступила 12 сентября 2024 г.

### Информация об авторе

*Морозов Алексей Николаевич* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Начальник отдела ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России. Область научных интересов: электроэнергетическое обеспечение средств связи, формы и способы накопления и преобразования электрической энергии. Тел.: +7-903-270-01-74. E-mail: alexy.morozow@yandex.ru. Адрес: 141006, Московская обл., г. Мытищи, 1 Рупасовский пер., 5.

### A generalized model of the functioning of the electric power supply system for portable and portable radio stations

A. N. Morozov

**Annotation. Objective:** to develop a model of an electric power supply system for wearable and portable radio stations in the interests of the created system of their electric power supply. **Methods:** the work uses methods of reliability theory, in particular, the calculation of such a complex reliability indicator as the operational readiness coefficient. **Novelty:** since in many previous studies, the authors did not fully take into account the relationship between its structure and the conditions of use of batteries and charging means when forming an electric power supply system, this circumstance is taken into account in the proposed model. At the same time, in the model, along with the discharge time of batteries in radio stations, the maintenance time of batteries in the field charging base, the time of moving (delivering) the battery from radio stations to the field charging base and back is also taken into account as private efficiency indicators, allowing to evaluate the efficiency of electric power supply for wearable and portable radio stations of the radio communication system. **Result:** The definition of the electric power supply system for portable and portable radio stations is given, its main task is indicated, as well as the role and importance in ensuring the functioning of the higher-level system. The developed generalized block diagram and options for building an electric power supply system for portable and portable radio stations, as well as specific indicators of its effectiveness, are presented. The criteria for evaluating the technical and economic efficiency of the electric power supply system for portable and portable radios are shown. At the same time, a generalized model of the functioning of a promising electric power supply system is presented in the form of a functional diagram of the existing version of its construction with the placement of a mobile charging base at the unit's control point, i.e. at the maximum distance from the front edge (special positions).

**Keywords:** rechargeable batteries, chargers, portable and portable radios, electric power supply, electric power supply system.

### Information about Authors

*Alexey Nikolaevich Morozov* – is a candidate for the degree of Candidate of Technical Sciences. Head of the Department of the Federal State Budgetary Institution "16 Central Research Institute" of the Russian Ministry of Defense. Research interests: electric power supply of communication facilities, forms and methods of accumulation and conversion of electric energy. Tel.: +7-903-270-01-74. E-mail: alexy.morozow@yandex.ru . Address: 141006, Moscow region, Mytishchi, 1 Rupasovsky lane, 5.

### Библиографическая ссылка на статью:

Морозов А. Н. Обобщенная модель функционирования системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 67-73. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-67-73

### Reference for citation:

Morozov A. N. A generalized model of the functioning of the electric power supply system for portable and portable radio stations. *Means of Communication Equipment*. 2024. № 3 (167). С. 67-73 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-67-73

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-74-87

**Разработка всенаправленной широкополосной Wi-Fi антенны  
в целях использования на беспилотных летательных аппаратах**

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В.,  
Шаповалов Ф. А., Трапезников Р. В., Ахмедова И. М.

**Аннотация. Введение:** в настоящее время в момент бурного развития беспилотной авиации, особенно, в условиях возрастающего её значения для применения в специальной военной операции, актуализировалась тема обеспечения устойчивого управления беспилотными летательными аппаратами, в том числе в условиях радиоэлектронного противодействия. Одним из путей обеспечения устойчивости каналов управления, телеметрии и обратной связи в условиях радиоэлектронного противодействия является использование нестандартных радиочастот или возможность отстройки от помех в широкой частотной полосе. Поэтому основным новым требованием к всенаправленным антеннам для беспилотных летательных аппаратов является обеспечение работы в широкой полосе рабочих частот, составляющей не менее нескольких ГГц. **Целью работы** является освещение результатов проектирования и создания всенаправленной широкополосной антенны для применения на беспилотных летательных аппаратах в соответствии с требованиями по массогабаритным характеристикам от больших до малых их классов и обеспечения всенаправленного приёма-передачи цифровых данных в широкополосном wi-fi канале с наземными, морскими или воздушными пунктами управления. **Используемые методы:** патентный поиск, моделирование путём проведения расчётов в программе «CST MICROWAVE STUDIO» (численное моделирование высокочастотных устройств), разработка конструкции для беспилотного всеклиматического исполнения, проведение экспериментальных испытаний. **Результат:** заключается в разработке рабочей конструкторской документации оптимальной конфигурации всенаправленной широкополосной антенны для применения на беспилотном летательном аппарате, выполненной из отечественных материалов и комплектующих, а также в положительных оценках и заключениях испытаний опытного образца. **Практическая значимость:** разработка и постановка на серийное производство позволит решить вопрос оснащения беспилотных летательных аппаратов различных классов отечественными широкополосными антеннами. Разработанная антенна может найти применение в wi-fi системах различного назначения, например, для раздачи сетей 2G, 3G, 5G, 7G от роутеров в квартирах и в домах, в том числе, с использованием таких мобильных устройств как Bullet компании Ubiquiti Networks и аналогичных, в любых роботизированных комплексах, для измерения и тестирования wi-fi сетей и других приложений в диапазоне частот от 1,7 до 10 ГГц.

**Ключевые слова:** антенна, беспилотный летательный аппарат, диаграмма направленности, коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны по напряжению, конструкция, ширина полосы рабочих частот.

**Введение**

В настоящее время в момент бурного развития беспилотной авиации, особенно, в условиях возрастающего её значения для применения в специальной военной операции, актуализировалась тема обеспечения устойчивого управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), в том числе в условиях радиоэлектронного противодействия (РЭП). Одним из путей обеспечения устойчивости каналов управления, телеметрии и обратной связи в условиях РЭП является использование нестандартных радиочастот или возможность отстройки от помех в широкой частотной полосе. Поэтому основным новым требованием к всенаправленным антеннам для БПЛА является обеспечение работы в широкой полосе рабочих частот, составляющей не менее нескольких ГГц. Предлагаемый на рынке авиационных товаров широкий спектр антенных устройств для БПЛА, в основном китайского происхождения,

представляет собой антенны типа «штырь», «пагода», «клевер» или «V-образные» (рис. 1-4), имеющие сравнительно узкие полосы рабочих частот.

Поэтому в АО «НИИ «Нептун» было принято решение выполнить инициативную опытно-конструкторскую работу (ОКР) по разработке всенаправленной широкополосной антенны для применения на БПЛА. В результате ОКР была разработана рабочая конструкторская документация и изготовлен опытный образец, который успешно выдержал предварительные и лётные испытания.



Рис. 1. Антенна типа «штырь»



Рис. 2. Антенна типа «пагода»



Рис. 3. Антенна типа «клевер»



Рис. 4. Антенна типа «V-образная»

### Основные тактико-технические требования

В состав изделия входит комплект эксплуатационной документации и непосредственно антенно-фидерное устройство, включающее:

- основание;
- водозащищённый обтекатель;
- антенные элементы;
- элементы крепления к корпусу БПЛА.

*Требования назначения.*

Рабочий диапазон частот должен быть от 2 до 10 ГГц.

Диаграмма направленности (ДН):

- в горизонтальной плоскости – круговая;
- в вертикальной плоскости – с максимальным усилением вдоль горизонта.

Подключение антенно-фидерного устройства к аппаратуре БПЛА должно осуществляться по высокочастотному (ВЧ) кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом.

*Конструктивные требования.* Масса антенно-фидерного устройства должна быть не более 70 г, а ее конструкция должна обеспечивать соответствие требованиям ГОСТов по стойкости, прочности и устойчивости к воздействию механических и климатических факторов.

### Патентный поиск

Антенна типа «клевер» (рис. 3) [1, 2] имеет всенаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с максимальным коэффициентом усиления

1,35 дБи. Основопологающим для широкого использования параметром рассматриваемой антенны является круговая поляризация, возникающая по классическим принципам благодаря размещенным под  $45^\circ$  дуговым участкам, разнесенным на расстояния  $0,5\lambda$ , попарно противоположным и установленными под углом  $90^\circ$  друг относительно друга. За счет того, что эти участки являются, по сути, четвертью наклонённой окружности, антенна формирует равномерное поле с круговой поляризацией. Расположенные в пространстве дуговые участки крест на крест, и ориентированные в горизонтальную плоскость, попарно ортогонально, обеспечивают формирование диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Общая длина одного лепестка равняется длине волны на резонансе.

В [1] было проведено моделирование квазишунтовой антенны «клевер», изображённой на рис. 5 в программе *Ansoft HFSS14* на частотах *wi-fi* диапазона 2,4 ГГц. График зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) от частоты представлен на рис. 6. Из графика на рис. 6 видно, что рабочий диапазон квазишунтовой антенны «клевер» составляет не более 40 МГц по уровню КСВ не более 2.

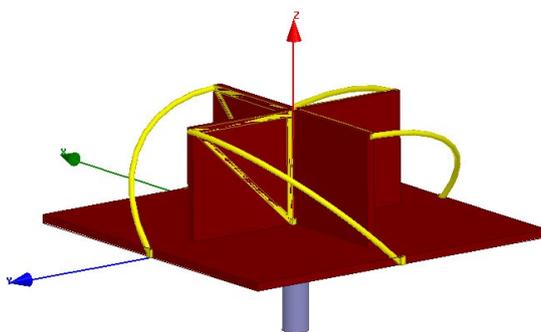


Рис. 5. Модель антенны квазишунтовой «клевер»

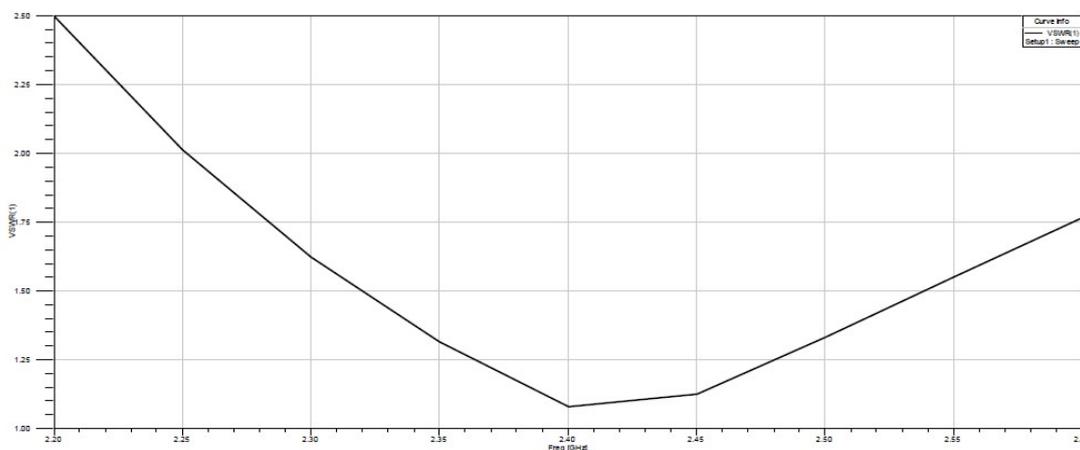


Рис. 6. График частотной зависимости КСВ антенны квазишунтовой «клевер»

Антенна «пагода» (рис. 2) была представлена на сайте [3] в интернете в сентябре 2016 г. аспирантом Лёвенского католического университета Мартеном Бертом.

Антенна состоит из трёх печатных дисков, соединённых соосно, на двух из которых напечатаны три горизонтальных полуволновых вибратора, развернутых относительно соседнего на  $120^\circ$ , образуя кольцевую антенную решетку из трех излучающих элементов, расположенных по окружности и формирующих круговую ДН в азимутальной плоскости (рис. 7). Третий диск представляет собой нижний рефлектор. Диски располагаются относительно друг друга на одной оси на определённом расстоянии, верхний диск расположен печатью вверх, а два других диска – печатью вниз. От размеров дисков (диаметр, и соответственно, размеры вибраторов) и расстояний между ними зависит рабочий диапазон частот антенны. Антенна имеет круговую диаграмму в горизонтальной плоскости и круговую поляризацию.

Для уточнения характеристик антенны типа «пагода» было выполнено моделирование в программе «CST MICROWAVE STUDIO» на диапазон частот 2,3 – 2,4 ГГц.

На рис. 8 представлена разработанная модель антенны типа «пагода».

На рис. 9 представлена модель антенны типа «пагода» в разрезе.

Масса антенны в сборе составила около 70 г.

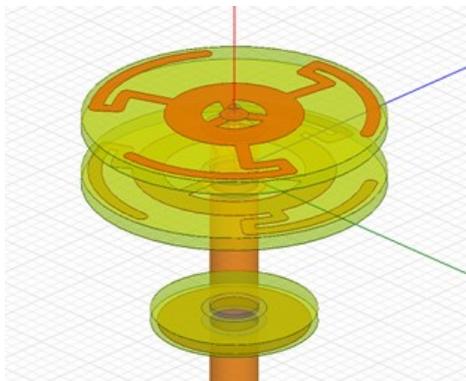


Рис. 7. Модель антенны «пагода»

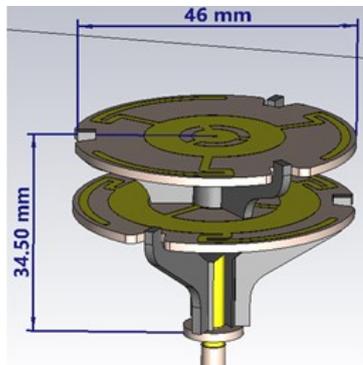


Рис. 8. Модель антенны «пагода»

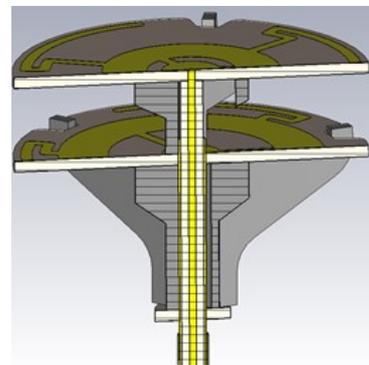


Рис. 9. Модель антенны «пагода» в разрезе

На рис. 10 представлена частотная зависимость КСВ модели антенны. Из этого графика видно, что рабочая полоса частот по уровню КСВ не более 2 составляет около 110 МГц, что почти в 3 раза превышает полосу рабочих частот антенны типа «клевер».

На рис. 11 представлена диаграмма направленности (ДН) антенны типа «пагода» в вертикальной плоскости. ДН в горизонтальной плоскости равномерно круговая и имеет максимальный коэффициент усиления 2,54 дБи на частоте 2,35 ГГц. В вертикальной плоскости ДН имеет провалы в области зенита и надира.

Для уточнения характеристик «V-образной» (рис. 4) антенны было выполнено моделирование в программе «CST MICROWAVE STUDIO» на диапазон частот 2,3 – 2,4 ГГц. Антенна «V-образного» типа имеет массу около 25 г. На рис. 12 представлена её модель на печатной плате. На рис. 13 представлена частотная зависимость S-параметров антенны «V-образного типа». S-параметры по уровню не более минус 10 дБ соответствуют КСВ не более 2, откуда видно, что полоса рабочих частот антенны «V-образного типа» составляет около 230 МГц (2,24-2,47 ГГц), что в два раза больше, чем у антенны типа «пагода».

На рис. 14 представлена диаграмма направленности антенны «V-образного» типа в вертикальной плоскости, откуда видно, что антенна имеет максимальный коэффициент усиления параллельно горизонту, который составляет 1,88 дБи на частоте 2,35 ГГц и равномерные провалы в области зенита и надира.

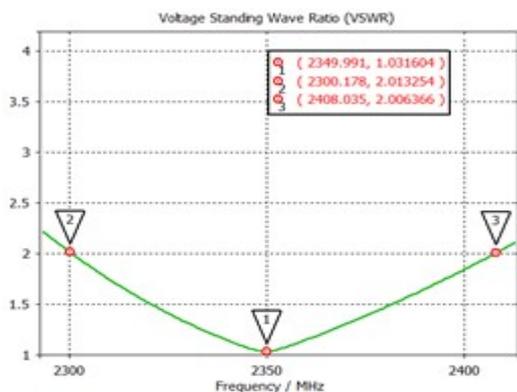


Рис. 10. График частотной зависимости КСВ антенны «пагода»

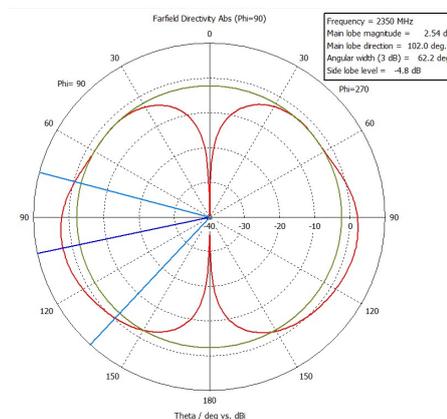


Рис. 11. График ДН антенны «пагода»

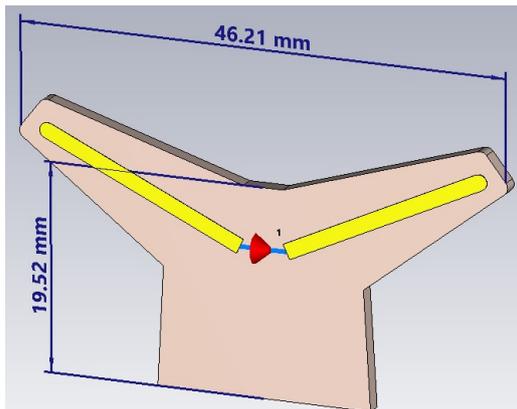


Рис. 12. Модель антенны V-образного типа

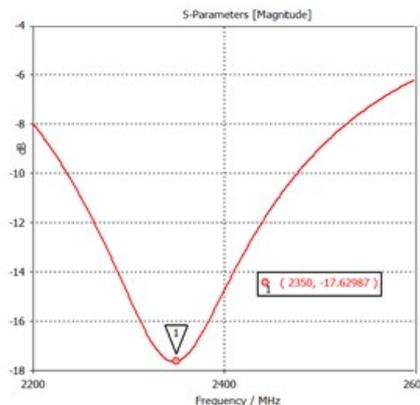


Рис. 13. График частотной зависимости КСВ антенны V-образного типа

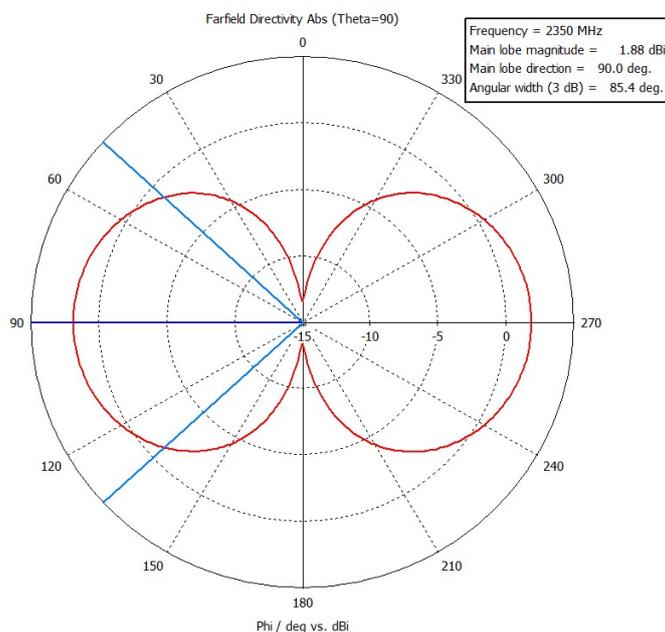


Рис. 14. График ДН антенны V-образного типа

Основным недостатком рассмотренных выше антенн является узкая полоса рабочих частот. В [4] представлена полезная модель широкополосной всенправленной дискоконусной антенны. На рис. 15 показано устройство заявленной в [4] полезной модели.

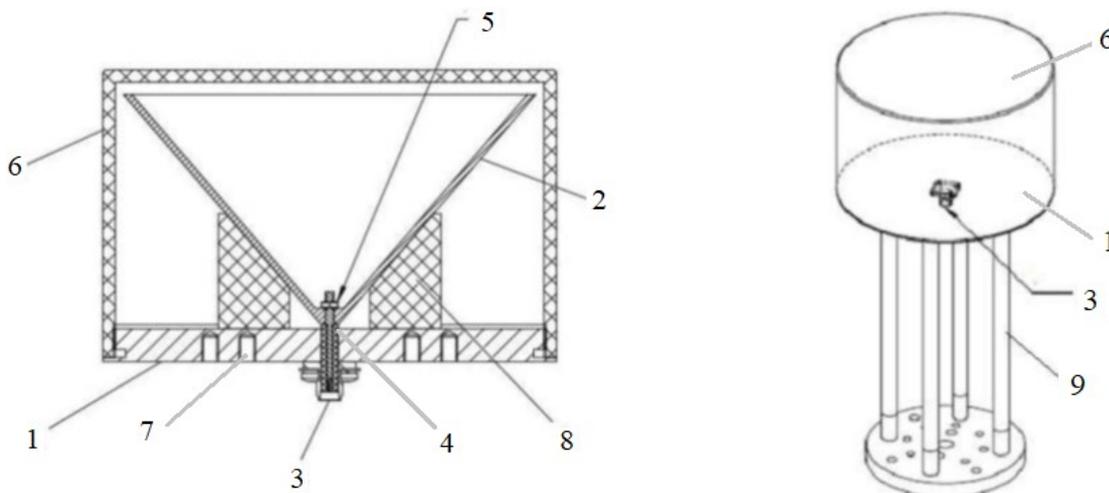


Рис. 15. Устройство всенправленной широкополосной дискоконусной антенны

Антенна включает в себя металлический диск (1), на верхней поверхности которого закреплен перевернутый металлический конус (2). Разъем SMA (3) закреплен на металлическом диске снаружи снизу с помощью винтов. Центральный цилиндр (4) разъема вставлен в отверстие металлического диска. Центральная жила (5) разъема соединяется с металлическим конусом. Радиопрозрачный обтекатель (6) закреплен снаружи металлического диска и закрывает металлический конус. Между верхней поверхностью металлического диска и металлическим конусом установлена цилиндрическая опорная рама (8), которая используется для поддержки металлического конуса. Чтобы предотвратить воздействие опорной рамы на антенну, она изготовлена из неметаллического диэлектрического материала. Антенна также включает в себя опорные стержни (9). На рис. 16 представлена структурная схема антенны (без обтекателя). Размер диска влияет на диаграмму направленности. Расстояние между диском и конусной конструкцией, а также угол конусной конструкции влияют на согласование импеданса антенны.

В табл. 1 показаны размеры металлического диска и металлического конуса в соответствии со схемой на рис. 16. Результаты моделирования показаны на рис. 17 и 18.

Таблица 1 – Размеры антенных элементов

Параметр	R	R1	H	w
Размер, мм	94	102	55	7

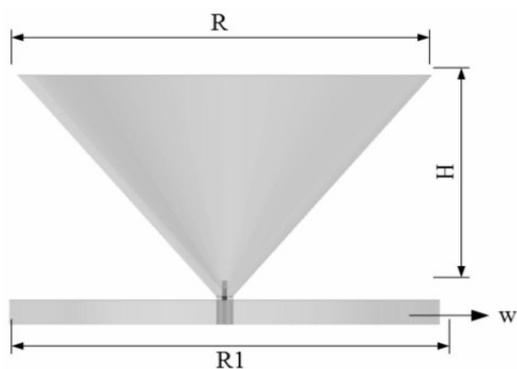


Рис. 16. Структурная схема антенны

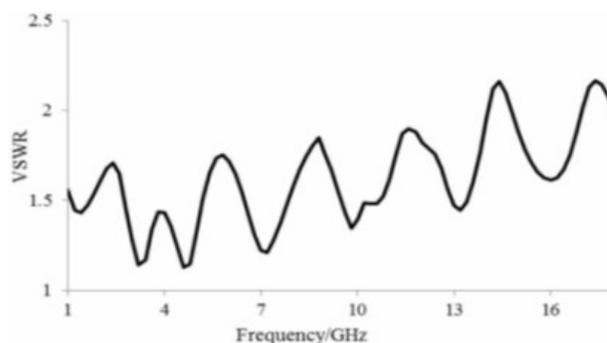


Рис. 17. График частотной зависимости КСВ дискоконусной антенны

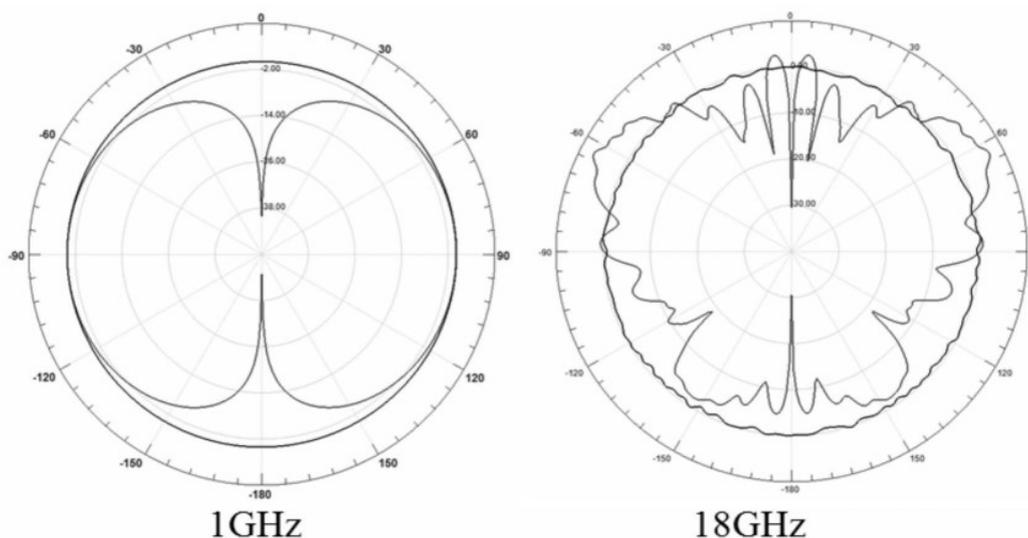


Рис. 18. График ДН дискоконусной антенны в вертикальной плоскости на частотах 1 и 18 ГГц

Заявленная в [4] модель широкополосной дискоконусной антенны в рабочем диапазоне частот от 1 до 18 ГГц имеет КСВ не более 2,2, результат усиления находится в пределах 1–8 дБ, а диаграмма направленности имеет всенаправленные характеристики.

Заявленная в [4] всенаправленная антенна была разработана и применена в реальных системах, например в [5]. Следует отметить как недостаток, что массогабаритные размеры антенны, которые приведены в [5] (масса составляет 500 г, габариты: общая высота – 229 мм, максимальный диаметр – 110 мм), не могут позволить использовать данную антенну на БПЛА малого класса, и критичны для использования на БПЛА среднего класса.

### Выбор конструкции проектируемой антенны

На основе рассмотренных антенн, патентов и литературы был выполнен анализ и сделан выбор конструкции для дальнейшего расчёта и проектирования. За основу для выбора конструкции проектируемой антенны была взята дискоконусная конструкция, описанная в [6], поскольку она имеет стабильную диаграмму направленности в широкой полосе частот и сравнительно проста по своему устройству. Дискоконусную антенну относят к антеннам с верхним питанием, которые снабжены концевой ёмкостью в виде диска и конусообразным внешним проводником.

Выше нижней частотной границы  $f_n$ , на которую рассчитана антенна, КСВ в 50-омном фидере не превышает 2 во всей частотной области с отношением пределов 1 : 10.  $f_n$  можно определить как наименьшую рабочую частоту, на которой КСВ не превышает 3. На частотах ниже  $f_n$  КСВ быстро растёт, а выше  $f_n$  – постепенно убывает до своего среднего значения менее 1,5. Дискоконусная антенна электрически ведёт себя как фильтр верхних частот с относительно крутым спадом частотной характеристики. Результаты определений минимальной рабочей частоты  $f_n$  зависят от длины конуса  $L_s$ , диаметра диска  $D$  и угла при вершине конуса  $\phi/2$  (рис. 19).

Как показывают экспериментальные данные [6] оптимальный  $D$  составляет  $0,7C_{\max}$  независимо от угла  $\phi/2$ . Длина конуса  $L_s$  определяется углом  $\phi/2$  и составляет приблизительно  $0,25\lambda$  – четверть средней рабочей длины волны.  $C_{\min}$  ограничивает частотную область сверху таким образом, что она расширяется с уменьшением  $C_{\min}$ . Между  $C_{\min}$  и промежутком  $S$  действует соотношение  $S = 0,3C_{\min}$ , зависящее от угла  $\phi/2$ .

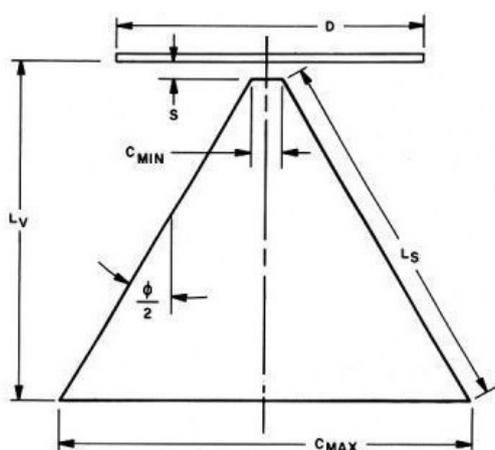


Рис. 19. Схема классической конструкции дискоконусной антенны

### Результаты численного моделирования в программе «CST MICROWAVE STUDIO» в целях выбора и оптимизации конструкции проектируемой антенны

Выполненное численное моделирование в программе «CST MICROWAVE STUDIO» с целью оптимизации размеров дискоконусной антенны для обеспечения широкой полосы рабочих частот в *wi-fi* диапазоне привело к полному совпадению размерных пропорций дискоконусной антенны, указанных в [6] в соответствии с рис. 19.

На рис. 20 показаны основные детали и габариты антенны без обтекателя и основания. На рис. 21 показана модель антенны в сборе, выполненная в программе «*CST MICROWAVE STUDIO*». На рис. 22 показана модель антенны в разрезе.

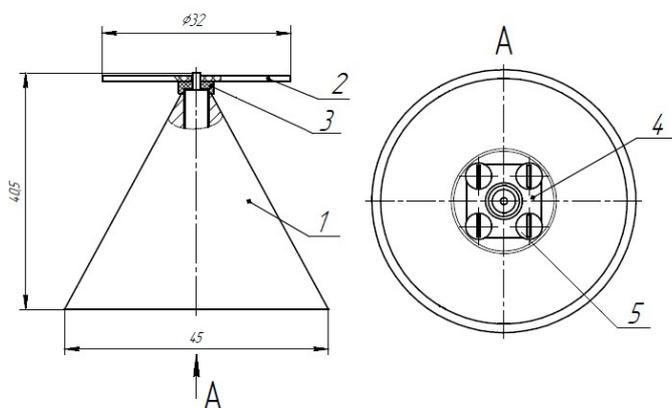


Рис. 20. Основные элементы антенны

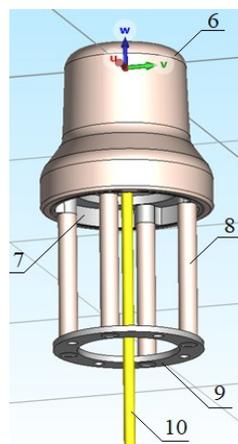


Рис. 21. Модель антенны

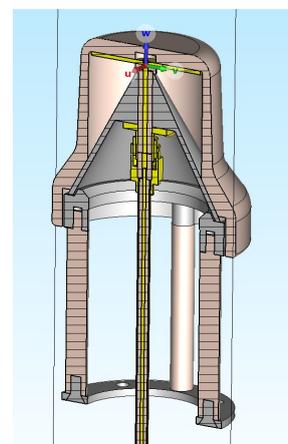


Рис. 22. Модель антенны в разрезе

Антенна состоит из алюминиевого проводящего конуса (1), выточенного на токарном станке с числовым программным управлением, и медного проводящего диска (2), соединённых между собой для изоляции фторопластовой втулкой (3). При этом она содержит приборный фланцевый разъём *SMA* (4), центральная жила которого во фторопластовой оболочке проходя через центральное отверстие алюминиевого проводящего конуса (1) и фторопластовой втулки (3) припаяна к центральному отверстию медного проводящего диска (2), а корпус приборного фланцевого разъёма *SMA* (4) винтами (5) закреплён на выточенном внутреннем фланце алюминиевого проводящего конуса (1).

Разработанная антенна отличается от классической дискоконусной антенны, представленной на рис. 19, тем, что конус антенны находится в непосредственном контакте с алюминиевым проводящим основанием антенны (7) (рис. 21), что приводит к геометрическому изменению классической проводящей конусной конструкции. Это обеспечивает расширение полосы рабочих частот антенны от 1,7 до 10 ГГц. При этом на алюминиевое основание посредством резьбы накручивается радиопрозрачный пластиковый обтекатель (6) удерживающий своей внутренней формой диск (2) в горизонтальном положении на фторопластовой втулке (3) и прижимающий дискоконусную антенну к алюминиевому основанию (7). К алюминиевому основанию антенны снизу крепятся четыре пластиковые стойки (8), соединяющие его с нижним алюминиевым диском (9), обеспечивающим крепление антенны к корпусу БПЛА на расстоянии, уменьшающем влияние корпуса беспилотного летательного аппарата на диаграмму направленности антенны. Также на рис. 21 показан фидер (10), подключенный к фланцевому разъёму *SMA* (4).

На рис. 23 представлена модель первоначального варианта разрабатываемой дискоконусной антенны. На рис. 24 представлена модель первого варианта дискоконусной антенны в разрезе. Первый вариант получился очень тяжёлым с массой около 120 г. Габариты: общая высота – 109 мм, максимальный диаметр – 70 мм. На рис. 25 представлена частотная зависимость КСВ первого варианта дискоконусной антенны, полученная расчётным путём в программе «*CST MICROWAVE STUDIO*».

Из графика видно, что рабочая полоса антенны по уровню КСВ не более 2 лежит в пределах от 1,7 до 4,2 ГГц. Выше этого диапазона до 10 ГГц КСВ периодически превышает заданные пределы до 2,75, что не в полной мере удовлетворяет заданным требованиям.

В целях уменьшения массогабаритных характеристик, уменьшения влияния металлических деталей (стоек) на диаграмму направленности и расширения рабочей полосы

частот был разработан второй вариант дискоконусной антенны, представленный в виде модели на рис. 21 и в общем собранном виде на рис. 26. Стойки во втором варианте изготавливаются из пластика вместо металла, а большое пластиковое основание антенны заменено на алюминиевое дисковое основание с выточками под крепление стоек. Резьбовой способ соединения алюминиевого основания с обтекателем позволили уменьшить максимальный диаметр антенны по сравнению с первым вариантом, где соединение производилось с помощью специального крепежа. Соответственно уменьшились габариты и масса обтекателя. Масса второго варианта антенны составляет 70 г. Габариты: общая высота – 100 мм, максимальный диаметр – 54 мм.

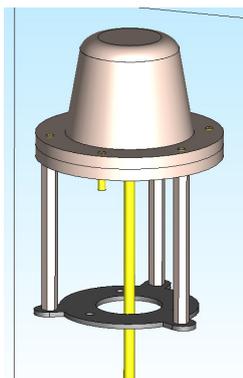


Рис. 23. Модель антенны

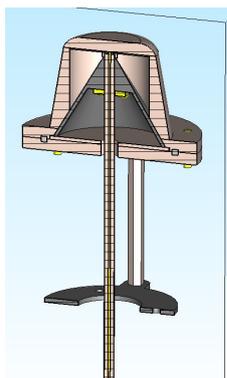


Рис. 24. Модель антенны в разрезе

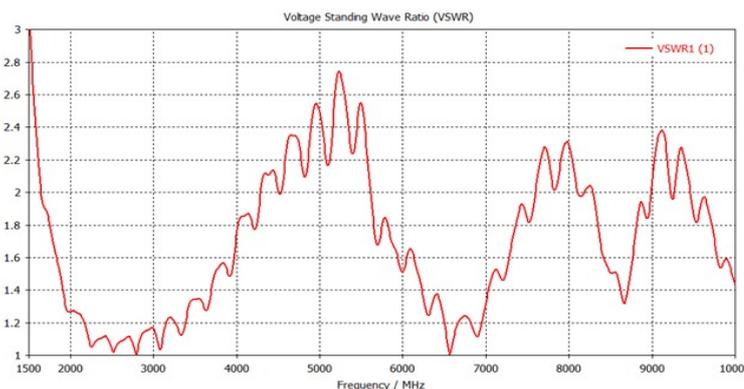


Рис. 25. Частотная зависимость КСВ модели антенны

На рис. 27 представлена частотная зависимость КСВ второго варианта дискоконусной антенны, полученная расчётным путём в программе «CST MICROWAVE STUDIO». Из графика видно, что рабочая полоса антенны по уровню КСВ не более 2 лежит в пределах от 1,6 до 10 ГГц с небольшим превышением до 2,07 на частоте 9,86 ГГц.



Рис. 26. Антенна в сборе

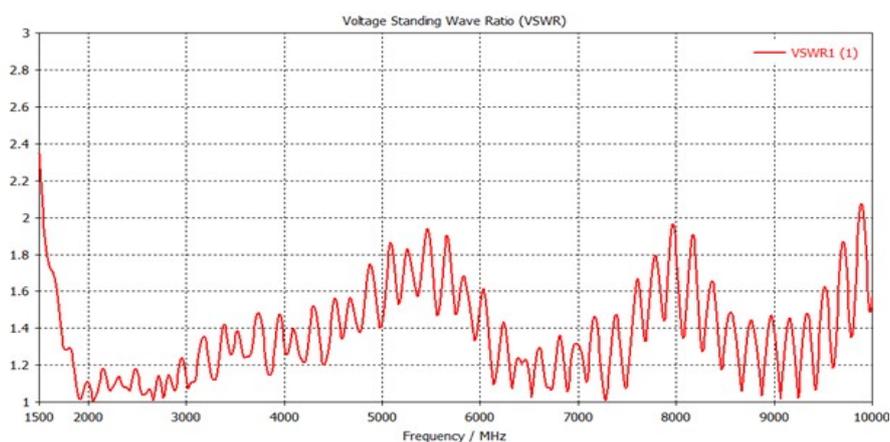


Рис. 27. Частотная зависимость КСВ модели антенны

На рис. 28 – 30 представлены диаграммы направленности разработанной антенны в вертикальной плоскости на частотах 2, 4 и 10 ГГц соответственно, полученные расчётным путём в программе «CST MICROWAVE STUDIO».

Коэффициент усиления антенны в диапазоне от 1,7 до 10 ГГц составляет в максимуме излучения 2-9 дБи.

Из приведённых ДН видно, что с ростом частоты ДН антенны в вертикальной плоскости изменяется с увеличением излучения на нижних углах и усилением проявления неравномерности. При этом усиление в горизонтальном направлении изменяется незначительно и составляет с учётом неравномерности 0-4 дБи.

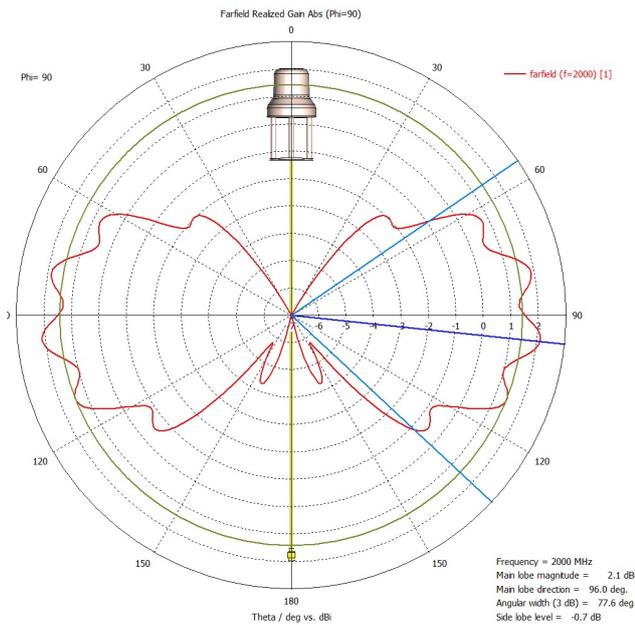


Рис. 28. ДН антенны на частоте 2 ГГц

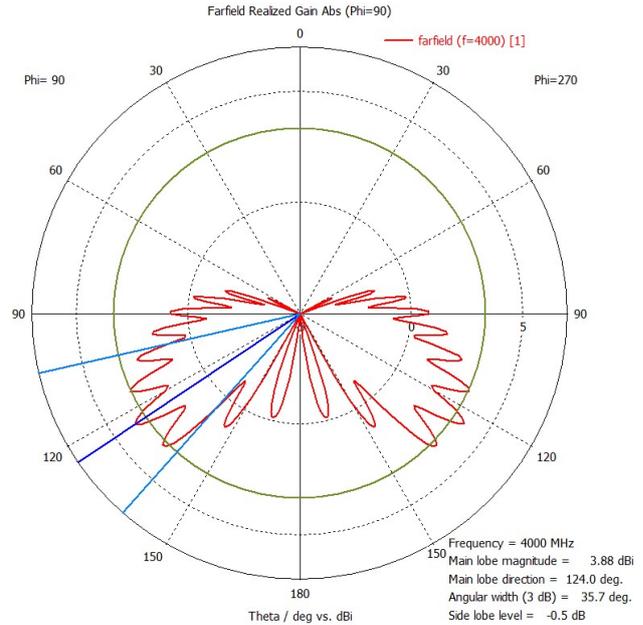


Рис. 29. ДН антенны на частоте 4 ГГц

Для проверки полученных при моделировании результатов были изготовлены образцы антенн и проведены измерения их КСВ.

На рис. 31 приведена фотография вертикально стоящих изготовленных антенн. На рис. 32 приведена фотография изготовленных антенн с видом нижнего основания, конуса и приборного фланцевого разъёма SMA.

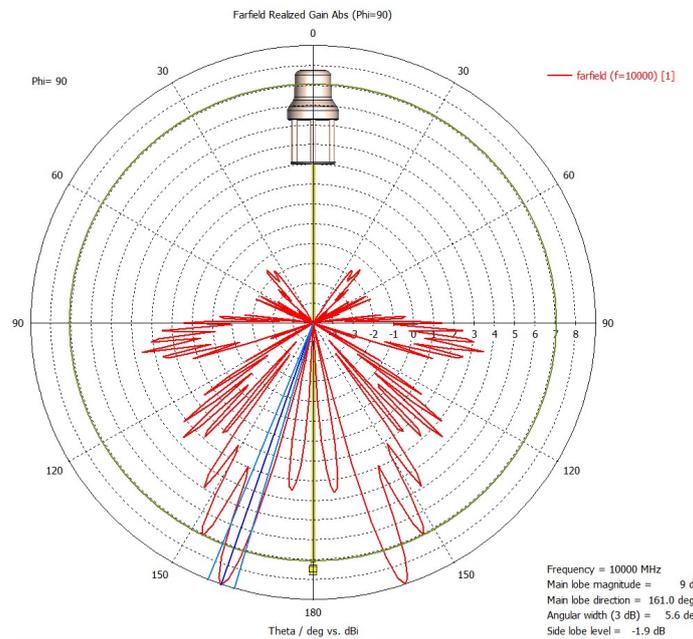


Рис. 30. ДН антенны на частоте 10 ГГц

Антенна, которая находится слева на фотографии, имеет нижнее основание, на которое устанавливается конус, из алюминия, а у антенны справа на фотографии это основание изготовлено на 3D-принтере из пластика.

На рис. 33 – 36 представлены фотографии измерений зависимости КСВ этих антенн от частоты. Измерения выполнялись с помощью анализатора спектра *Anritsu MS2038C* с опцией векторного анализатора.



Рис. 31. Вид антенн в вертикальном положении



Рис. 32. Вид антенн снизу

Из представленных зависимостей на рис. 33 – 36 видно, что у антенны с алюминиевым основанием под конусом рабочий диапазон частот с КСВ не более 2 начинается от 1,7 ГГц, а у антенны с пластиковым основанием – от 1,75 ГГц. У антенны с алюминиевым основанием в диапазоне частот от 1,73 до 10 ГГц КСВ в большей части диапазона не превышает величины 1,5 и имеет максимум на частоте 5,2 ГГц составляющий 1,78.

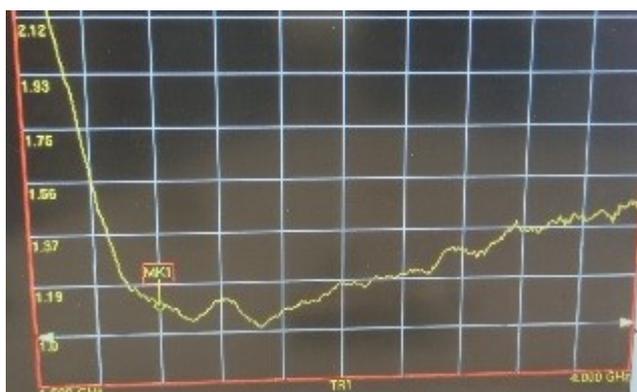


Рис. 33. Зависимость КСВ от частоты в диапазоне частот 1,5 – 4 ГГц антенны с алюминиевым основанием под конусом

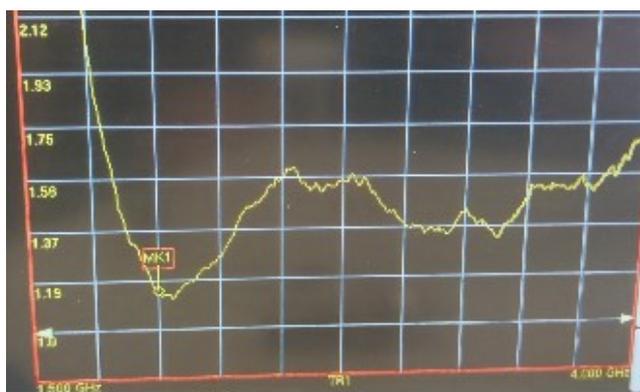


Рис. 34. Зависимость КСВ от частоты в диапазоне частот 1,5 – 4 ГГц антенны с пластиковым основанием под конусом

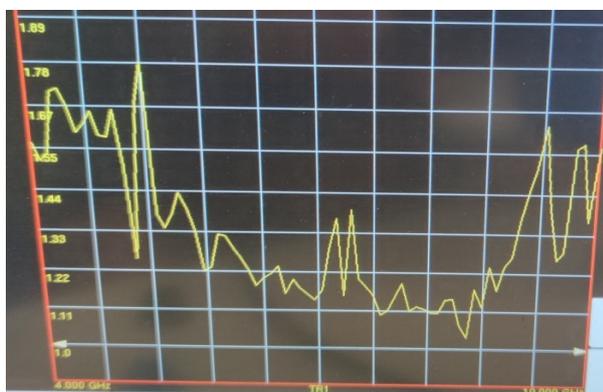


Рис. 35. Зависимость КСВ от частоты в диапазоне частот 4 – 10 ГГц антенны с алюминиевым основанием под конусом

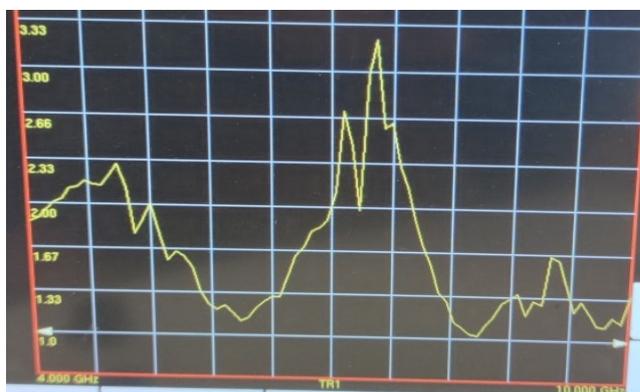


Рис. 36. Зависимость КСВ от частоты в диапазоне частот 4 – 10 ГГц антенны с пластиковым основанием под конусом

У антенны с пластиковым основанием имеется три рабочих полосы частот, где КСВ не превышает 2: 1,75 – 4,25 ГГц; 5,1 – 7,0 ГГц и 7,8 – 10 ГГц. Максимальный КСВ в полосе от 1,75 до 10 ГГц достигает 3,25 около частоты 7,47 ГГц.

Таким образом, выполненные измерения КСВ изготовленных антенн подтвердили результаты моделирования в программе «*CST MICROWAVE STUDIO*» и правильность применённого в антенне технического решения в виде алюминиевого основания под конусом для обеспечения широкополосности диапазона рабочих частот антенны от 1,7 до 10 ГГц.

### Заключение

Разработанная широкополосная всенаправленная *wi-fi* антенна для БПЛА имеет тактико-технические характеристики и надёжностные показатели, позволяющие обеспечить требования по массогабаритным характеристикам для эксплуатации на БПЛА различных классов и обеспечения всенаправленного приёма-передачи цифровых данных в широкополосном *wi-fi* канале с наземными, морскими или воздушными пунктами управления.

Постановка разработанной антенны на серийное производство позволит решить вопрос оснащения БПЛА любых классов отечественными антеннами взамен импортных аналогов с обеспечением работы в широкополосном *wi-fi* канале на частотах от 1,7 до 10 ГГц.

Дополнительно следует отметить, что разработанная антенна может найти применение в *wi-fi* системах различного назначения, например, для раздачи сетей 2G, 3G, 5G, 7G от роутеров в квартирах и в домах, в том числе, с использованием таких мобильных устройств как *Bullet* [7] компании *Ubiquiti Networks* и аналогичных, в любых роботизированных комплексах, для измерения и тестирования *wi-fi* сетей и других приложений в диапазоне частот от 1,7 до 10 ГГц.

### Литература

1. Калитёнков Н. В., Полежаев В. С., Милкин В. И. Исследование клеверных антенн как основы для разработки инновационных антенных устройств // Интернет-журнал «Национальное Достояние». 2018. № 1 (1). URL: <http://nauka21.ru/wp-content/uploads/2018/10/11-2018-article-2.pdf> (дата обращения 11.05.2023).
2. Милкин В. И., Калитёнков Н. В. и др. Антенна круговой поляризации квазишунтовой «клевер». Патент RU № 166256 Н01Q 21/24. Оpubл.: 20.11.2016.
3. URL: <https://www.maartenbaert.be/quadcopters/antennas/pagoda-antenna/> (дата обращения 12.05.2023).
4. Ху Нань. Сверхширокополосная дискоконусная антенна. Патент на полезную модель № CN217036005U (Китай). Н01Q (01.05.2015). Пекинская компания «Синъянлянь микроволновые технологии, Лтд». Оpubл. 22.07.2022.
5. URL: [https://www.ainfoinc.com/amfilerating/file/download/file\\_id/9500/](https://www.ainfoinc.com/amfilerating/file/download/file_id/9500/) (дата обращения 25.07.2024).
6. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Том 1. – М.: Данвел, 2007. С. 397-402.
7. URL: <https://ubiquiti.ru/bullet.html/> (дата обращения 10.10.2024).

### References

1. Kalitenkov N. V., Polezhaev V. S., Milkin V. I. *Issledovanie klevernyh antenn kak osnovy dlya razrabotki innovacionnyh antennnyh ustrojstv* [Research of clover antennas as a basis for the development of innovative antenna devices]. *Internet-zhurnal «Nacional'noe Dostoyanie»*. [Internet magazine National Dostoye]. 2018. No. 1 (1). URL: <http://nauka21.ru/wp-content/uploads/2018/10/11-2018-article-2.pdf> (accessed 11.05. 2023). (In Russian).

2. Milkin V.I., Kalitenkov N.V. etc. *Antenna krugovoj polyarizacii kvazishuntovoj «klever»* [Circular polarization antenna quasi-shunt “clover”]. Patent № 166256 (RU) H01Q 21/24. Published: 11.20.2016. (In Russian).
3. URL: <https://www.maartenbaert.be/quadcopters/antennas/pagoda-antenna/> (accessed 05.12.2023).
4. Hu Nan. Ultra-wideband discone antenna. Utility model patent No. CN217036005U (China). H01Q (05.01.2015). Beijing Xingyinglian Microwave Technology Co., Ltd. Publ. 07.22.2022. (In Russian).
5. URL: [https://www.ainfoinc.com/amfilerating/file/download/file\\_id/9500/](https://www.ainfoinc.com/amfilerating/file/download/file_id/9500/) (accessed 07.25.2024).
6. Rothhammel K., Krischke A. *Antenny. Tom 1.* [Antennas. Vol. 1]. Moscow. Danvel Publ. 2007. Pp. 397-402. (In Russian).
7. URL: <https://ubiquiti.ru/bullet.html/> (accessed 10.10.2024).

Статья поступила 24 сентября 2024 г.

### Информация об авторах

*Плотников Михаил Юрьевич* – Генеральный директор АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: проектирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: [pmu@niineptun.ru](mailto:pmu@niineptun.ru)

*Исламов Альберт Ильдарович* – Заместитель генерального директора по научно-техническому развитию АО «НИИ «Нептун». Соискатель ученой степени как кандидата технических наук. Область научных интересов: проектирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: [iai@niineptun.ru](mailto:iai@niineptun.ru).

*Ильмер Дмитрий Валерьевич* – Кандидат технических наук. Ведущий инженер АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: проектирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96 доб. 224. E-mail: [ilm@niineptun.ru](mailto:ilm@niineptun.ru).

*Шаповалов Фёдор Александрович* – Инженер 2 категории АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: проектирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96 доб. 180. E-mail: [shapovalovf99@yandex.ru](mailto:shapovalovf99@yandex.ru).

*Трапезников Роман Викторович* – Начальник конструкторского отдела – главный конструктор АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: конструирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96 доб. 316. E-mail: [trv@niineptun.ru](mailto:trv@niineptun.ru).

*Ахмедова Исалай Магомедовна* – Инженер-конструктор АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: конструирование систем телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96 доб. 134. E-mail: [nko@niineptun.ru](mailto:nko@niineptun.ru).

Адрес: 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, В.О. 7-я линия, д. 80, корп. 1, лит. А.

### Development of an omnidirectional broadband wi-fi antenna for use on unmanned aerial vehicles

M. Y. Plotnikov, A. I. Islamov, D. V. Ilmer,  
F. A. Shapovalov, R. V. Trapeznikov, I. M. Akhmedova

**Annotation. Introduction:** currently, at the time of the rapid development of unmanned aviation, especially in the context of its increasing importance for use in a special military operation, the topic of ensuring sustainable control of unmanned aerial vehicles, including in the conditions of electronic countermeasures, has become relevant. One of the ways to ensure the stability of control channels, telemetry and feedback in the conditions of electronic countermeasures is the use of non-standard radio frequencies or the possibility of detuning from interference in a wide frequency band. Therefore, the main new requirement for omnidirectional antennas for unmanned aerial vehicles is to ensure operation in a wide operating frequency band of at least several GHz. **The purpose of the work** is to highlight the results of the design and creation of an omnidirectional broadband antenna for use on unmanned aerial vehicles in accordance with the requirements for weight and size characteristics from large to small

classes and to provide omnidirectional reception and transmission of digital data in a broadband wi-fi channel with land, sea or air control points. **Methods used:** patent search, modeling by performing calculations in the "CST MICROWAVE STUDIO" program (numerical modeling of high-frequency devices), design development for unmanned all-weather design, conducting experimental tests. **The result:** consists in the development of working design documentation for the optimal configuration of an omnidirectional broadband antenna for use on an unmanned aerial vehicle made of domestic materials and components, as well as in positive evaluations and test conclusions of the prototype. **Practical significance:** the development and commissioning of mass production will solve the issue of equipping unmanned aerial vehicles of various classes with domestic broadband antennas. The developed antenna can be used in wi-fi systems for various purposes, for example, for distributing 2G, 3G, 5G, 7G networks from routers in apartments and houses, including using mobile devices such as Bullet from Ubiquiti Networks and similar, in any robotic complexes, for measuring and testing Wi-Fi networks and other applications in the frequency range from 1.7 to 10 GHz.

**Keywords:** antenna, unmanned aerial vehicle, directional pattern, gain factor, voltage standing wave coefficient, design, bandwidth of operating frequencies.

### Information about Authors

*Plotnikov Mikhail Yuryevich* – General Director of JSC "Research Institute "Neptune". Research interests: design of telecommunication systems. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: pmy@niineptun.ru.

*Islamov Albert Ildarovich* – Deputy General Director for Scientific and Technical Development of JSC "Research Institute "Neptune". Applicant of the academic degree of Candidate of Technical Sciences. Research interests: design of telecommunication systems. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: psa@niineptun.ru.

*Ilmer Dmitry Valerievich* – Candidate of Technical Sciences. Lead Engineer of JSC "Research Institute "Neptune". Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 224. E-mail: ilm@niineptun.ru.

*Shapovalov Fedor Aleksandrovich* – Engineer of the 2nd category of JSC "Research Institute "Neptune". Research interests: design of telecommunication systems. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru.

*Trapeznikov Roman Viktorovich* – Head of the Design Department – Chief Designer of JSC "Research Institute "Neptune". Research interests: design of telecommunication systems. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 316. E-mail: trv@niineptun.ru.

*Akhmedova Isalai Magomedovna* – Design Engineer of JSC "Research Institute "Neptune". Research interests: design of telecommunication systems. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 134. E-mail: nko@niineptun.ru.

Address: 199178, Russia, St. Petersburg, V.O. 7th line, d. 80, corps. 1, lit. A.

### Библиографическая ссылка на статью:

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А., Трапезников Р. В., Ахмедова И. М. Разработка всенаправленной широкополосной wi-fi антенны в целях использования на беспилотных летательных аппаратах // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 74-87. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-74-87.

### Reference for citation:

Plotnikov M. Y., Islamov A. I., Ilmer D. V., Shapovalov F. A., Trapeznikov R. V., Akhmedova I. M. Development of an omnidirectional broadband wi-fi antenna for use on unmanned aerial vehicles Means of Communication Equipment 2024. № 3 (167). С. 74-87. (In Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-74-87

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

УДК 004.94(07)

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-88-98

**Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов  
из текстов на естественном языке**

Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Васильев Н. В.

**Аннотация.** *Актуальность:* в современной индустрии программного обеспечения формализация требований технического задания часто выполняется на графических языках моделирования. Этот подход обеспечивает высокоуровневое представление логики разрабатываемых средств автоматизации и возможность задания более четких постановок, уменьшая неоднозначность при трактовке требований. Переход от вербального описания к формализованному в настоящее время осуществляется силами бизнес-аналитиков, в обязанности которых входит анкетирование участников автоматизации, изучение нормативно-справочной базы заказчика, разработка и согласование с заказчиком формируемых постановок задач. Большой объем текстовой информации (регламентов работы, технических заданий, интервью с экспертами) создает у бизнес-аналитиков высокую нагрузку. Это, вместе с необходимостью согласования формальных постановок с заказчиком и программистами сказывается на сроках сдачи проекта. **Целью** настоящего исследования является повышение эффективности труда бизнес-аналитика за счет разработки подхода к выявлению моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке. **Методы** – выходом из сложившейся ситуации может быть применение для автоматизации труда бизнес-аналитиков в части изучения массивов текстовых данных методов обработки естественного языка. **Научная новизна** предложенного подхода состоит в автоматизации основных этапов создания бизнес-процессов (выявление действий, актеров, потока управления, объектов), расширении и спецификации набора правил известных из проанализированных англоязычных источников правилами анализа историй на русском языке и реализацией подхода семантической унификации действий для реализации ИЛИ - слияний. **Практическая значимость** исследования обуславливается реализованным прототипом модуля анализа процессов, реализующего предложенный подход с последующей экспериментальной его оценкой на тестовом наборе пользовательских историй. В работе решаются следующие задачи: анализ ручного метода выявления бизнес-процессов из пользовательских историй, анализ подходов к автоматизации выявления элементов процессов из текстов на естественном языке, разработка подхода к выявлению элементов бизнес-процесса (действий, роли, шлюзы, объекты) на основании методов обработки естественного языка, экспериментальное исследование предложенного подхода. Для достижения поставленных задач в работе используется аппарат дискретной математики, прикладной лингвистики, продукционных систем и нейронных сетей.

**Ключевые слова:** бизнес-процесс, морфологическое дерево, нейронные сети, обработка естественного языка, шлюзы бизнес-процессов,

**Введение**

Текущий этап развития информационных систем [1] говорит о смещении парадигмы с данных на процессы. Центральной идеей, вокруг которой строится автоматизация, становится не онтологическая сущностная модель, а множество бизнес-процессов. Этот подход позволяет учесть возможные изменения объекта автоматизации за счет фиксации не конкретных структурных свойств, а целей существования учреждения (как правило, получение прибыли) и способов их достижения. Наиболее известным примером «шаблонной» процессной модели является *TeleManagement Forum eTOM* – модель бизнес-процессов предприятий электросвязи, которая описывает процесс управления не от устройства (как в известной ранее модели *TMN*), а от услуги, предоставляемой конечному потребителю.

В основе процессной технологии лежит автоматизация и контроль последовательностей выполняемых сотрудниками операций. Быстрая интеграция работы разнородных информационных систем и сотрудников из различных подразделений в единый бизнес-процесс позволяет упорядочить взаимодействие и добиться результата за короткий промежуток времени, что является одним из серьезных преимуществ подхода. Другим преимуществом является возможность выполнения множества функций одним работником с меньшей квалификацией.

В настоящее время разработка бизнес-процессов осуществляется бизнес-аналитиками посредством формализации нормативных документов и опроса сотрудников на рабочих местах. Полученные результаты оформляются в виде сценариев (пользовательских историй). Затем указанные сценарии формализуются на одном из специализированных языков описания бизнес-процессов (*BPMN*, *IDEF*). Полученное описание загружается в систему управления бизнес-процессами или служит основой для разработки программных сервисов. Если в эксплуатации процесс не удовлетворяет запросам автоматизации, в него вносятся изменения, после чего вновь происходит развертывание и тестирование. Из этого следует, что формализация пользовательских историй является весьма трудоемкой работой, требующей высокой концентрации внимания и должной квалификации бизнес-аналитиков. Помимо простого выделения последовательностей выполняемых операций требуется объединение схожих по смыслу операций в классы и формализация процесса в терминах этих классов. Это обеспечит с одной стороны минимизацию базовых средств автоматизации отдельных операций (сервисов), а с другой стороны будет обеспечивать более долгий жизненный цикл процесса.

В методике создания процессов на основании текстовых сценариев можно выделить несколько этапов [2]:

**Этап 1. Определение границ процесса** подразумевает выявление событий, которые отвечают за запуск процессов и определяют возможные результаты процесса.

**Этап 2. Определение действий процесса** основывается на определении элементарных операций, которые задействованы в процессе.

**Этап 3. Определение ресурсов и порядка передачи управления** предполагает выявление основных участников процесса (компании, отделы и другие зоны ответственности), т. е. роли процесса, отображаемые на схеме в виде дорожек, а также смену исполнителей при выполнении процесса.

**Этап 4. Определение потока управления** включает в себя определение порядка выполнения действий, их возможного параллельного, условного или циклического выполнения.

**Этап 5. Определение дополнительных элементов** является этапом расширения полученной модели при помощи добавления в процесс моделей объектов, над которыми производятся элементарные операции (например, изделия, документы и пр.).

В работе при заданных пользовательской историей границах процесса (этап 1) предпринята попытка автоматизации этапов 2-5 за счет применения методов обработки естественного языка. В работе для русскоязычных пользовательских историй развивается предложенный в англоязычных источниках [3-11] подход на основе правил выделения элементов из дерева, построенного на основе формируемой автоматически грамматики зависимостей. Для смысловой унификации элементов используется критерий минимального косинусного расстояния между представляющими их векторами, полученными при помощи модели *Bert*. Работа состоит из введения, трех разделов и заключения.

В разделе 2 приводится краткая характеристика существующих подходов (англоязычных) по использованию средств обработки естественного языка для выделения элементов описания бизнес-процессов, а также производится сравнение методологий по следующим критериям, приведенным в работе [11]: подход, на котором основан метод,

стратегия извлечения элементов бизнес-процесса, степень автоматизации (необходимости действий со стороны пользователя), структура входных данных, а также выходные данные (полученные в результате применения подхода).

В разделе 3 предложен подход к выделению действий, шлюзов, ресурсов и модели потока выполнения бизнес-процесса на основе средств обработки естественного языка.

В разделе 4 приводятся результаты экспериментального исследования предложенного подхода к анализу сценариев из сформированного тестового набора.

## **1. Анализ существующих методов автоматизации процессов выявления**

Проведенный анализ существующих источников [3-11] позволяет заключить о наличии двух основных групп методов выделения элементов бизнес-процессов из пользовательских историй:

- одноэтапные методы, реализующие непосредственное отображение текста в элементы бизнес-процесса за счет обнаружения в тексте «характерных шаблонов» элементов;
- двухэтапные методы, оперирующие промежуточным представлением, получаемым в том числе на основе некоторого набора текстов (полученному, например от нескольких экспертов).

### **1.1. Одноэтапные методы**

Первая группа подходов предполагает представление модели процесса с помощью функции. Данная группа представлена работами [3-6]. Условно, указанную группу можно разделить на три подгруппы:

**1) Реконструкция модели процесса с использованием обратной связи от пользователей [4].** В данном случае разработка и внедрение процессов ведется на основе заранее подготовленных правил (по схеме «Если..., то ...»), охватывающих те или иные элементы процесса. Правила сопоставляют элементы схемы процесса с соответствующими текстовыми фрагментами. Когда на вход подается предложение из пользовательской истории, происходит проверка на наличие фрагментов из правил сформированного набора. В случае отсутствия правил обработки фрагмента инициируется запрос на обратную связь от пользователя для их создания. Процесс ввода дополнительных правил продолжается до достижения системой возможности обработки всего корпуса пользовательских историй. Данная подгруппа, очевидно, обеспечивает формализацию взаимодействия бизнес-аналитика с относительно неизменной группой экспертов в некоторой предметной области.

**2) Использование моделей глубокого обучения для анализа текстов на естественном языке [6].** В подходе применяются рекуррентные нейронные сети с двунаправленной долговременной кратковременной памятью, кодирующие описания процессов в древовидные структуры. Упорядоченные нейроны обеспечивают моделирование пар зависимостей в рамках модели *seq2seq* (архитектура нейронной сети, которая используется для преобразования одной последовательности в другую). Целевой функцией при этом является максимизация вероятности появления предложения на основе предыдущего контекста.

**3) Использование NLP-конвейеров для решения задач выявления элементов диаграммы модели процесса [3, 5].** Методы данной подгруппы основаны на том, что при анализе семантики определяются действия и их взаимосвязи в тексте. Предполагается прохождение трех ключевых этапов: лингвистическая обработка, извлечение действий и формирование ограничений. Данный подход выделяется своей стабильностью в виде наличия строго структурированных правил извлечения, а также использованием существующих инструментов для анализа зависимостей, что решает проблему постоянного обучения модели. Основной сложностью метода является создание универсальных правил, способных охватывать как можно большее количество элементов процесса.

## 1.2. Двухэтапные методы

**Вторая** подгруппа представлена методами [7–9], состоящими из функции извлечения элементов процесса из текста, формирующей промежуточное представление, и следующей за ней функцией построения диаграммы модели процесса.

**1) Построение модели на основе усредненного описания** [7]. требует большого набора пользовательских историй. Подход заключается в использовании механизмов анализа текста, поиска, извлечения информации и методов обработки естественного языка для выделения обобщенных контекстуальных элементов из пользовательских историй. Подход предполагает наличие трех основных этапов: формирование корпуса пользовательских историй и их группировка, извлечение элементов диаграммы модели процесса из историй, принадлежащих к тому же кластеру, генерация нескольких альтернативных моделей процессов, на основе которых бизнес-аналитик формирует итоговый бизнес-процесс.

**2) Анализ пользовательских историй на основе онтологии** [8-9]. Подход предполагает наличие следующих этапов: лингвистический анализ (идентификация сущностей и генерация зависимостей предложений), разбиение на части (действия), извлечение онтологии (процесс извлечения цепочек символов и отображение действий) и окончательная генерация модели процесса *BPMN*. Данная методология эффективна в случае полного соответствия описаний вариантов использования заданным шаблонам.

Таблица 1 – Характеристики методологий извлечения элементов процесса

Метод	Стратегия извлечения элементов	Степень автоматизации	Структура входных данных	Формат вывода
Анализ на основе обратной связи от пользователей	Правила на основе грамматических связей в тексте	Полуавтоматическая	Неструктурированный текст	<i>BPMN</i> -диаграмма
Использование <i>NLP</i> -конвейеров	Шаблоны и правила на основе грамматических связей в тексте	Автоматическая	Неструктурированный текст	Описание на языке <i>Declare</i>
Анализ на основе глубоких нейросетевых моделей	Нейронная сеть	Автоматическая	Структурированный текст	<i>BPMN</i> -диаграмма
Анализ на основе усредненного описания	Шаблоны и правила на основе грамматических связей в тексте	Полуавтоматическая	Неструктурированный текст	<i>BPMN</i> -диаграмма
Онтологический подход	Шаблоны	Автоматическая	Частично структурированный текст	<i>BPMN</i> -диаграмма

В рамках данной работы для извлечения процессов из текстового описания выбран подход правил на основе грамматики зависимостей [3] и вывод результата их обработки в виде *BPMN*-диаграммы. Выбор данного метода обусловлен его результативностью в направлении выявления как можно большего количества типов элементов, а также способностью справляться с неструктурированными входными данными. Другой немаловажной особенностью данного метода является большая доступность исходных данных (неструктурированных одиночных историй), что упрощает предварительную работу бизнес-аналитика.

## 2. Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке

Схема предложенного подхода к выделению элементов описания процессов из пользовательских историй представлена на рис. 1. В качестве входных данных подход использует единичную пользовательскую историю на неструктурированном (естественном языке), имеющую достаточную детализацию для моделирования бизнес-процессов.

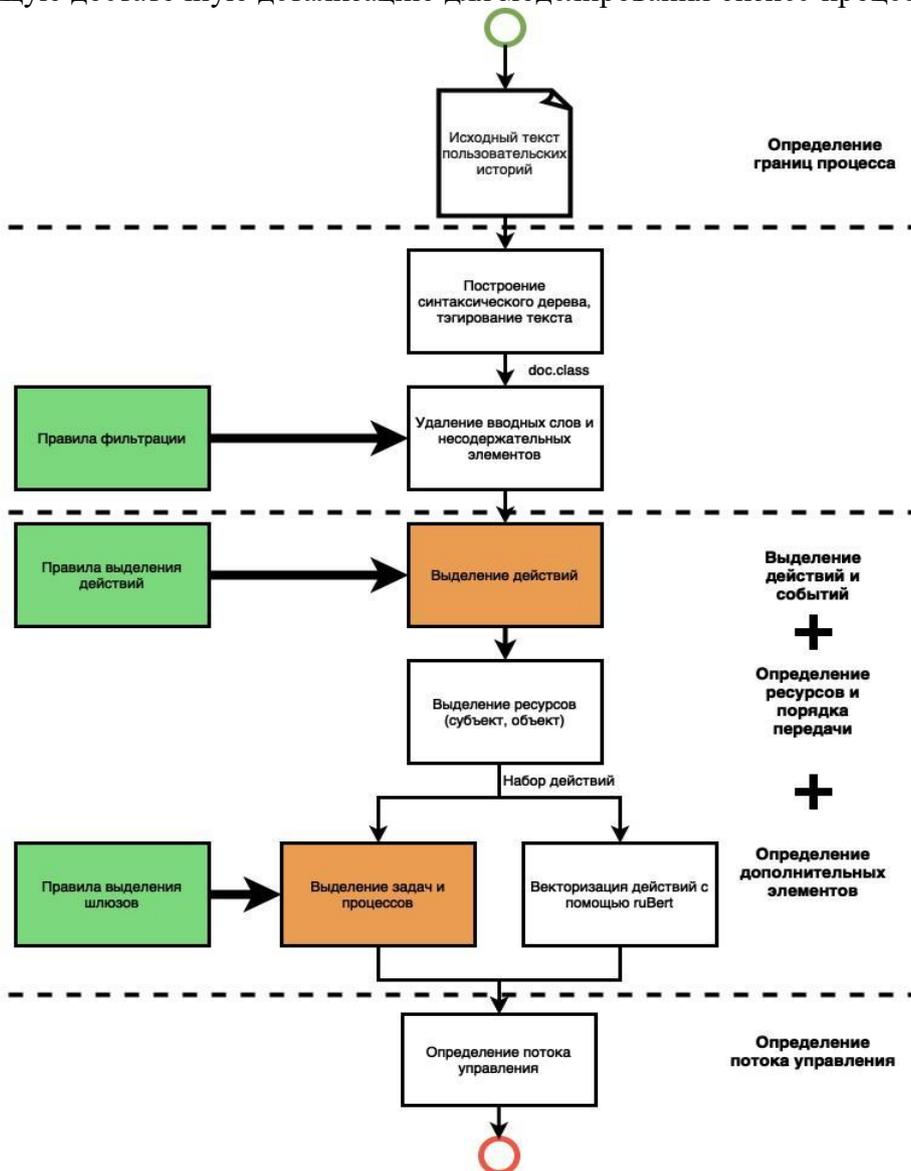


Рис. 1. Структурная схема подхода

Первым шагом реконструкции элементов бизнес-процесса является построение синтаксического (морфологического) дерева пользовательской истории. Предлагаемый подход использует синтаксический анализ на основе грамматики зависимостей, предполагающей разметку (тэги́рование) каждого слова текста частью речи (существительное, глагол, наречие, местоимение и т. д.) и роль слова в смысловой тройке «субъект-действие-объект». В современных средствах обработки естественного языка данная задача решается посредством использования нейросетевых эмбе́ддингов. На основании построенной грамматики зависимостей производится формирование синтаксического дерева, фрагмент которого показан на рис. 2. Синтаксическое дерево является структурированным представлением грамматической

структуры предложения. Структуру данного дерева определяют узлы (токены), которые представляются в виде слов, фраз, а также связей между словами и фразами.

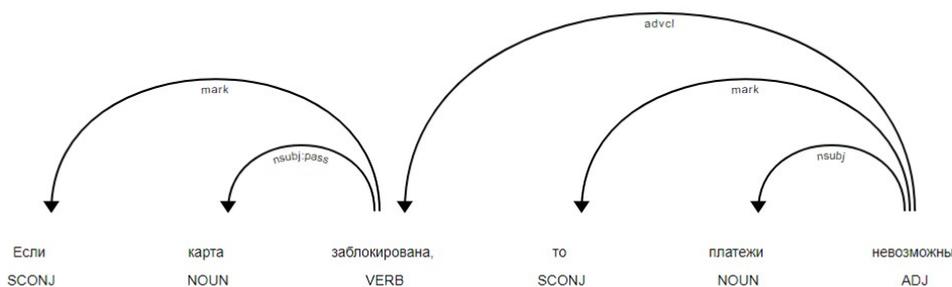


Рис. 2. Пример синтаксического дерева

Каждый токен в дереве также имеет *POS*-тег (лингвистический тег), отражающий его часть речи и морфологические характеристики, *DEP*-тег, отражающий член предложения, а также *LEMMA*-тег, который представляет из себя начальную форму слова, которое принадлежит токену.

Перед процессом извлечения элементов *BPMN*-диаграмм проводится преобразование предложений, полученных в результате описанной ранее обработки текста. Под преобразованием подразумевается удаление лишних словесных конструкций, мешающих визуальному восприятию процессов. К ним можно отнести причастные обороты, конструкции в круглых скобках, вводные слова, а также другие не содержательные элементы.

Механизм извлечения *bpm*-описаний из пользовательских историй основан на разработанном наборе правил или паттернов, позволяющем автоматически извлекать последовательности действий, заданных по заранее определенным шаблонам. Заданные шаблоны впоследствии используются для поиска соответствующих конструкций в предложении. Шаблоны правил для извлечения действий представлены в табл. 2.

Таблица 2 — Шаблоны правил для извлечения действий

Последовательность действий	
Правило	Пример предложения
<субъект> + <глагол> + <объект>	Пользователь переходит на страницу входа в систему
<субъект> + <вспомогательный глагол> + <глагол> + <объект> (в будущем времени)	Пользователь будет вводить пароль для входа в систему
<глагол> + <артикуль> + <объект>	Система завершает этот сеанс
<субъект> + <глагол> + <объект> + <союз> + <глагол> + <объект>	Пользователь завершает сеанс и закрывает приложение.
<объект> + <субъект> + <глагол>	Доступ пользователь получает
<скрытый субъект> + <глагол> + <союз> + <глагол> + <объект>	Нажмите (скрытый субъект «вы») кнопку и введите пароль

После извлечения последовательностей действий производится выделение основных ролей бизнес-процесса (ресурсов). Данный шаг реализуется на основе выделения и семантической унификации троек «субъект-действие-объект». Семантическая унификация реализуется за счет применения нейросети *BERT*, основанной на модели «трансформер», позволяющей учитывать при семантической оценке (векторизации) контекстуальные отношения между словами (или подсловами) в тексте.

Этап выделения модели потока управления сводится к выявлению основных управляющих конструкций – И/ИЛИ шлюзов и блоков циклического поведения.

Механизм выявления шлюзов основывается на поиске ключевых слов или фраз, предшествующих действию, например «Если», «Когда» или «В случае». В след за условием следует задача, которая выполняется в случае его истинности. Количество условий в предложении должно соответствовать количеству решаемых задач первого типа, которые обычно идут после ключевых слов или фраз: «тогда», «то», «в таком случае». После задач первого типа, как правило, идут задачи второго типа, их появлению предшествуют такие фразы как: «в противном случае», «или», «иначе» и так далее.

Шлюзы на BPMN-диаграммах являются элементами моделирования, представляемыми в виде ветвлений или объединений потоков выполнения в зависимости от определенных условий. Правила для извлечения ИЛИ шлюзов представлены в табл. 3.

Таблица 3 — Шаблоны правил для вычисления ИЛИ шлюзов

Шлюзы BPMN-диаграмм	
Правило	Пример предложения
<глагол> + <сигнальное слово> + <субъект> + <объект>	Проверьте, если пользователь ввел правильный пароль
<сигнальное слово> + <условие> + <задача/событие> + <альтернативное сигнальное слово> + <задача/событие>	Если пользователь ввел правильный пароль, то предоставьте доступ к системе, иначе запросите повторный ввод пароля
<задача/событие> + <сигнальное слово> + <условие>	Завершите сеанс, если пользователь нажал кнопку выхода
<задача> + <сигнальное слово> + <условие> + <альтернативное сигнальное слово> + <задача>	Завершите сеанс, если пользователь подтвердил выход, иначе продолжите работу в системе

Для идентификации циклических структур используется семантическая унификация в модели обнаруженных на предыдущих этапах действий и добавление между такими элементами модели дополнительных связей. Разработанный подход, как и в случае ролей, базируется на основе векторизации обнаруженных действий средствами глубокой нейронной сети *BERT* и вычисления их сходства путем определения косинусного сходства.

Конечным этапом реконструкции бизнес-процессов в соответствии с выбранной методикой является определение потока управления, включающее в себя порядок выполнения действий и событий, а также добавление шлюзов и циклических структур.

### 3. Экспериментальная оценка подхода

В соответствии с приведенной во «Введении» методикой моделирования процессов проведем оценку качества автоматической реконструкции элементов на каждом этапе. Для реализации предложенного подхода была использована библиотека *Spacy* [10] с расширениями для русского языка, а также реализация глубокой нейросетевой модели *BERT (ruBert DeepPavlov)* для корпуса русскоязычных текстов [11].

Считая границы процесса заданными, оценим качество выделения действий; шлюзов; субъектов и объектов; пулов и дорожек. Экспериментальное исследование осуществлялось путем автоматического анализа 5 коротких (до 300 слов) текстовых сценариев с последующим ручным подсчетом. Инструментами для проведения исследования выбраны язык *Python* и библиотеки *SpaCy* [11], *DeepPavlov* [12]. В *SpaCy* для определения набора зависимостей, а также главного слова в предложении используют синтаксическое дерево.

Результаты оценок на основании предложенных критериев приведены на рис. 3.

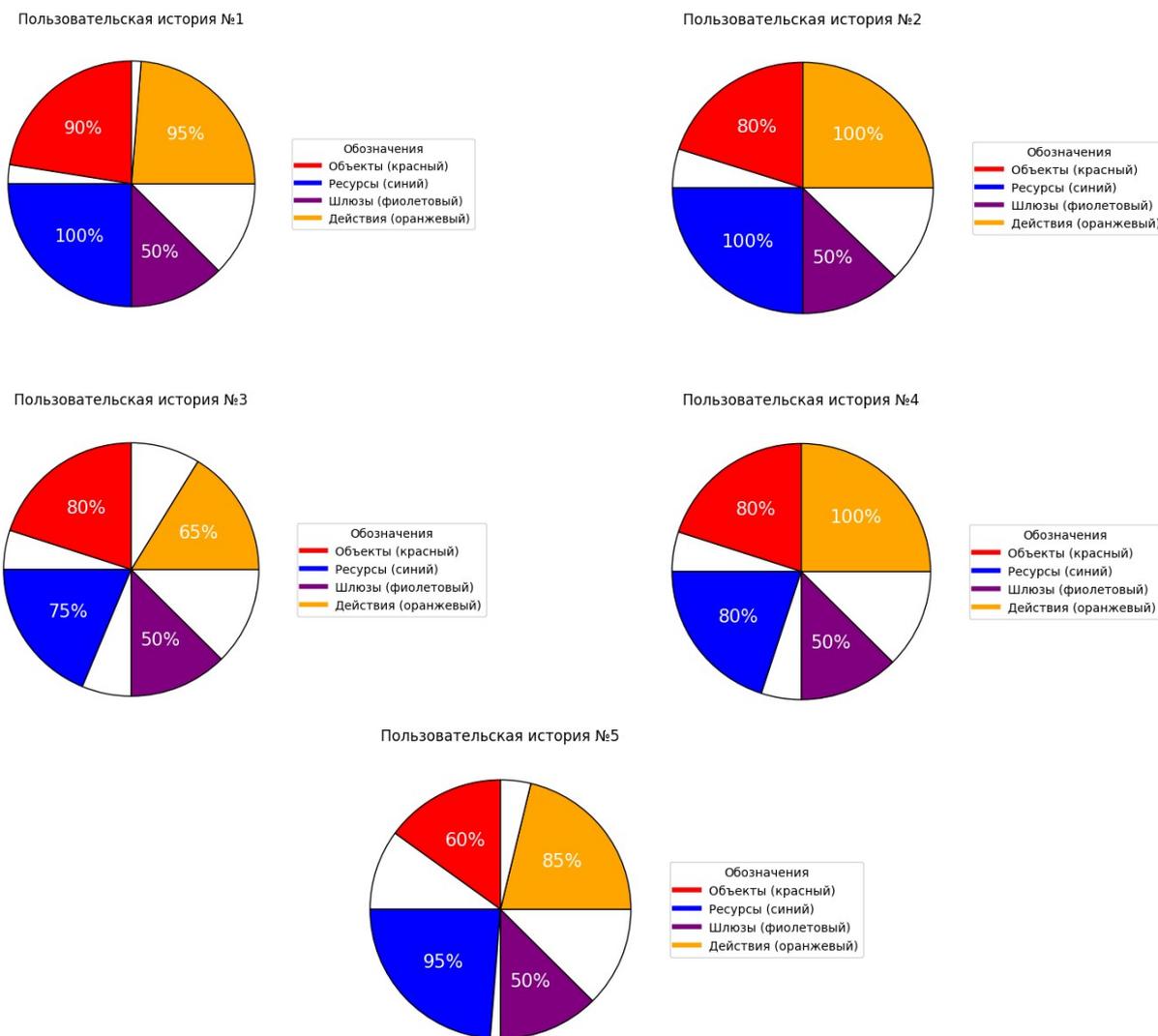


Рис. 3. Степень реконструкции элементов тестовых пользовательских историй

Из приведенных графиков рис. 3 следует, что предложенный в работе подход, несмотря на выявленные недостатки в части неточности определения шлюзов 50 % и объектов процессов (от 60 % до 90 %) обладает потенциалом для практического использования в части выявления действий (точность около 89 %) и ресурсов (около 90 %). Низкий процент выделения шлюзов на данном этапе работы можно объяснить отсутствием реализации функционала в части выявления И шлюзов. В случае определения объектов процессов, не самые высокие проценты получены в результате дублирования объектов, а также выделения ложных экземпляров.

### Выводы. Обсуждения

Проведенный в разделе 2 анализ англоязычных источников показал перспективность прямых конвейерных методов обработки текста для выделения основных элементов бизнес-процессов (действий, ролей, шлюзов) по причине наименьшей требуемой подготовки исходных данных для автоматизированного анализа (одиночные истории на естественном языке). Проведенный анализ также показал отсутствие каких бы то ни было разработок в данной области на русском языке.

Предложенный в разделе 3 подход к выделению элементов бизнес-процесса позволяет осуществить автоматизацию этапов выделения действий и шлюзов. В отличие от исходного (англоязычного) метода [3] была произведена доработка набора правил, учитывающего особенности грамматического строя предложений на русском языке в части обнаружения сигнальных слов и переработки опознавания артиклей, а также добавлены этапы выделения ролей (субъектов) и объектов. Исходный метод также был расширен этапом семантической унификации действий, ролей и объектов, что позволило выявлять циклические последовательности действий.

Экспериментальное исследование предложенного подхода на основе 5 пользовательских историй показало достаточно высокую эффективность в части выделения действий (до 90 %), ИЛИ – шлюзов (до 50 %) и ролей (до 90 %).

Дальнейшие улучшения авторы связывают с расширением набора правил и более точной семантической оценкой, например, в части правил выделения И – шлюзов, модернизации функционала определения объектов процесса, а также в части построения полноценной *brtn* диаграммы на основании выявленных элементов процессов. Таким образом, планируется полностью охватить каждый из представленных этапов реконструкции бизнес-процессов.

### Список литературы

1. Аалст Вил ван дер Управление потоками работ: модели, методы и системы/Вил ван дер Аалст, Кейс ван Хей; пер.с англ.: В. А. Башкин , И. А. Ломазова; ред. И. А. Ломазова. – 2007 Ferreira, R. C. B. and Thom, L. H. (2016).
2. Fundamentals of Business Process Management / M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, Hajo A. Reijers. NY.: Springer, 2013. 550 p.
3. An approach to generate process-oriented text from natural language. page 77. XII Brazilian Symposium on Information Systems.
4. Ackermann L. and Volz B. model [NL] generation: natural language model extraction. In Proceedings of the 2013 ACM workshop on Domain-specific modeling, DSM@SPLASH 2013, p. 45–50. ACM, 2013.doi: 10.1145/2541928.2541937.
5. H. van der Aa, C. Di Ciccio, H. Leopold, and H. A. Reijers. Extracting declarative process models from natural language. In Advanced Information Systems Engineering - 31st International Conference, CaiSE 2019, Proceedings, volume 11483 of Lecture Notes in Computer Science, p. 365–382. Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-21290-2\_23.
6. Han X., Hu L., Mei L., Dang Y., Agarwal S., Zhou X., and Hu P. A-BPS: automatic business process discovery service using ordered neurons LSTM. In 2020 IEEE International Conference on Web Services, ICWS 2020, p. 428–432. IEEE, 2020. doi: 10.1109/ICWS49710.2020.00063.
7. De J. C., Gonçalves A. R., Santoro F. M., and Baião F. A.. Let Me Tell You a Story – On How to Build Process Models. J. UCS, 17(2):276–295, 2011. doi: 10.3217/jucs-017-02-0276.
8. Sawant K. P., Roy S., Sripathi S., Plesse F., and Sajeev A. S. M. Deriving requirements model from textual use cases. In 36th International Conference on Software Engineering, ICSE '14, Companion Proceedings., p. 235–244. ACM, 2014. doi: 10.1145/2591062.2591193.
9. Friedrich F., Mendling J., and Puhmann F. Process Model Generation from Natural Language Text. In Advanced Information Systems Engineering – 23rd International Conference, CAiSE 2011. Proceedings, volume 6741 of Lecture Notes in Computer Science, p. 482–496. Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-21640-4\_36.
10. Epure E. V., Martín-Rodilla P., Hug C., Deneckère R., and Salinesi C. Automatic process model discovery from textual methodologies. In 9th IEEE International Conference on Research Challenges in Information Science, RCIS 2015, p. 19–30. IEEE, 2015. doi: 10.1109/RCIS.2015.7128860.
11. Документация SpaCy – <https://spacy.io/api/doc>
12. Документация DeepPavlov – <https://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/models/bert.html>

### References

1. Workflow Management – Models, Methods and Systems: Wil van der Aalst, Kees van Hee. MITPress, 2004.
2. An approach to generate process-oriented text from natural language. page 77. XII Brazilian Symposium on Information Systems.
3. Fundamentals of Business Process Management / M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, Hajo A. Reijers. NY.: Springer, 2013. 550 p.
4. Ackermann L. and Volz B. model [NL] generation: natural language model extraction. In Proceedings of the 2013 ACM workshop on Domain-specific modeling, DSM@SPLASH 2013, pages 45–50. ACM, 2013. doi: 10.1145/2541928.2541937.
5. Van der Aa H., Cicco C. Di., Leopold H., and Reijers H. A. Extracting declarative process models from natural language. In Advanced Information Systems Engineering – 31st International Conference, CaiSE 2019, Proceedings, volume 11483 of Lecture Notes in Computer Science, pages 365–382. Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-21290-2\_23.
6. Han X., Hu L., Mei L., Dang Y., Agarwal S., Zhou X., and Hu P. A-BPS: automatic business process discovery service using ordered neurons LSTM. In 2020 IEEE International Conference on Web Services, ICWS 2020, pages 428–432. IEEE, 2020. doi: 10.1109/ICWS49710.2020.00063.
7. De J. C., Gonçalves A. R., Santoro F. M., and Baião F. A. Let Me Tell You a Story – On How to Build Process Models. J. UCS, 17(2):276–295, 2011. doi: 10.3217/jucs-017-02-0276.
8. Sawant K. P., Roy S., Sripathi S., Plesse F., and Sajeew A. S. M. Deriving requirements model from textual use cases. In 36th International Conference on Software Engineering, ICSE '14, Companion Proceedings., pages 235–244. ACM, 2014. doi: 10.1145/2591062.2591193.
9. Friedrich F., Mendling J., and Puhmann F.. Process Model Generation from Natural Language Text. In Advanced Information Systems Engineering – 23rd International Conference, CAiSE 2011. Proceedings, volume 6741 of Lecture Notes in Computer Science, pages 482–496. Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-21640-4\_36.
10. Epure E. V., Martín-Rodilla P., Hug C., Deneckère R., and Salinesi C. Automatic process model discovery from textual methodologies. In 9th IEEE International Conference on Research Challenges in Information Science, RCIS 2015, pages 19–30. IEEE, 2015. doi: 10.1109/RCIS.2015.7128860.
11. SpaCy documentation - <https://spacy.io/api/doc>
12. DeepPavlov documentation - <https://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/models/bert.html>

Статья поступила 16 сентября 2024 г.

### Информация об авторах

*Буравлев Андрей Сергеевич* – студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: методы обработки естественного языка. E-mail: [asburavlev@stud.etu.ru](mailto:asburavlev@stud.etu.ru). 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф.

*Демидова Дарья Евгеньевна* — студентка Национального исследовательского университета ИТМО. Область научных интересов: методы обработки естественного языка. E-mail: [daryademiddovaa@yandex.ru](mailto:daryademiddovaa@yandex.ru). Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

*Васильев Николай Владимирович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: методы обработки естественного языка, анализ бизнес-процессов. Тел.: +7-911-120-26-22. E-mail: [gandvik1984@gmail.com](mailto:gandvik1984@gmail.com). Адрес: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф.

## Approach to Identification of Elements of Business Process Models from Natural Language Texts

A. S. Buravlev, D. E. Demidova, N. V. Vasiliev

**Annotation.** In modern software industry formalization of requirements of a technical specification is often performed in graphical modeling languages. This approach provides high-level modeling of the logic of developed automation tools and the possibility to set clearer problem statements, reducing ambiguity in requirements interpretation. Transition from verbal description to formalized description is currently carried out by business analysts whose tasks include surveying automation participants, studying the regulatory and reference base of the customer, developing and coordinating with the customer the formed task statements. A large amount of textual information (work regulations, technical tasks, interviews with experts) creates a high load on business analysts. This, together with the need to coordinate formal statements with the customer and programmers slows down their work. The way out of this situation can be the use of natural language processing methods to automate the labor of business analysts in terms of identifying elements of business processes from arrays of text data. **The purpose** of the research is to increase the efficiency of business analyst's labor by developing an approach to identifying business process models from natural language texts. **Scientific novelty** of the proposed approach consists in the automation of the main stages of business process creation (identification of actions, actors, control flow, objects), expansion and specification of the set of rules known from the analyzed English-language sources by the rules of analysis of stories in Russian and implementation of the approach of semantic unification of actions for the implementation of OR-mergers. **The practical** significance of the research is conditioned by the implemented prototype of the process analysis module, which implements the proposed approach with its subsequent experimental evaluation on a test set of user stories. The following tasks are solved in this paper: analysis of the manual method of identifying business processes from user stories, analysis of approaches to automating the identification of process elements from natural language texts, development of an approach to identifying business process elements (actions, roles, gateways, objects) based on natural language processing methods, experimental study of the proposed approach. To achieve the set tasks, the paper uses the apparatus of discrete mathematics, applied linguistics, production systems, neural networks.

**Keywords:** business process, natural language processing, business process gateways, morphological tree, neural networks

### Information about the authors

*Andrey Sergeyevich Buravlev* – is a student of V. I. Ulyanov (Lenin) St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”. Research interests: methods of natural language processing. E-mail: asburavlev@stud.etu.ru. Address: 197022, St. Petersburg, Professor Popov Street, 5, lit. F.

*Darya Evgenievna Demidova* – is a student of the National Research University ITMO. Research interests: methods of natural language processing. E-mail: daryademiddovaa@yandex.ru. Address: 197101, St. Petersburg, Kronverksky pr. 49, lit. A.

*Vasiliev Nikolay Vladimirovich* – PhD, Docent. Associate Professor of the Department of Information Systems, St. Petersburg State Electrotechnical University LETI. Research interests: methods of natural language processing. Tel.: +7-911-120-26-22. E-mail: gandvik1984@gmail.com. Address: 197022, St. Petersburg, Professor Popov Street, 5, lit. F.

### Библиографическая ссылка на статью:

Буравлев А. С., Демидова Д. Е., Васильев Н. В. Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке // Техника средств связи. 2024. № 3 (167). С. 88-98. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-88-98

### Reference for citation:

Buravlev A. S., Demidova D. E., Vasiliev N. V. Approach to Identification of Elements of Business Process Models from Natural Language Texts. Means of Communication Equipment. 2024. № 3 (167). Pp. 88-98. (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2024-3-88-98

## Решением ВАК № 222-р от 10 июня 2024 года

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 (Перечень\*) и рекомендован Высшей аттестационной комиссией для публикаций основных результатов по научным специальностям\*\*:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки);

2.2.14. Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки);

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

\* В Перечне от 10 июня 2024 г. № 86.

\*\* В соответствии с номенклатурой, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. N 118 и рекомендацией Президиума Высшей аттестационной комиссии N 15/1-нс от 28 мая 2021 г.

### Индексы ГРНТИ:

20.00.00 Информатика.

28.00.00 Кибернетика.

45.00.00 Электротехника.

47.00.00 Электроника. Радиотехника.

47.05.00 Теоретическая радиотехника.

47.41.00 Радиоэлектронные схемы.

47.51.39 Синтез и обработка телевизионных сигналов.

49.00.00 Связь.

49.03.05 Теория обработки сигналов в системах связи.

49.27.00 Система передачи.

49.31.00 Многоканальная связь.

49.39.00 Телефонная связь и аппаратура.

49.43.00 Радиосвязь и радиовещание.

50.00.00 Автоматика. Вычислительная техника.

49.33.35 Надежность сетей связи и защита информации.

50.37.23 Защита от несанкционированного доступа. Физическая защита информации.

50.41.27 Компьютерные вирусы. Антивирусные программы.

81.93.29 Информационная безопасность. Защита информации