

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

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

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

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

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

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

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

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

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

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Михайлов Р.Л. Череповецкий военный ордена Жукова университет 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, 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.

Odoyevsky 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 всеоюзных 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

АНАЛИЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Яшин А. И., Абрамович А. В. Седьмое поколение беспроводной связи как инфраструктурная техническая основа будущих этапов эволюции цифрового мира	2
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
Одоевский С. М., Симонова К. О., Зизевский В. А. Анализ влияния точности мониторинга параметров сетевого трафика на качество его обслуживания	8
СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ	
Путилин А. Н., Шаптала В. С. Пассивная синхронизация в сетях декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот	20
Иванов Д. В., Путилин А. Н., Сыроветник Д. С., Царик И. В. Программная реализация демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы	28
ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
Закутаев А. А., Емельянов А. В., Широбоков В. В. Модифицированная методика оценивания эффективности функционирования квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сети с учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе	37
ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
Сивинцева О. А. Средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта	47
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
Драгунов М. Ю. Модель линии спутниковой связи с парциальными каналами	57
Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Смолин А. Ю., Яруллин Р. Р. Методы моделирования в создании систем и средств вторичной радиолокации	69
Морозов А. Н. Обобщенная методика исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций	77
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	
Семенов С. С., Косырев А. В., Крачков А. А. Протоколы обмена данными между микроконтроллерами, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре	84
Информация для авторов	94
Список научных статей, опубликованных в журнале «Техника средств связи» в 2024 году	99

CONTENTS

ANALYSIS OF NEW TECHNOLOGIES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF COMMUNICATION EQUIPMENT

Yashin A. I., Abramovich A. V. The seventh generation of wireless communication as an infrastructural technical basis for future stages of the evolution of the digital world	2
CONTROL SYSTEMS	
Odoevsky S. M., Simonova K. O., Zizevsky V. A. Analysis of the impact of the accuracy of monitoring network traffic parameters on the quality of its service	8
COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS	
Putilin A. N., Shaptala V. S. Passive synchronization in decimeter radio networks with pseudo-random switching of operating frequencies	20
Ivanov D. V., Putilin A. N., Syrovetnik D. S., Tsarik I. V. Software implementation of a demodulator of signals of a pulse-phase radio navigation system	28
ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING SYSTEMS	
Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Shirobokov V. V. A modified methodology for evaluating the efficiency of the functioning of quantum-optical devices as part of a distributed terrestrial network, taking into account the energy loss of the signal on the atmospheric route	37
INFORMATION SECURITY ISSUES	
Sivintseva O. A. Means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on Sprott systems	47
MODELING OF COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS	
Dragunov M. Yu. Model of a satellite communication line with partial channels	57
Butkevich Yu. R., Loginov S. S., Smolin A. Yu., Yarulkin R. R. Modeling methods in the creation of secondary radar systems and facilities	69
Morozov A. N. Generalized methodology for the study (evaluation) of the efficiency of the electric power supply system for portable and portable radio stations	77
COMPUTING SYSTEMS	
Semenov S. S., Kosyrev A. V., Krachkov A. A. Data exchange protocols between microcontrollers used in electronic equipment	84

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

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

УДК 621.39

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-2-7

**Седьмое поколение беспроводной связи как инфраструктурная техническая основа
будущих этапов эволюции цифрового мира**

Яшин А. И., Абрамович А. В.

***Аннотация.** В статье с общих позиций рассматриваются основные этапы развития цифрового мира, реализуемого человечеством. Введено и раскрыто содержание нового состояния цифрового мира – «мир желаний», в котором человечеству предопределено решать все более трудные технические и технологические задачи, требующие проникновения в основы построения и функционирования живой материи, ее симбиозных форм и способов существования, включая инфокоммуникационные процессы человеческого общества и природных сообществ, как на макро, так и микро-уровнях. Выдвигается гипотеза о плавном переходе современного киберфизического мира в будущий «мир желаний», который будет формироваться на инфраструктурной технической основе седьмого и последующих поколений беспроводной связи. Такая связь потребует новых прорывных инфокоммуникационных технологий, средств и систем радиосвязи. Перечислены некоторые прикладные направления, которые потребуют разработки значительного числа приложений и облачных сервисов расширенной реальности, которые, вероятно, станут основными для обеспечения кругового обзора, удаленных сервисов с поддержкой дополненной реальности, управления роями технических средств, передачи тактильных ощущений, телемедицины. По мере увеличения количества и популярности данных приложений расширенной реальности, повышения разрешения, размера и частоты кадров, требования к пропускной способности и задержке могут превзойти возможности радиосетей шестого поколения даже с учетом их эволюции, что, по мнению авторов, будут являться отличительными особенностями седьмого и последующих поколений беспроводной связи.*

***Ключевые слова:** беспроводная связь, дополненная реальность, искусственный интеллект, облачный сервис, расширенная реальность, цифровой мир.*

Введение

В настоящее время человеческое общество движется с возрастающей скоростью по эволюционному пути развития живой материи на планете Земля, пытаясь достичь все более сложных форм ее организации, требующих совершенных процессов коммуникации. Процесс нарастания сложности наблюдается как по массе – нарастание численности людей, так и по функциональным изменениям в обществе, которые имеют как планетарный, так и локальный характер. Идут непрерывные процессы структурных и смысловых изменений в человеческом обществе, сопровождаемые многообразием эволюционирующих во времени коммуникационных отношений и связей, как между отдельными людьми, так и их группами, обусловленные перераспределением интеллектуальных и материальных ресурсов.

Динамика и качество этих процессов оказывает все более существенное влияние на скорость трансформации создаваемого человечеством искусственного мира технических систем – цифрового мира. Принципиальным необходимым условием существования такой совместной эволюционной спирали развития является симбиоз физического и цифрового миров. При этом непрерывная практическая реализация процессов совершенствования цифрового мира является залогом выполнения достаточных условий такого симбиоза.

Цифровой мир по сложности и интеллектуальным возможностям становится все более адекватно похожим на мир физический и на данном этапе развития его определяют как киберфизический мир [1], который по своим возможностям закономерно отстает в

своем развитии от мира физического. Наблюдается определенная тенденция (сети 5G, 6G, технологии виртуальной, дополненной и расширенной реальности, искусственный интеллект, биоинженерия и др.) к созданию и совершенствованию этого киберфизического мира, в котором человечество разрабатывает и стремится все больше использовать цифровых двойников физического мира и человеческого общества.

Фактически человечество формирует техническую основу для перехода на следующий этап развития цифрового мира, который условно можно определить как «мир желаний». Технические возможности «мира желаний», как цифрового мира, будут не только обеспечивать существование человека и человеческого общества, а проникнут в самую суть его бытия и начнут существенно влиять на биологические процессы развития, как отдельных людей, так и человеческого общества в целом. Для движения в сторону «мира желаний» человечеству предстоит решать все более трудные технологические и технические задачи, требующие проникновения в основы построения и функционирования живой материи, ее симбиозных форм и способов существования, включая инфокоммуникационные процессы человеческого общества и природных сообществ, как на макро, так и микро-уровнях.

Основная часть

Создание «мира желаний» требует революционных решений во многих областях науки и техники, но в первую очередь опережающего развития беспроводной связи как технической первоосновы создания инфокоммуникационной инфраструктуры киберфизического мира. Для создания такого мира связь должна обеспечивать практическую реализацию инфокоммуникаций в n -мерных пространствах взаимодействия разных технических устройств, систем по функционалу и массогабаритам повторяющим (или превосходящим) физический мир.

Необходимо отметить, что в массовом проявлении человечеству данного эффекта до сих пор достичь не удалось, несмотря на значительные успехи, достигнутые в реализации коммуникационной инфраструктуры, на базе сетей всех поколений, вплоть до сетей пятого поколения.

Впервые в беспроводной связи шестого поколения ставится революционная задача перехода к обеспечению инфокоммуникаций не только на макро, но и на микро-уровне массового взаимодействия технических систем, обеспечивающих автоматический сбор, обработку, передачу, хранение и использование информации в человеческом мире в реальном масштабе времени. Причем технические решения реализуются в массогабаритных параметрах близких к природным, позволяющим начать создавать киберфизический мир очень похожим на физический мир.

Принципиальной особенностью концепции построения такой связи [2], отличающей ее от всех предыдущих поколений, является использование всеохватывающего искусственного интеллекта (ИИ) как связующего звена между физическим и цифровым мирами. Фактически делается попытка поэтапного создания беспроводной связной инфраструктурной основы для построения глобально распределенной системы ИИ в интересах человеческого мира.

В случае успешной реализации данного проекта потребуются дальнейшее развитие инфраструктурной технической основы инфокоммуникаций необходимой для эффективного функционирования системы ИИ, которую могут попытаться функционально развить до уровня копирования функциональной деятельности головного мозга человека в локальных и/или глобальных постановках. Техническое решение данной задачи, может являться одной из целей создания сетей седьмого поколения.

Несомненно, переход к сетям седьмого поколения будет происходить постепенно под воздействием необходимости решать множество практических задач, требующих эффективных инфокоммуникационных ресурсов, но не решенных в сетях шестого поколения, например, таких

как новые области применения радиосетей с еще более высокими техническими характеристиками; глобально и локально распределенные системы ИИ, образующие сложно организованные n -мерные системы принятия решений; массовое использование когнитивного радио, например, требующего когнитивных многомерных сетей связи.

В настоящее время активно развиваются прикладные исследования в области создания прорывных технологий, архитектурных решений и средств беспроводной связи, имеющие достаточно хорошую научно-техническую проработку и лабораторные результаты, но не получившие пока массового применения. Перечислим некоторые проблемные вопросы беспроводной связи, решение которых может стать отличительным признаком будущих поколений радиосредств [2, 3].

Продуктивное использование перспективных и прорывных новых технологий в радиосредствах седьмого поколения создаст серьезные проблемы и поднимет фундаментальные вопросы управляемости, безопасности, этики и законности. Расширенное использование ИИ, аналитики больших данных и автономных систем с ИИ обеспечит более широкий доступ к критически важным оперативным данным и знаниям, но с риском нового информационного взрыва. Сама информация (служебная и абонентов разных видов сетей) будет все больше превращаться в поле конкурентных действий и в товар.

Параллельно с этим использование автоматизированных и потенциально автономных систем в различных операциях без участия человека станет более распространенным и, несомненно, повлияет на системы и средства связи, способы их организации и применения.

Несмотря на эти потенциальные инновационные прорывы, эволюционирующее инфокоммуникационное пространство будет сочетать в себе средства связи предыдущих поколений, а также новые средства, приводящие к непредсказуемой активности производительных сил в будущем. Их кооперативное взаимодействие может бросить вызов технологической целостности действий пользователей в глобальном информационном пространстве в силу неравенства технологического потенциала и возможностей различных отраслей техники, а также отдельных стран. Технологические пробелы будут создавать проблемы в области связи, коммуникации и интероперабельности различных систем и радиосетей.

Однако, кроме новых решений на всех уровнях радиосетей, а также решений в области облачных технологий, позволяющих отчасти приблизиться к тем требованиям, которые предъявляют пользовательские услуги к радиосвязи, возникают не менее важные задачи по оперативному изменению логики обработки трафика. В решении задач мониторинга и управления трафиком в радиосредствах шестого поколения предполагается использование технологий ИИ. Потребность во внедрении столь ресурсоемких технологий обработки данных появилась в результате требования к динамичности сетевой инфраструктуры и ее способности адаптироваться к изменениям условий. В настоящее время генерируется множество служебных данных, которые необходимо эффективно обрабатывать, а это становится под силу только технологиям искусственного интеллекта.

Контроль электромагнитного спектра является необходимой предпосылкой для бесконфликтного функционирования сообщества различных радиосетей, либо информационного доминирования в случае решения различных целевых задач. Электромагнитное доминирование – это способность использовать больше спектра, защищать использование своего спектра и препятствовать в использовании спектра другими радиосетями. В будущем беспроводная радиосвязь должна быть более быстрой и надежной, устойчивой к радиоэлектронным атакам, обеспечивая появление безопасного потокового видео.

В результате электромагнитный спектр в отношении своей пропускной способности будет все более перегруженным как коммерческими, так и специальными системами. Использование искусственного интеллекта для поддержки когнитивных сенсоров

(например, когнитивных радаров) и средств связи станет необходимым для предотвращения конфликтов в перегруженном электромагнитном спектре.

В дополнение к средствам безопасности, реализованным в шестом поколении и более ранних поколениях радиосредств, соблюдение конфиденциальности будет критически важным требованием и принципом проектирования сетей седьмого поколения. Обеспечение конфиденциальности во всех аспектах работы сети и использования данных будет иметь исключительное значение. С одной стороны, ключевым требованием к сети является право на доступ к данным, и возникает вопрос, как сетевая архитектура может обеспечить защиту конфиденциальности.

Критически важным в современных условиях является создание системы, способной обнаруживать, оценивать и реагировать на кибер-угрозы намного оперативнее, чем это сможет сделать человек-оператор. Значительная часть программного обеспечения для этих целей должна функционировать автономно для снижения когнитивной нагрузки на оператора. Эти системы будут оценивать и интерпретировать огромное количество сенсорных и разведывательных данных. Они должны обладать способностью принимать самостоятельные решения и действовать быстро, а также иметь возможность работать в содружестве с людьми.

Кибер- и инфокоммуникационное пространство в условиях конфликта систем должны обнаруживать, оценивать и реагировать на угрозы задолго до того, как люди смогут понять ситуацию. Можно ожидать, что сети и информационные системы будут конфигурироваться, обслуживаться и защищаться автономными агентами с поддержкой ИИ.

Разработка симбиотического (человеко-центрированного) ИИ, предполагающего взаимодействие людей и машин как надежных партнеров в сложной гибридной системе, является важной исследовательской задачей. Необходимы фундаментальные исследования для улучшения понимания человеческой речи, извлечения смысловой информации. Это потребует разработки систем, способных задавать вопросы, предлагать различные варианты и четко объяснять процесс принятия решения. Включение и функционирование вычислительных систем (средств управления радиосвязью) с таким человекоподобным интеллектом в настоящее время имеет решающее значение, поскольку темп принятия решений в новых областях превышает тот, при котором люди без посторонней помощи могут ориентироваться, понимать происходящее и действовать.

Внедрение технологии ИИ в сети и средства связи, как в локальном, так и в глобальном плане, потребует трудно достижимого сегодня уровня обеспечения безопасности информации (целостности и исключения неконтролируемого доступа к ней) в зоне ответственности средств ИИ. Особенно тщательно должен быть защищен контур принятия решения и управления системообразующими ресурсами в зависимости от состояния внутреннего и внешнего контекстов условий. Выполнение этого требования на практике является не менее сложной задачей, чем разработка и реализация технических решений по внедрению технологии ИИ и требует своих системных решений.

Системы ИИ (особенно в сочетании с цифровыми двойниками) обладают потенциалом упростить алгоритмы и минимизировать время настройки оборудования (когнитивное радио), простоя сетевого и другого оборудования, системные сбои, улучшить управление запасами, ремонтами и т. д.

Концепция использования когнитивных радиоустройств, способных к обучению и адаптации к окружающей среде, с целью обеспечения надёжной связи и эффективного использования радиочастотного спектра, должна быть расширена до парадигмы, когнитивной радиосети, где спектр, принадлежащий так называемым первичным пользователям (то есть законным пользователям лицензированной полосы), также используется вторичными когнитивными радиосистемами для связи, в то же время сосуществуя с основными пользователями. Возможно, применением этой концепции

будет реализация динамического доступа к спектру, используемого радиосетями седьмого поколения.

Доступность больших наборов экспериментальных данных и возможность тестирования предложенных алгоритмов в реальных сценариях являются важными элементами для правильного проектирования сетей седьмого поколения, как интеллектуальных сетей, основанных на познании. Этот подход тяготеет к возможности превратить сложность системы в преимущество, а не в препятствие, используя внутренние возможности архитектур с глубоким обучением, чтобы улавливать и распознавать скрытые особенности сложных многомерных сигналов, которые наблюдаются в реальных сценариях, богатство которых не может быть полностью воспроизведено какой-либо математической или даже имитационной моделью.

Заключение

Рассмотренные в статье гипотеза авторов о закономерности появления седьмого и последующих поколений беспроводной связи и некоторые проблемные вопросы радиосвязи, требующие прорывных технологий и решения технических проблем их массового применения, преследуют цель обозначить направления перспективных исследований. С другой стороны, важно подчеркнуть необходимость широкого публичного обсуждения перспектив развития беспроводной связи, как на уровне теории, так и практики использования, в результате хотелось бы иметь сформулированную на государственном уровне финансируемую целевую системно продуманную научно-техническую программу исследований в области отечественной беспроводной связи.

Литература

1. Маляревский А. Диалектика и основы киберфизического мира. – URL: novostiitkanala.ru/numbers/reg-numbers/detail.php... (дата обращения 10.12.2024)
2. Белоус М. Зачем нужны сети 6G, если 5G все еще так и не стали массовыми? – URL: 3dnews.ru/1096196/seti-6g-zachem-oni-nuzhny (дата обращения: 10.12.2024).
3. Тонг В., Чжу П. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту / пер. с англ. В. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 624 с.

References

1. Malyarevsky A. *Dialektika i osnovy kiberfizicheskogo mira* [Dialectics and Foundations of the Cyber-Physical World]. URL: novostiitkanala.ru/numbers/reg-numbers/detail.php... (access: 12 October 2024). (In Russian).
2. Belous M. *Zachem nuzhny seti 6G, yesli 5G vse yeshche tak i ne stali massovymi?* [Why do we need 6G networks if 5G has not yet become widespread?]. URL: 3dnews.ru/1096196/seti-6g-zachem-oni-nuzhny (access: 12 October 2024). (In Russian).
3. Tong W., Zhu P. *Seti 6G. Put' ot 5G k 6G glazami razrabotchikov. Ot podklyuchennykh lyudey i veshchey k podklyuchennomu intellektu* [6G Networks. The Path from 5G to 6G through the Eyes of Developers. From Connected People and Things to Connected Intelligence]. trans. from English by V. S. Yatsenkova. – Moscow. DMK Press, 2022. 624 p. (In Russian).

Статья поступила 12 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Яшин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации. Профессор кафедры Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных

интересов: системный анализ, управление и обработка информации. Тел.: +7(812)542-90-54. E-mail: info@etu.ru. Адрес: 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Абрамович Александр Владимирович – независимый эксперт. Область научных интересов: проектирование распределенных радиосистем. Тел.: +7(495)335-95-22. E-mail: info@niiaa.ru. Адрес: 117393, Москва, ул. Профсоюзная, дом 78.

The seventh generation of wireless communication as an infrastructural technical basis for future stages of the evolution of the digital world.

A. I. Yashin, A. V. Abramovich

Abstract. *The article examines the main stages of development of the digital world realized by humanity from a general standpoint. The content of a new state of the digital world is introduced and disclosed – the “world of desires”, in which humanity is destined to solve increasingly difficult technical and technological problems that require penetration into the foundations of the construction and functioning of living matter, its symbiotic forms and modes of existence, including infocommunication processes of human society and natural communities, both at the macro and micro levels. A hypothesis is put forward about a smooth transition of the modern cyber-physical world to the future “world of desires”, which will be formed on the infrastructural technical basis of the seventh and subsequent generations of wireless communication. Such communication will require new breakthrough infocommunication technologies, means and systems of radio communication. Some applied areas are listed that will require the development of a significant number of applications and cloud services of extended reality, which are likely to become the main ones for providing a circular view, remote services with support for augmented reality, control of swarms of technical means, transmission of tactile sensations, telemedicine. As the number and popularity of augmented reality data increases, resolution, size, and frame rate increase, the bandwidth and latency requirements may exceed the capabilities of sixth-generation radio networks even with their evolution, which, according to the authors, will be the distinctive features of seventh and subsequent generations of wireless communications.*

Keywords: *wireless communication, augmented reality, artificial intelligence, cloud service, extended reality, digital world.*

Information about the authors

Aleksandr Ivanovich Yashin – Dr. habil. Of Engineering Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation. Professor of the Department of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin). Research interests: systems analysis, control and information processing. Tel.: +7(812)542-90-54. E-mail: info@etu.ru. Address: 197022, Saint Petersburg, ul. Professor Popov, 5, litera F.

Aleksandr Vladimirovich Abramovich – independent expert. Research interests: design of distributed radio systems. Tel.: +7(495)335-95-22. E-mail: info@niiaa.ru. Address: 117393, Moscow, ul. Profsoyuznaya, 78.

Библиографическая ссылка на статью:

Яшин А. И., Абрамович А. В. Седьмое поколение беспроводной связи как инфраструктурная техническая основа будущих этапов эволюции цифрового мира // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 2-7. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-2-7

Reference for citation:

Yashin A. I., Abramovich A. V. The seventh generation of wireless communication as an infrastructural technical basis for future stages of the evolution of the digital world. Means of Communications Equipment. 2024. No. 4 (168). С. 2-7. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-2-7 (in Russian)

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 35.2428

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-8-19

Анализ влияния точности мониторинга параметров сетевого трафика на качество его обслуживания

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

Аннотация. Для обеспечения необходимого качества обслуживания мультимедийного трафика в мультисервисных сетях связи применяются различные сетевые механизмы, управляемые параметры которых часто зависят от контролируемых в процессе мониторинга параметров обслуживаемого трафика. **Целью работы** является исследование степени влияния точности мониторинга параметров самоподобного мультимедийного трафика на качество его обслуживания при использовании сетевых механизмов распределения данного трафика по нескольким маршрутам совместно с механизмами предотвращения перегрузок. **Методы исследования:** имитационное моделирование сетевых механизмов обработки самоподобного трафика в устройствах коммутации мультисервисной сети, методы аппроксимации статистических зависимостей показателей качества обслуживания самоподобного трафика от его параметров, аналитическое моделирование механизмов распределения трафика по нескольким маршрутам, методы решения оптимизационных задач с нелинейной целевой функцией и ограничениями управляемых параметров, методы измерений параметров самоподобного трафика, методы проверки статистических гипотез о функциях распределений, методы проведения вычислительных экспериментов и обработки их результатов. **Новизна:** использовано новое математическое выражение для аппроксимации статистических зависимостей средней задержки от контролируемых параметров самоподобного трафика и управляемых параметров сетевых механизмов распределения трафика по нескольким маршрутам, что позволило аналитически оценить степень влияния на качество обслуживания трафика (при использовании данных сетевых механизмов) точности мониторинга его параметров. **Результаты:** получены графоаналитические зависимости средней задержки (показателя качества обслуживания трафика) от нагрузки при использовании механизмов распределения трафика по трем маршрутам при разных ошибках учитываемых параметров трафика, отражающих разную точность мониторинга данных параметров в сети. **Практическая значимость:** полученные результаты исследований могут быть использованы при определении требований к системам мониторинга параметров мультимедийного трафика в мультисервисных сетях связи.

Ключевые слова: имитационное моделирование, мониторинг, мультимедийный трафик, аппроксимация, распределение трафика по нескольким маршрутам.

Введение

Современные сети связи являются мультисервисными, поскольку призваны обеспечивать организацию на их основе двух и более служб, предоставляющих пользователям телекоммуникационные услуги заданного качества. В данных мультисервисных сетях связи (МСС) передается и обрабатывается мультимедийный трафик (ММТ), отличительной особенностью которого является группирование пакетов, количественно характеризуемый всплесками интенсивности, что является одним из проявлений свойства самоподобия [1], присущего данному типу трафика.

Для обеспечения заданного качества обслуживания всех типов трафика в МСС в условиях воздействия всевозможных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов применяются различные сетевые механизмы, реализованные в устройствах коммутации (УК) сети. Однако хорошо зарекомендовавшие себя сетевые механизмы управления однородными потоками данных [2] не в полной мере годятся для обработки мультимедийного трафика [3].

Для моделирования ММТ, обладающего свойством самоподобия, часто используются модели входного потока на основе распределений Парето, Вейбулла и логнормального

распределения [1, 4], которые позволяют учитывать всплески самоподобного трафика, характеризуемые различными значениями параметра Хёрста $H \in [0.5, 1)$. Однако прогнозирование последствий применения тех или иных сетевых механизмов обработки трафика, описываемого указанными моделями, осложняется отсутствием достаточно точных аналитических моделей зависимости показателей качества обслуживания такого трафика от его параметров и от управляемых параметров используемых механизмов его обработки.

В то же время данные распределения имеют простой аналитический вид и их несложно учесть путем имитационного моделирования сетевых механизмов обработки ММТ в УК МСС [5, 6]. Но из-за большой дисперсии интервалов времени между очередными пакетами приходится обрабатывать выборки очень большого размера, что существенно увеличивает время получения достоверных результатов имитационного моделирования и решения задач оптимизации управляемых параметров используемых сетевых механизмов в реальном времени.

В работе [7] для оптимизации механизмов распределения ММТ по нескольким маршрутам было предложено использовать рациональное сочетание методов имитационного и аналитического моделирования. Имитационное моделирование используется для вычисления оцениваемых показателей только в некоторых характерных точках множества возможных значений наблюдаемых и управляемых параметров, а затем выполняется аппроксимация полученных результатов простыми аналитическими выражениями, используемыми в дальнейшем для оперативного вычисления параметров применяемых сетевых механизмов, минимизирующих среднее время задержки как одного из основных показателей качества обслуживания трафика.

Представленная в [7] аналитическая модель позволяет решать задачи оптимизации управляемых параметров механизмов распределения ММТ по нескольким маршрутам МСС при наличии исходных данных о параметрах этих маршрутов и о параметрах поступающего трафика. Для получения указанных исходных данных могут быть использованы результаты мониторинга состояния сети и сетевого трафика в реальном времени. Однако в условиях воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов необходимые исходные данные могут быть известны неточно, что может приводить к ошибочным решениям по выбору управляемых параметров сетевых механизмов и к ухудшению качества обслуживания трафика.

В настоящей работе анализируется степень влияния точности мониторинга сетевого трафика на качество его обслуживания при использовании механизмов распределения ММТ по нескольким маршрутам с учётом совместно используемых механизмов предотвращения перегрузок при условии достоверных исходных данных о параметрах доступных маршрутов.

1. Состав параметров трафика, контролируемых при управлении параметрами механизмов его распределения по нескольким маршрутам

Как показано в [7], при наличии $n > 1$ маршрутов в одном информационном направлении с суммарной пропускной способностью μ (в единицах интенсивности обслуживания) и пропускными способностями отдельных маршрутов $\mu_i = 1/\tau_{об.i} = \gamma_i \cdot \mu$, средняя задержка $T_i = \tau_{ож.i} + \tau_{об.i}$ в каждом из них будет зависеть от интенсивности направляемого в него трафика λ_i , влияющего на время ожидания в очереди $\tau_{ож.i} = \tau_{об.i} \cdot q(\rho_i)$, $\rho_i = \lambda_i/\mu_i$, на входе каждого маршрута по-разному в зависимости от статистических характеристик входных потоков, влияющих на относительное время ожидания $q(\rho_i)$, и длительностей обслуживания отдельных пакетов $\tau_{об.i}$. Статистическую зависимость относительного среднего времени ожидания $q(\rho)$ от нагрузки $\rho = \lambda/\mu$ предложено аппроксимировать в [7] следующей формулой:

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

где ρ_0 , a , b , c – параметры аппроксимации, зависящие от типа и параметров распределений длительности интервалов времени между моментами прихода очередных пакетов $G_{вх}$ и длительности их обслуживания $G_{вых}$, используемых в общепринятых обозначениях

рассматриваемых моделей УК МСС как одноканальных систем массового обслуживания (СМО) с ожиданием в виде $G_{\text{вх}}/G_{\text{вых}}/1$.

В качестве основных учитываемых параметров распределений $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$ выступают значения среднего времени $\tau_{\text{вх}}$ и $\tau_{\text{об}}$, используемые для задания интенсивностей $\lambda = 1/\tau_{\text{вх}}$, $\mu = 1/\tau_{\text{об}}$ и, соответственно, нагрузки $\rho = \lambda/\mu$ в формуле (1). В качестве дополнительного параметра распределений $G_{\text{вх}}$ учитывается параметр Хёрста H , а в роли различаемых типов распределений в рассматриваемых моделях СМО, для которых в [7] получены зависимости приведенных параметров аппроксимации от параметра Хёрста H , в роли $G_{\text{вх}}$ выступают распределения Вейбулла (*W-Weibull*) и Парето (*P-Pareto*), а в роли $G_{\text{вых}}$ – экспоненциальное (*M-Markovian*) и детерминированное (*D-Deterministic*) распределения. С учетом [8] были получены аналогичные зависимости также для логнормального распределения (*L-Lognormal*) в роли $G_{\text{вх}}$.

Как показано в [7], параметр аппроксимации ρ_0 для всех рассматриваемых СМО равен нулю $\rho_0 = 0$, кроме СМО *P/D/1*, для которой он рассчитывается по формуле:

$$\rho_0 = \frac{2 - 2 \cdot H}{3 - 2 \cdot H}. \tag{2}$$

Для расчета остальных параметров аппроксимации a, b и c в [7] предложено использовать формулы:

$$F(H) = \frac{d + e \cdot H}{f + g \cdot H}, \tag{3}$$

$$F(H) = h + \frac{e \cdot (2 \cdot H - 1)^d}{(g - H)^f}, \tag{4}$$

где d, e, f, g, h – дополнительные параметры формул аппроксимации (3) и (4), различные для разных зависимостей $a(H), b(H), c(H)$. Результаты расчета данных параметров по итогам имитационного моделирования рассматриваемых СМО приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры формул аппроксимации

СМО	Параметры формулы (1)	Параметры формул (3) и (4)					Номер формулы
		d	e	f	g	h	
W/M/1	$a(H)$	3	-2	2	0	–	(3)
	$b(H)$	3.930	0.110	0.981	0.95	1	(4)
	$c(H)$	1.148	0.343	1.498	0.95	1	(4)
W/D/1	$a(H)$	3	-2	2	0	–	(3)
	$b(H)$	8.604	2.425	0.390	1	1	(4)
	$c(H)$	0.967	0.286	1.527	0.95	0.5	(4)
P/M/1	$a(H)$	1.361	0.376	1	0	–	(3)
	$b(H)$	1.001	-0.766	1	-1	–	(3)
	$c(H)$	0.402	-0.145	1	-1	–	(3)
P/D/1	$a(H)$	2.174	-0.644	1	0	–	(3)
	$b(H)$	1.049	-0.788	1	-1	–	(3)
	$c(H)$	0.748	-0.524	1	-1	–	(3)
L/M/1	$a(H)$	2.033	-1.325	1	0	–	(3)
	$b(H)$	2.076	0.088	0.946	0.95	1	(4)
	$c(H)$	1.03	0.41	1.076	0.95	1	(4)
L/D/1	$a(H)$	3.48	-2.9	1	0	–	(3)
	$b(H)$	2.902	0.244	0.666	0.95	1	(4)
	$c(H)$	1.049	0.449	1.041	0.95	0.5	(4)

Если в некотором направлении, включающем $n > 1$ маршрутов с пропускными способностями $\mu_i = 1/\tau_{\text{об},i} = \gamma_i \cdot \mu$, нужно передать трафик с суммарной интенсивностью λ , то выбирая разные доли $\{\alpha_i\}_n$, можно с помощью соответствующих сетевых механизмов направлять трафик по разным маршрутам с разной интенсивностью $\lambda_i = \alpha_i \cdot \lambda$ и влиять на

величину относительной средней задержки T_{cp} , нормированную относительно времени обслуживания $\tau_{об} = 1/\mu$, которую, согласно [7], можно рассчитать по формуле:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\gamma_i} \cdot [q(\rho_i) + 1], \quad \rho_i = \frac{\alpha_i \lambda}{\gamma_i \mu} \quad (5)$$

где $q(\rho_i)$ – относительное время ожидания в i -м маршруте, рассчитываемое по формуле (1).

Рассматривая выражение (5) в качестве минимизируемой целевой функции $T_{cp}(\alpha)$ относительно варьируемых долей трафика $\alpha = \{\alpha_i\}_n$, можно найти оптимальные доли $\alpha_o = \{\alpha_{i,o}\}_n$, выступающие в роли оптимальных управляемых параметров рассматриваемых сетевых механизмов, при которых будет обеспечиваться минимальная задержка $T_{cp,o}$:

$$T_{cp,o} = \min_{\alpha \in A} T_{cp}(\alpha) = T_{cp}(\alpha_o), \quad (6)$$

где A – множество возможных долей $\alpha = \{\alpha_i\}_n$, удовлетворяющих ограничениям:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Из анализа выражений (1) и (5) следует, что задача оптимизации (6) является классической задачей нелинейного программирования с выпуклой целевой функцией и дополнительными ограничениями (7). Как показано в [9], опираясь на метод множителей Лагранжа [10], её решение сводится к последовательному решению (одним из численных методов [11]) линейных уравнений, включающих частные производные по каждому искомому параметру, для разного количества маршрутов $k = 1, \dots, n$, упорядоченных от большей пропускной способности к меньшей: $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_n$, до некоторого максимального $k \leq n$, превышение которого приводит к превышению доступного числа маршрутов $k + 1 > n$ или к нарушению ограничений (7), в части касающейся условия неотрицательности всех долей $\alpha = \{\alpha_i\}_{k+1}$.

Таким образом, оптимальные значения управляемых параметров $\alpha_o = \{\alpha_{i,o}\}_n$ рассматриваемых сетевых механизмов, минимизирующих среднее время задержки $T_{cp,o}$, характеризующее качество обслуживания трафика, нетрудно вычислять в реальном времени, но для этого нужно знать типы распределений длительности интервалов времени между моментами прихода очередных пакетов $G_{вх}$ и длительности их обслуживания $G_{вых}$, влияющие на выбор соответствующей модели СМО $G_{вх}/G_{вых}/1$, а также однозначно характеризующие их параметры, в частности, значения среднего времени $\tau_{вх}$ и $\tau_{об}$, используемые для задания интенсивностей $\lambda = 1/\tau_{вх}$, $\mu = 1/\tau_{об}$ и нагрузки $\rho = \lambda/\mu$ в формуле (1), а также параметр Хёрста H , используемый для расчета параметров аппроксимации по формулам (2)-(4).

2. Способы мониторинга параметров трафика, контролируемых при управлении параметрами механизмов его распределения по нескольким маршрутам

Обычно под мониторингом понимается специальная процедура наблюдения (слежения) за текущим состоянием тех или иных объектов или процессов, в роли которых, в частности, может выступать сетевой трафик. Как отмечено в [12], контролируя и предсказывая трафик с помощью мониторинга его параметров, можно оптимизировать сеть и существенно повысить эффективность её функционирования.

Одним из основных и наиболее просто измеряемых параметров входного трафика является его интенсивность λ , оцениваемая путем подсчета суммарного количества поступающих пакетов $N(T_{изм})$ за некоторое время измерения $T_{изм}$ и вычисления отношения $\hat{\lambda} = N(T_{изм})/T_{изм}$. При этом для оценки среднего времени $\hat{\tau}_{вх}$ между моментами прихода очередных пакетов (основного параметра распределения $G_{вх}$) даже не нужно отслеживать отдельные интервалы времени $\tau_{вх,i}$, $i = 2, \dots, N$, между каждой очередной парой пакетов, так как их сумма (почти точно) равна $T_{изм}$, и тогда $\hat{\tau}_{вх} = T_{изм} / N(T_{изм}) = 1/\hat{\lambda}$.

Из-за конечности времени измерений $T_{изм}$ и объема выборки $N(T_{изм})$ всегда существует ненулевая погрешность $\varepsilon > 0$ оценки интенсивности λ и среднего времени $\tau_{вх}$,

которая является особенно большой для распределений $G_{\text{ВХ}}$ с большой дисперсией, что характерно для самоподобного ММТ с величиной параметра Хёрста $H > 0.5$.

Известные способы измерения самого параметра Хёрста H [13, 14] являются намного более сложными, чем измерение интенсивности λ (или $\tau_{\text{ВХ}}$), и еще менее точными при ограниченном времени измерений. На основании выполненных исследований в [13] отмечается, что точные оценки параметра Хёрста в широком диапазоне значений, а также длин исследуемых сигналов дают следующие методы:

- анализ флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов – *Detrended Fluctuation Analysis (DFA)*;
- метод, основанный на дискретной производной второго порядка, адаптированный под дискретное вейвлет-преобразование – *Wavelet Discrete Second-Order Derivative (WDSOD)*;
- метод средних вейвлет-коэффициентов – *Average Wavelet Coefficients/Components (AWC)* для случая непрерывного (CWT) преобразования с вейвлетом Морле.

При этом метод *AWC-CWT* примерно в пять, а *DFA* в пятьдесят раз медленнее, чем методы *WDSOD* и *RS* (метод нормированного размаха). Наиболее легко реализуемыми являются методы *RS* и *DFA*.

В [14] на основании сравнительного оценивания быстродействия рассмотренных методов подтверждается, что метод, основанный на применении вейвлет-преобразования, является самым быстродействующим, а получаемые с его помощью оценки параметра Хёрста наименее смещенными.

Кроме параметров интенсивности λ и Хёрста H мониторинг входного трафика должен позволить определить наиболее подходящий (для аппроксимации) тип распределения $G_{\text{ВХ}} \in \{M, P, W, L\}$ из числа тех, для которых разработаны аналитические модели и получены параметры аппроксимации, приведенные в табл. 1.

Следует отметить, что реальный трафик не обязательно должен точно соответствовать какому-то из рассмотренных четырех распределений, но вызванная им величина относительного среднего времени ожидания $q(\rho)$ обязательно будет наиболее близкой к расчетной величине (1) для одного из них. В качестве косвенной меры близости распределения реального трафика одному из четырех рассмотренных могут служить традиционные критерии близости неизвестной табличной функции и аппроксимирующей её аналитической функции в виде среднеквадратического или максимального отклонения [11]. В математической статистике при сравнении функций распределения данным критериям соответствуют критерии согласия Пирсона (χ^2 – хи-квадрат) и Колмогорова [15]. Для проверки возможности использования этих критериев в качестве меры близости реальных и предполагаемых распределений был проведен вычислительный эксперимент, в котором при генерации выборки реального распределения использовалось одно из этих же распределений, а сравнивалось оно с тремя другими.

Результаты расчета значений двух критериев согласия (χ^2 и Колмогорова) для разных пар истинных и предполагаемых распределений (округленные до двух-трех значащих цифр) при значении параметра Хёрста $H = 0.75$ (для распределений Вейбулла, Парето и логнормального) приведены в табл. 2 и 3.

Значения критериев согласия в диагональных клетках табл. 2 и 3 соответствуют результатам сравнения выборок с теоретическими распределениями, по которым они и генерировались. Все они оказались в пределах допустимых значений для обоих критериев: и Пирсона $\chi^2_{\text{кр}} = 30.14$, и Колмогорова $K_a = 1.36$, что и следовало ожидать при генерации случайных чисел с совпадающими функциями распределения. С точки зрения цели проведенного эксперимента больший интерес представляют значения рассчитанных критериев при сравнении выборок с несовпадающими функциями распределениями.

Из приведенных в табл. 2 и 3 результатов следует, что, сравнивая выборки мультимедийного трафика с теоретическим экспоненциальным распределением с помощью

обоих критериев согласия легко обнаружить самоподобный трафик по очень большому значению этих критериев. Более чувствительным к самоподобию является критерий χ^2 Пирсона.

Таблица 2 – Значения критерия согласия χ^2

Истинное распределение	Предполагаемое распределение			
	Экспоненциальное	Вейбулла	Парето	Логнормальное
Экспоненциальное	14.2	$4.0 \cdot 10^4$	∞	1732.4
Вейбулла	$4.1 \cdot 10^{12}$	21.7	917.2	87.8
Парето	$9.9 \cdot 10^{31}$	510.8	19.8	94.7
Логнормальное	$8.4 \cdot 10^{24}$	116.3	270.9	16.4

Таблица 3 – Значения критерия согласия Колмогорова

Истинное распределение	Предполагаемое распределение			
	Экспоненциальное	Вейбулла	Парето	Логнормальное
Экспоненциальное	0.924	28.4	29.2	16.6
Вейбулла	29.1	0.923	56.1	22.5
Парето	28.3	55.8	0.924	44.0
Логнормальное	16.4	21.9	43.7	0.003

Причем по величине этого критерия (пусть и очень большого) дополнительно можно различить выборки с распределениями Вейбулла, Парето и логнормального. Критерий Колмогорова различия распределений Вейбулла и Парето практически не замечает, но замечает отличие логнормального распределения. В то же время он позволяет (как и критерий χ^2) отличить выборки с последними распределениями, если в качестве предполагаемого (теоретического) распределения использовать одно из них.

Представляет также интерес использовать для определения и прогноза распределений трафика и его параметров искусственные нейронные сети (ИНС), способные адаптироваться к сложным нелинейным зависимостям в обрабатываемых данных мониторинга сетевого трафика. В частности, в [16] на основании приведенных результатов исследований утверждается, что с помощью двумерной ИНС Кохонена можно с достаточно высокой точностью идентифицировать законы распределения сетевого трафика. К достоинству ИНС можно отнести также то, что они позволяют выявлять скрытые закономерности в распределениях трафика, влияющие на близость реальных зависимостей $q(p)$ к аналитическим (1) для одной из предполагаемых функций распределения без точной идентификации функций распределения данного трафика.

В качестве основного параметра распределения длительности обслуживания пакетов $G_{\text{вых}}$, от мониторинга требуется определение среднего времени обслуживания $\tau_{\text{об}}$ и типа данного распределения $G_{\text{вых}} \in \{M, D\}$ из числа всего двух учитываемых: экспоненциального и детерминированного, выступающих граничными оценками времени обслуживания пакетов с переменным и постоянным объемом при постоянной скорости передачи. Размеры пакетов и скорость передачи обычно являются управляемыми и контролируются в ходе мониторинга скорее для проверки результатов выполнения команд управления, чем для оценки результатов внешних воздействий. В случае использования протоколов передачи пакетов с постоянным объемом можно считать достоверно известными параметры $\tau_{\text{об}}$, $\mu = 1/\tau_{\text{вх}}$ и распределение $G_{\text{вх}} = D$. В противном случае (при переменном размере пакетов) распределение (на наихудший случай) полагается экспоненциальным $G_{\text{вх}} = M$, с оценкой среднего времени обслуживания $\hat{\tau}_{\text{об}}$, которая может отличаться от точного значения $\tau_{\text{об}}$ из-за ограниченного времени измерений $T_{\text{изм}}$.

3. Анализ степени влияния точности мониторинга параметров сетевого трафика на качество его обслуживания

Степень влияния точности мониторинга сетевого трафика на качество его обслуживания можно оценить, сравнив обеспечиваемые показатели качества при использовании управляемых

параметров рассматриваемых сетевых механизмов, рассчитанных путем решения оптимизационной задачи (6) при задании точных и ошибочных исходных данных о трафике.

На рис. 1 приведены рассчитанные путем решения оптимизационной задачи (6) зависимости оптимальных долей трафика $\alpha_o = \{\alpha_{1,o}, \alpha_{2,o}, \alpha_{3,o}\}$, (непрерывные линии), распределяемого по трём маршрутам, от нагрузки ρ при использовании точных исходных данных о трафике для СМО (в каждом маршруте) $W/M/1$ (а) и $P/M/1$ (б) при заданных (для примера) долях $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} = \{0.5, 0.3, 0.2\}$ суммарной пропускной способности используемых маршрутов (интенсивности обслуживания) $\mu = 1$. Под точно известными параметрами трафика полагались: интенсивность λ , совпадающая в данном случае (при $\mu = 1$) с изменяющейся от 0 до 0.6 нагрузкой ρ , значение параметра Хёрста $H = 0.75$ и тип распределения $G_{вх}$ (P – Парето на рис. 1 а) и W –Вейбулла на рис. 1 б)).

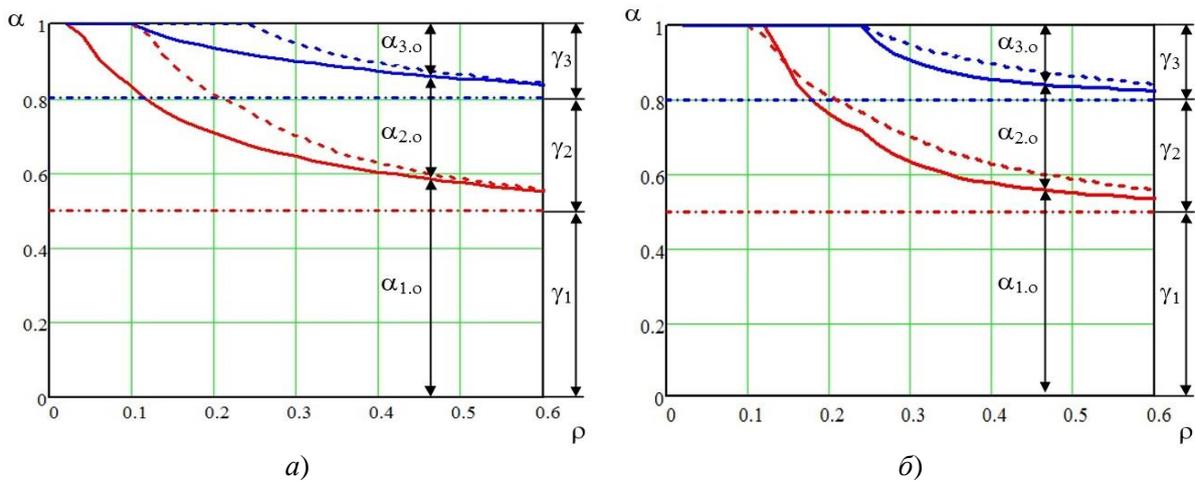


Рис. 1. Зависимости оптимальных долей трафика, распределяемого по трём маршрутам, от нагрузки для СМО $W/M/1$ (а) и $P/M/1$ (б)

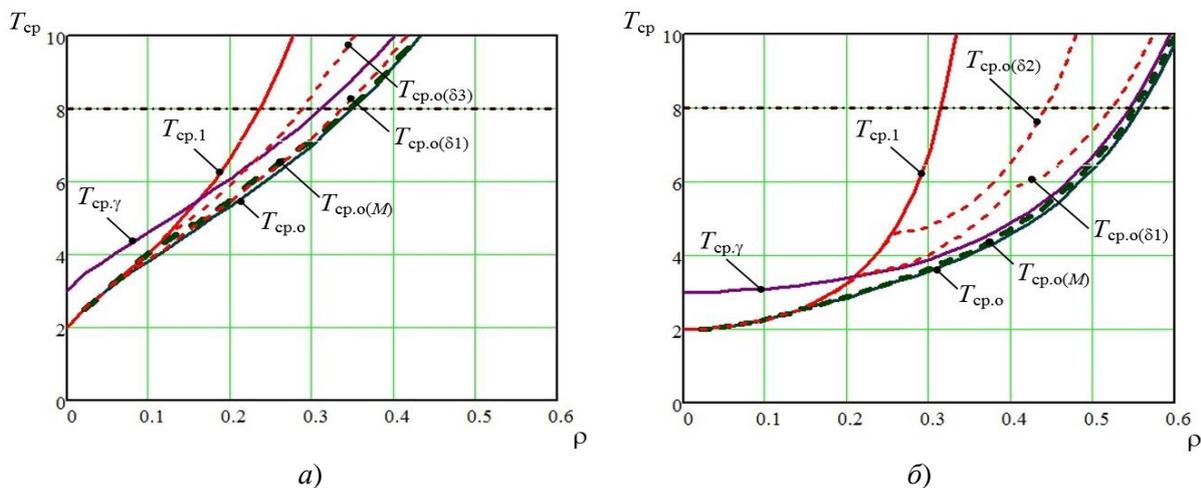


Рис. 2. Зависимости средней задержки от нагрузки при распределении трафика по трем маршрутам на основании разных данных о трафике для СМО $W/M/1$ (а) и $P/M/1$ (б)

Как видно из графиков на рис. 1, при маленькой нагрузке оптимальным долям трафика $\alpha_o = \{1, 0, 0\}$, соответствует использование одного маршрута с самой большой долей общей пропускной способности $\gamma_1 = 0.5$. С ростом нагрузки, начиная с некоторой её величины, дополнительно используется второй маршрут с меньшей пропускной способностью $\gamma_2 = 0.3$, а затем и третий, с самой маленькой пропускной способностью $\gamma_3 = 0.2$, в пропорции $\alpha_o(\rho)$, которая в пределе при $\rho \rightarrow 1$ совпадает с γ .

Пунктирными линиями на рис. 1 показаны зависимости долей трафика, которые были найдены в результате решения оптимизационной задачи (6) с ошибочными исходными данными

о типе трафика $G_{\text{вх}} = M$ с экспоненциальным распределением и параметром Хёрста $H = 0.5$. Как видно из рис. 1, эти зависимости заметно отличаются от точных зависимостей, причём на различную величину при разной нагрузке для разных точных распределений Парето и Вейбулла. На сколько сильно эти (и другие) отличия распределяемых долей трафика влияют на изменение качества обслуживания, можно увидеть на рис. 2, где представлены зависимости средней задержки от нагрузки при распределении трафика по трем маршрутам на основании разных данных о трафике для СМО $W/M/1$ а) и $P/M/1$ б) с точными параметрами, приведенными выше.

При использовании оптимальных долей α_o (непрерывные линии на рис. 1), рассчитанных на основании точных исходных данных о трафике для СМО $W/M/1$ и $P/M/1$ при $H = 0.75$, обеспечивается минимальная задержка (линии $T_{\text{ср.о}}$ на рис. 2) во всем диапазоне изменения нагрузки ρ . Если же будут использоваться доли, рассчитанные по ошибке для СМО $M/M/1$ при $H = 0.5$ (пунктирные линии на рис. 1), то задержка увеличится, но совсем немного – практически незаметно (жирные пунктирные линии $T_{\text{ср.о}(M)}$ на рис. 2). Из этого следует, что ошибки в идентификации функции распределения входного трафика и довольно большие погрешности в оценке параметра Хёрста (в диапазоне от 0.5 до 0.75), очень мало сказываются на изменении качества обслуживания из-за вызванных этими ошибками отклонений распределения трафика по нескольким маршрутам от оптимального.

Однако абсолютное значение задержки очень сильно зависит от типа функции распределения и параметра Хёрста, ошибочное определение которых может приводить к неправильной работе механизмов предотвращения перегрузок и к существенному ухудшению качества обслуживания. Например, если механизм предотвращения перегрузок будет настроен на порог ограничения нагрузки $\rho \leq 0.55$, при которой задержка не превышает допустимую величину $T_{\text{ср.о}}(0.55) = 8$, рис. 2 б) в расчете на то, что входной трафик описывается функцией распределения Парето, а на самом деле трафику будет соответствовать распределение Вейбулла, то допустимая величина задержки будет превышена уже при $\rho \geq 0.35$, рис. 2 а), а при установленном пороге $\rho = 0.55$ задержка превысит допустимую величину почти в два раза (выше границы графика на рис. 2 б).

Влияет на увеличение времени задержки также ошибочное определение более низкой нагрузки, чем есть на самом деле, что приводит к учету при вычислении оптимальных долей α_o заниженной нагрузки и ошибочному распределению трафика по нескольким маршрутам. Правда, заметное возрастание среднего времени задержки из-за таких ошибок возникает, если прогнозная нагрузка существенно отличается от реальной. Так, при занижении оцениваемой нагрузки на 40 % время задержки при входном трафике с распределением Вейбулла возрастает малозаметно – на доли процентов (линия $T_{\text{ср.о}(\delta_1)}$ на рис. 2 а). В случае входного трафика с распределением Парето задержка возрастает при этом более заметно – на несколько процентов (линия $T_{\text{ср.о}(\delta_1)}$ на рис. 2 б), а при занижении оцениваемой нагрузки на 50 % задержка возрастает уже на десятки процентов (линия $T_{\text{ср.о}(\delta_2)}$ на рис. 2 б). При входном трафике с распределением Вейбулла среднее время задержки возрастает на десятки процентов лишь при занижении оцениваемой нагрузки более, чем на 60 % (линия $T_{\text{ср.о}(\delta_3)}$ на рис. 2 а), т. е. при распределении Вейбулла чувствительность к ошибкам определения нагрузки меньше, чем при распределении Парето. Как видно из графиков на рис. 2, заниженная оценка интенсивности входного трафика приводит к увеличению среднего времени задержки не более, чем до величины времени задержки при использовании одного маршрута (линии $T_{\text{ср.1}}$ на рис. 2), что соответствует отмеченному выше оптимальному распределению трафика при маленькой нагрузке. Следовательно, эта линия соответствует верхней граничной оценке гарантируемой средней задержки при использовании одного маршрута, независимо от интенсивности входного трафика, т. е. не зависит от точности мониторинга этого параметра сетевого трафика. От точности оценки нагрузки также не зависит среднее время задержки при использовании всех маршрутов с долями трафика α , совпадающими с долями пропускной способности этих маршрутов, т. е. $\alpha = \gamma$ при любой входной нагрузке (линии $T_{\text{ср.}\gamma}$ на рис. 2).

Как уже отмечалось, именно к таким значениям сходятся оптимальные доли $\alpha_o(\rho)$ при большой нагрузке $\rho \rightarrow 1$. Однако, как видно из рис. 2, использование такого распределения трафика и при средней, и даже при малой нагрузке обеспечивает среднее время задержки не на много больше, чем при оптимальном распределении (линии $T_{cp,o}$ на рис. 2), что может служить основанием для использования такого распределения в случае, когда точность мониторинга сетевого трафика недостаточна для расчета оптимального распределения $\alpha_o(\rho)$.

Выводы

Прогнозирование последствий применения тех или иных сетевых механизмов обработки мультимедийного трафика в УК МСС осложняется отсутствием достаточно точных аналитических зависимостей показателей качества обслуживания такого трафика от его параметров даже при их точном определении в процессе мониторинга.

В ходе исследований с помощью имитационного моделирования обработки самоподобного трафика, описываемого различными функциями распределения интервалов времени между очередными пакетами, удалось аппроксимировать статистические зависимости относительного среднего времени ожидания от нагрузки и от величины параметра Хёрста простым аналитическим выражением, на основе которого была разработана модель сетевого механизма распределения трафика по нескольким маршрутам с возможностью оптимизации этого распределения на основании результатов мониторинга параметров обслуживаемого трафика. Рассмотрены известные способы мониторинга параметров сетевого трафика, необходимые для решения указанной оптимизационной задачи, в частности, такие как средняя интенсивность трафика и параметр Хёрста. Предложен способ выбора наиболее подходящей для аппроксимации функции распределения входного трафика на основании критериев согласия Пирсона и Колмогорова, а также проанализированы возможности использования для этого выбора искусственных нейронных сетей. Все рассмотренные способы мониторинга позволяют оценить необходимые параметры самоподобного трафика с достаточно высокой точностью, но только за длительное время, а при ограниченном времени измерений ошибки неизбежны.

С помощью разработанной аналитической модели механизмов обработки мультимедийного трафика выяснено, что ошибки в идентификации функции распределения входного трафика и довольно большие погрешности в оценке параметра Хёрста (в диапазоне от 0.5 до 0.75) очень мало сказываются на изменении качества обслуживания из-за вызванных этими ошибками отклонений распределения трафика по нескольким маршрутам от оптимального. В то же время из-за существенного отличия зависимостей задержки от нагрузки при разных функциях распределения входного трафика и значениях параметра Хёрста ошибочное определение этих параметров может приводить к неправильной работе механизмов предотвращения перегрузок и к существенному ухудшению качества обслуживания. На увеличение времени задержки так же влияет ошибочное определение более низкой нагрузки, чем есть на самом деле, что приводит к ошибочному (неоптимальному) распределению трафика по нескольким маршрутам с преобладающим использованием одного маршрута с наибольшей пропускной способностью и недоиспользованием остальных.

Литература

1. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
2. Лазарев В. Г., Лазарев В. Ю. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. М.: Радио и связь, 1983. 216 с.
3. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – М.: Наука и Техника, 2007. 336 с.
4. Крылов В. В., Самохвалова С. С. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 288 с.

5. Ложковский А. Г., Вербанов О. В. Моделирование трафика мультисервисных пакетных сетей с оценкой его коэффициента самоподобности // Научные труды ОНАС им. А.С. Попова. 2014. № 1. С. 70-76.
6. Дейнеко Ж. В., Замула А. А., Кириченко Л. О., Радивилова Т. А. Об одном методе моделирования самоподобного стохастического процесса // Вестник Харьковского национального университета. 2019. № 890. С. 53-63.
7. Одоевский С. М., Рафальская М. И., Зизевский В. А., Анищенко Г. И. Оптимизация распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования работы узлов коммутации мультисервисной сети связи в виде СМО // XI Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Сборник трудов. Казань: Издательство АН РТ, 2023. С. 663-673.
8. Одоевский С. М., Зизевский В. А., Рафальская М. И. Аппроксимация статистических характеристик процесса обслуживания мультимедийного трафика на основе логнормального распределения // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах. Воронеж, 2024. С. 96-105.
9. Одоевский С. М., Рафальская М. И., Ясинский С. А., Сарафанников Е. В. Методика повышения эффективности обработки видеотрафика при использовании сетевых механизмов распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам // Информация и космос. 2023. №1. С. 6-13.
10. Дегтярев Ю. И. Исследование операций. Москва: Высшая школа, 1986. 320 с.
11. Турчак Л. И., Плотников П. В. Основы численных методов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 304 с.
12. Уилсон Эд. Мониторинг и анализ сетей. М.: Издательство "Лори", 2021. 350 с.
13. Имашев С. А., Сычев В. Н. Оценка возможностей применения методов фрактального анализа для исследования геофизических данных. Часть 1. Обзор методов оценки параметра Херста // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 5. С. 72-77.
14. Кириченко Л., Радивилова Т. Оценивание параметра самоподобия для стационарных стохастических процессов // International Journal "Information Content and Processing". 2018, v. 5, №1. С. 41-71.
15. Мартынов Г. В. Статистические критерии, основанные на эмпирических процессах, и связанные с ним вопросы // Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика». 1992. Т. 30. С. 3-112.
16. Лёзина И. В., Яшин Н. Ю. Автоматизированная система идентификации законов распределения двумерной нейронной сетью Кохонена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4 (2). С. 344-349.

References

1. Shelukhin O. I., Osin A. V., Smol'skiy S. M. *Samopodobiye i fraktaly. Telekommunikatsionnyye prilozheniya* [Self-similarity and fractals. Telecommunication applications]. Moscow. Fizmatlit. 2008. 368 p. (In Russian).
2. Lazarev V. G., Lazarev V. Yu. *Dinamicheskoye upravleniye potokami informatsii v setyakh svyazi* [Dynamic control of information flows in communication networks]. Moscow. *Radio i svyaz'* [Radio and Communications], 1983. 216 p. (In Russian).
3. Kucheryavyu Ye. A. *Upravleniye trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [Traffic management and quality of service on the Internet]. Moscow. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technology]. 2007. 336 p. (In Russian).
4. Krylov V. V., Samokhvalova S. S. *Teoriya teletrafika i yeye prilozheniya* [Theory of teletraffic and its applications]. St. Petersburg. BHV-Petersburg Publ. 2005. 288 p. (In Russian).
5. Lozhkovskiy A. G., Verbanov O. V. *Modelirovaniye trafika mul'tiservisnykh paketnykh setey s otsenkoy yego koeffitsiyenta samopodobnosti* [Modeling the traffic of multiservice packet networks with an assessment of its self-similarity coefficient]. *Nauchnyye trudy ONAS im. A.S. Popova* [Scientific works of ONAS named after A.S. Popov]. 2014. No. 1. Pp. 70-76. (In Russian).
6. Deyneko Zh. V., Zamula A. A., Kirichenko L. O., Radivilova T. A. *Ob odnom metode modelirovaniya samopodobnogo stokhasticheskogo protsessa* [On one method for modeling a self-similar stochastic process]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo universiteta* [Bulletin of Kharkiv National University]. 2019. № 890. Pp. 53-63. (In Russian).
7. Odoevskiy S. M., Rafal'skaya M. I., Zizevskiy V. A., Anishchenko G. I. *Optimizatsiya raspredeleniya mul'timediynogo trafika po neskol'kim marshrutam na osnove approksimatsii rezul'tatov imitatsionnogo modelirovaniya raboty uzlov kommutatsii mul'tiservisnoy seti svyazi v vide SMO* [Optimization of multimedia

traffic distribution over several routes based on approximation of simulation results of switching nodes of a multiservice communication network in the form of a QS]. *XI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primeneniyu v nauke i promyshlennosti. Sbornik trudov* [XI All-Russian scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry. Collection of works]. Kazan'. Kazan: Izdatel'stvo AN RT [Publishing house of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan]. 2023. Pp. 663-673. (In Russian).

8. Odoyevskiy S. M., Zizevskiy V. A., Rafal'skaya M. I. *Approksimatsiya statisticheskikh kharakteristik protsessa obsluzhivaniya mul'timediynogo trafika na osnove lognormal'nogo raspredeleniya* [Approximation of statistical characteristics of the multimedia traffic servicing process based on lognormal distribution]. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'* [Radar, navigation, communication]. *Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. V 5-ti tomakh* [Collection of works of the XXX International scientific and technical conference. In 5 volumes]. Voronezh. 2024. Pp. 96-105. (In Russian).

9. Odoyevskiy S. M., Rafal'skaya M. I., Yasinskiy S. A., Sarafannikov Ye. V. *Metodika povysheniya effektivnosti obrabotki videotrafika pri ispol'zovanii setevykh mekhanizmov raspredeleniya mul'timediynogo trafika po neskol'kim marshrutam* [Methodology for Improving the Efficiency of Video Traffic Processing Using Network Mechanisms for Distributing Multimedia Traffic Over Several Routes]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2023. No. 1. Pp. 6-13. (In Russian).

10. Degtyarev Yu. I. *Issledovaniye operatsiy* [Operations Research]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1986. 320 p. (In Russian).

11. Turchak L. I., Plotnikov P. V. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of Numerical Methods]. Moscow. FIZMATLIT. 2002. 304 p. (In Russian)

12. Uilson Ed. *Monitoring i analiz setey* [Network Monitoring and Analysis]. Moscow. Izdatel'stvo "Lori" [Lori Publishing House]. 2021. 350 p. (In Russian).

13. Imashev S. A., Sychev V. N. *Otsenka vozmozhnostey primeneniya metodov fraktal'nogo analiza dlya issledovaniya geofizicheskikh dannykh. Chast' 1* [Assessment of the Possibilities of Applying Fractal Analysis Methods to Study Geophysical Data. Part 1]. *Obzor metodov otsenki parametra Khersta* [Review of Hurst parameter estimation methods]. *Vestnik KRSU* [Bulletin of KRSU]. 2017. T. 17. No. 5. Pp. 72-77. (In Russian).

14. Kirichenko L., Radivilova T. *Otsenivaniye parametra samopodobiya dlya statsionarnykh stokhasticheskikh protsessov* [Estimation of self-similarity parameter for stationary stochastic processes]. *International Journal "Information Content and Processing"* [International Journal "Information Content and Processing"]. 2018. V. 5. No. 1. Pp. 41-71. (In Russian).

15. Martynov G. V. *Statisticheskiye kriterii, osnovannyye na empiricheskikh protsessakh, i svyazannyye s nim voprosy* [Statistical criteria based on empirical processes and related issues]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika»* [Results of Science and Technology. Series "Probability Theory. Mathematical Statistics. Theoretical Cybernetics"]. 1992. V. 30. Pp. 3-112. (In Russian).

16. Lozina I. V., Yashin N. Yu. *Avtomatizirovannaya sistema identifikatsii zakonov raspredeleniya dvumernoy neyronnoy set'yu Kohonena* [Automated system for identification of distribution laws by a two-dimensional Kohonen neural network]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014. V. 16. No. 4 (2). Pp. 344-349. (In Russian).

Статья поступила 04 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Одоевский Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: моделирование и оптимизация мультисервисных сетей связи. E-mail: odse2017@mail.ru. SPIN-код автора 5609-8179.

Симонова Карина Олеговна – адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг сетевого трафика и качества обслуживания. E-mail: desire_8912@bk.ru.

Зизевский Вадим Алексеевич – адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: балансировка трафика в мультисервисных транспортных сетях. Тел.: 8(812)247-98-22. E-mail: vaz94vaz94@gmail.com. Адрес: 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3.

Analysis of the impact of the accuracy of monitoring network traffic parameters on the quality of its service

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

Annotation. To ensure the necessary quality of service for multimedia traffic in multiservice communication networks, various network mechanisms are used, the controlled parameters of which often depend on the parameters of the traffic being served that are controlled during monitoring. **The aim of the work** is to study the degree of influence of the accuracy of monitoring the parameters of self-similar multimedia traffic on the quality of its service when using network mechanisms for distributing this traffic along several routes together with congestion prevention mechanisms. **Research methods:** simulation of network mechanisms for processing self-similar traffic in multiservice network switching devices, methods for approximating statistical dependencies of self-similar traffic quality indicators on its parameters, analytical modeling of traffic distribution mechanisms along several routes, methods for solving optimization problems with a nonlinear objective function and constraints of controlled parameters, methods for measuring self-similar traffic parameters, methods for verifying statistical hypotheses about distribution functions, methods of conducting computational experiments and processing their results. **Novelty:** a new mathematical expression was used to approximate the statistical dependencies of the average delay on the controlled parameters of self-similar traffic and the controlled parameters of network traffic distribution mechanisms along several routes, which made it possible to analytically assess the degree of influence on the quality of traffic service (when using these network mechanisms) of the accuracy of monitoring its parameters. **Results:** graphoanalytic dependences of the average delay (traffic quality indicator) on the load were obtained when using traffic distribution mechanisms along three routes with different errors of the traffic parameters taken into account, reflecting the different accuracy of monitoring these parameters in the network. **Practical significance:** the obtained research results can be used to determine the requirements for monitoring systems for multimedia traffic parameters in multiservice communication networks.

Keywords: approximation, multimedia traffic, monitoring, simulation, traffic distribution along several routes.

Information about the authors

Sergey Mikhailovich Odoevsky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Communication Networks and Switching Systems. Military Academy of Communications named after Marshal Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: modeling and optimization of multiservice communication networks. E-mail: odse2017@mail.ru

Karina Olegovna Simonova – an Associate Professor of the Department of Communication Networks and Switching Systems. Military Academy of Communications named after Marshal Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: monitoring network traffic and quality of service. E-mail: desire_8912@bk.ru

Vadim Alekseyevich Zizevsky – an Associate Professor of the Department of Communication Networks and Switching Systems. Military Academy of Communications named after Marshal Soviet Union S.M. Budyonny. Research interests: traffic balancing in multiservice transport networks. E-mail: vaz94vaz94@gmail.com. Tel. 8(812)247-98-22. Address: 194064, St.Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

Библиографическая ссылка на статью:

Одоевский С. М., Симонова К. О., Зизевский В. А. Анализ влияния точности мониторинга параметров сетевого трафика на качество его обслуживания // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 8-19. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-8-19

Reference for citation:

Odoevsky S. M., Simonova K. O., Zizevsky V. A. Analysis of the impact of the accuracy of monitoring network traffic parameters on the quality of its service. Means of Communications Equipment. 2024. No. 4 (168). Pp. 8-19. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-8-19 (in Russian)

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396.91

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-20-27

Пассивная синхронизация в сетях декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот

Путилин А. Н., Шаптала В. С.

Аннотация. *Актуальность:* технология функционирования сети декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот требует обеспечения синхронной работы всех станций сети. Сетевая синхронизация радиостанции при вводе в эксплуатацию может быть обеспечена в активном режиме, с выходом в эфир, по рабочим сигналам работающих станций сети. Однако, для некоторых видов защищенных сетей, активный режим сетевой синхронизации оказывается нежелательным. Глобальные навигационные системы GPS и Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС могут быть подавлены, что ограничивает возможность синхронизации рассматриваемых сетей по их каналам. Возможна реализация собственной системы пассивной сетевой синхронизации, которая потребует определения координат взаимодействующих радиостанций. Синхронизация по сигналам точного времени в декаметровом диапазоне не требует размещения в комплекте радиостанции, однако её точность может оказаться недостаточной в силу специфики распространения радиоволн в данном диапазоне. Также предметом рассмотрения в работе является импульсно-фазовая радионавигационная система Чайка, обеспечивающая одновременное решение задач навигации и привязки к точному времени. **Целью работы является:** исследование алгоритмов пассивной сетевой синхронизации радиостанций сети декаметрового радиосвязи при вводе в эксплуатацию. **Новизна работы** состоит в оценке своевременности обеспечения сетевой синхронизации радиостанций при вводе их в эксплуатацию. **Получены следующие результаты:** приведено рациональное обоснование выбора способа сетевой синхронизации, дано сравнение эффективности функционирования различных способов синхронизации. **Практическая значимость** состоит в возможности обоснованного выбора способа сетевой синхронизации радиостанций сети декаметрового радиосвязи.

Ключевые слова: сеть декаметрового радиосвязи, пассивная сетевая синхронизация, псевдослучайное переключение рабочих частот.

Введение

Проблема сетевой синхронизации радиостанции сети декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот (ППРЧ) связана с количеством каналов приема, одновременно реализуемым в приемнике и демодуляторе. Если реализуется одновременный прием и демодуляция всех частот в пакете переключения, то проблема сетевой синхронизации отсутствует. Такой приемник может одновременно отслеживать все сеансы связи между любой парой абонентов сети. Реализация одновременного приема всех частот может основываться на использовании приемника прямого цифрового преобразования с широкой полосой входного сигнала или на использовании пакета независимых приемников с преселекторами на входе. Для систем декаметрового радиосвязи специального назначения предпочтительным оказывается второй путь, поскольку широкополосный приемник может быть заблокирован импульсной помехой. Однако, размещение на мобильных средствах пула приемных устройств (от 8 и более) потребует существенного увеличения габаритов и энергопотребления аппаратуры радиостанции.

В работе [1] рассмотрена и практически проверена работа радиостанции с двумя каналами приема, оптимальной по ресурсу аппаратных средств для режима ППРЧ.

Использование двухканального приемника требует временных затрат на поиск сигналов синхронных станций радиосети. Алгоритм поиска синхронной станции сети будет рассмотрен ниже.

Специализированные радиостанции Государственной службы и частоты, работают в диапазонах низких, средних и высоких (КВ) частот. В аппаратуре передачи данных (АПД) радиостанции декаметрового диапазона демодулятор сигналов радиостанции единого времени может быть реализован без изменения аппаратной части, на программном уровне. Прием сигналов точного времени в других диапазонах потребует включения в состав аппаратуры радиостанции дополнительного приемника, либо модификации используемого для расширения принимаемого диапазона частот.

Импульсно-фазовая радионавигационная система длинноволнового (ДВ) диапазона «Чайка» предназначенная для определения координат кораблей и самолетов с погрешностью до 50...100 м, также может использоваться для синхронизации по времени. В силу постоянной работы радиостанций системы на излучение может быть обеспечена высокая своевременность.

Сетевая синхронизация от глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) наиболее часто реализуется для решения представленной задачи. Возможности её реализации достаточно подробно изучены и, поэтому, не будут рассматриваться в рамках данной работы подробно. ГЛОНАСС может обеспечить высокую оперативность сетевой синхронизации для исследуемых радиосетей только при отсутствии воздействия преднамеренных помех или использования в приемниках алгоритмов защиты принимаемых навигационных сигналов.

Требования к сетевой синхронизации радиостанций

Рациональный выбор периодов следования слотов сигнала на одной частоте в радиопереносах декаметрового диапазона с ППРЧ определяется допустимой разностью хода лучей распространения радиоволн и размером зоны покрытия радиосети [1]. Для зоны 3000 км время распространения сигнала от периферии до центра составит 10 мс. Величину защитного интервала выбирают 2,5 мс, поскольку разность хода лучей в декаметровом диапазоне не превосходит её с вероятностью выше 0,95 [2]. Это определяет необходимость выбора окна захвата в двухканальном приемнике 12,5 мс до начала слота и столько же – после.

Для гарантированного попадания слотов сигналов в окно захвата сигнала приемником сетевая синхронизация должна обеспечить точность переключения фазы ППРЧ на порядок выше, чем величина возможного сдвига сигнала в окне захвата. Это приводит к требованию обеспечения сетевой синхронизации с точностью выше 1 мс.

Вероятность установления сетевой синхронизации должна быть высокой, не менее 0,95, поскольку её отсутствие гарантированно переводит станцию в источник помех для сети. Время установления сетевой синхронизации в пассивном режиме не должно значительно превышать время синхронизации в активном режиме [1]. На пакете из 16 частот в активном режиме цикл сетевой синхронизации занимает до 3,5 секунд. Приемлемое время сетевой синхронизации в пассивном режиме должно составлять не более 1 минуты.

Алгоритм поиска синхронной станции сети

Для пассивного поиска приемником станции, передающей сигнал сетевой синхронизации, необходимо знание расписания работы станции (станций) сети, передающих маркерный сигнал сетевой синхронизации.

Если для захвата сигнала без знания фазы переключения частот удерживать приемник на каждой рабочей частоте K слотов, то вероятность совпадения фазы переключения рабочих частот составит

$$P_{\text{совп}} = 1 - (1 - 1/N)^K,$$

где N – число рабочих частот в пакете переключения,
 $K = T_{\text{синх}} / (V_{\text{ППРЧ}} N)$,
 $T_{\text{синх}}$ – допустимое время сетевой синхронизации,
 $V_{\text{ППРЧ}}$ – скорость переключения рабочих частот.

При работе ППРЧ-20 на 16 рабочих частотах вероятность совпадения фазы переключения составит 0.992, а на 32 – 0,691.

Вероятность захвата сигнала будет определяться долей пригодных для данного радионаправления частот в пакете переключения:

$$P_{\text{захв}} = P_{\text{совп}} (N_{\text{приг}} / N) = (1 - (1 - 1/N)^K) N_{\text{приг}} / N.$$

При рациональном выборе рабочих частот в пакет переключения $N_{\text{приг}}/N$ находится в районе $0.75 \pm 0,05$.

Захват сигнала обеспечит сетевую синхронизацию радиостанции. Вероятность этого события при последовательном переключении приемника по всем рабочим частотам определяется как $P_{\text{захв}}^N = 1 - (1 - P_{\text{захв}})^N$. Практически она всегда равна единице. Захват сигнала обеспечивает синхронизацию с точностью до времени распространения сигнала, поэтому в сигнале сетевой синхронизации должна содержаться информация о местоположении маркерной станции. Также абонентский приемник должен знать свое местоположение. Дальность распространения радиоволны с отражением от ионосферы определяется по соотношениям, определенным в [3]. Ошибка дальности, возникающая из-за многолучевости распространения сигнала в данном алгоритме, не может быть компенсирована, поэтому точность синхронизации следует оценить на уровне 2,5 мс

Поиск сигналов службы единого времени

Для передачи эталонных сигналов Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) использует разветвленную сеть средств передачи, которая включает в себя радиостанции ОНЧ, НЧ и ВЧ диапазонов, а также ГЛОНАСС, телевидение и сеть звукового вещания. Все эталонные сигналы времени, формируются в соответствии с ГОСТ 8.129-83 и ГОСТ 8.515— 2016 [4, 5].

Для передачи эталонных сигналов в КВ диапазоне государственная служба времени и частоты использует многоканальный передатчик эталонного сигнала времени «Москва». Параметры передатчика приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры передатчика эталонных сигналов частоты и времени

Частота (кГц)	Мощность (кВт)	Позывной	Местонахождение	Координаты	Организация
66.6	10	RWM	Москва	55.48' с.ш. 38.18' в.д.	ФГУП «ВНИИФТРИ»
4996	5				
9996	5				
14996	8				

Радиоволны КВ диапазона распространяются в основном при помощи отражения от ионизированных слоев F_1 и F_2 , которые расположены на высотах 160-400 км. Сезонные, суточные и случайные изменения концентрации электронов приводят к значительным флуктуациям высоты отражения радиосигналов. Такой механизм распространения радиоволн ограничивает точность синхронизации мер времени погрешностью до 0,3-2 мс. Задержка радиосигналов ВЧ диапазона может быть определена (в мс) с помощью эмпирической формулы

$$t_p = 0,9 + 3,25 L/1000,$$

где L – расстояние между передатчиком и приемником, вычисленное по дуге большого круга Земли, км. Для расстояний 500-5000 км погрешность определения не превышает 1 – 2 мс.

Таким образом, синхронизация радиостанции рассматриваемой сети по сигналам радиостанций точного времени потребует программной реализации в АПД демодулятора сигналов точного времени, а также включения в её состав навигационной аппаратуры.

Территориальное покрытие станций точного времени в КВ диапазоне достаточно широкое, однако энергетическая доступность приемника сигналов точного времени зависит от его расположения, сезона и времени суток. Наибольший вклад в обеспечение надежности сигналов точного времени вносит передатчик «Москва». Он обеспечивает в зоне 5000 км прием сигналов на одной из трех частот с вероятностью выше 0,95. Однако, сигналы точного времени могут быть подавлены преднамеренными помехами, Для этого, необходимы 3 станции постановки помех.

Синхронизация по сигналам импульсно-фазовой радионавигационной системы «Чайка»

Импульсно-фазовая радионавигационная система «Чайка» (ИФРНС) длинноволнового диапазона, предназначенная для определения координат самолётов и кораблей [6-8]. Система является российским аналогом американской системы «Loran-C». На рис. 1 [10] показано покрытие навигационного поля систем «Чайка» и «Loran-C». Развитием данной системы является проектируемая в настоящее время в России ИФРНС «Скорпион».

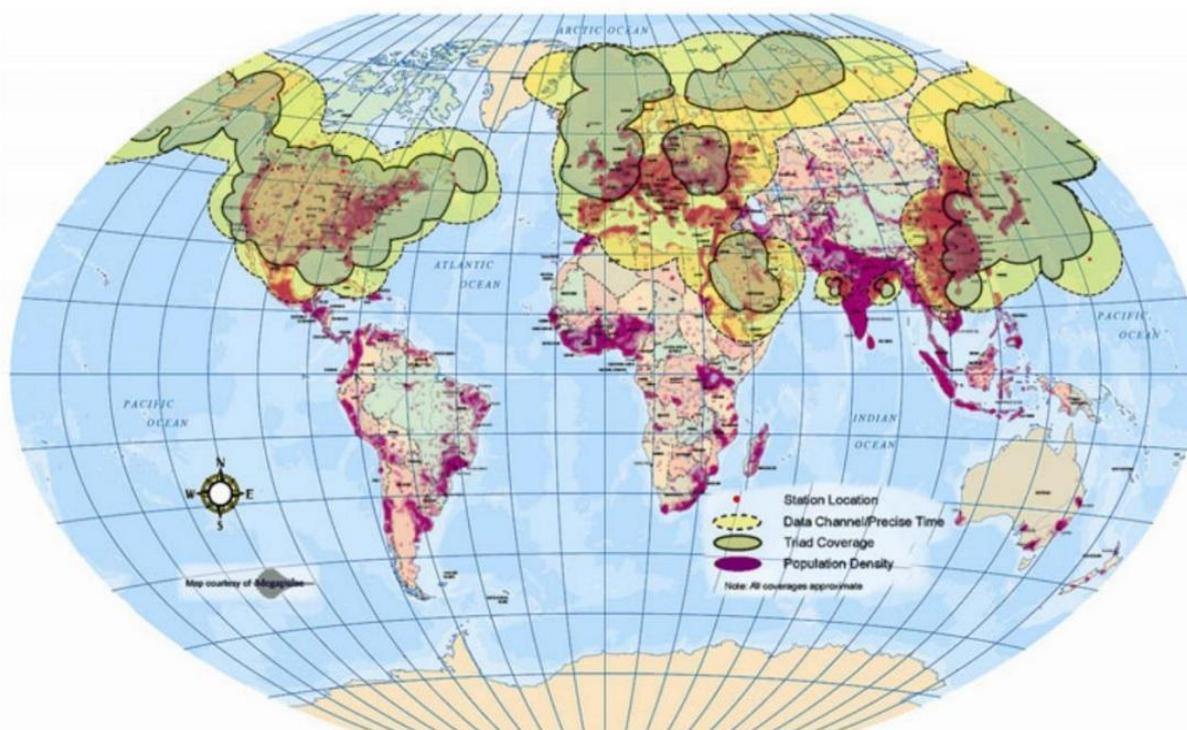


Рис. 1. Покрытие навигационного поля систем «Чайка» и «Loran – C»

Передающие станции ИФРНС «Чайка» и «Loran-C» объединяются в цепи от трех до шести станций. Каждая цепочка имеет свой уникальный период повторения импульсов – *Group Repetition Interval (GRI)*, изменяющийся от 40 000 до — 99 990 мкс с шагом 10 мкс. На территории России существует 5 цепей «Чайки», построенных на базе передатчиков мощностью от 450 до 700 кВт с высотой антенн до 130 м. Это *GRI 8000* — Европейская цепь (период повторения 80 мкс), *GRI 7950* — Восточная цепь, *GRI 5980* — Российско-Американская цепь в Беринговом море, *GRI 5960* — Северная цепь, *GRI 4970* — Северо-Западная цепь, а также Северо-Кавказская, Южно-Уральская, Сибирская, Ангарская,

Саянская, Забайкальская, Дальневосточная цепи построенные на базе маломощных мобильных станций радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-10).

В каждой цепи есть главная станция и подчиненные, использующие взаимно подстраиваемые высокостабильные опорные генераторы. Сигналы станций излучаются в эфир на частоте 100 кГц в порядке следования станций в цепи *GRI*. Для идентификации станций используется маска фазо-кодированного интервала и установленный порядок излучения станциями. Излученный сигнал включает 9 посылок для главной станции и 8 для подчинённых, рис. 2 [10-12].

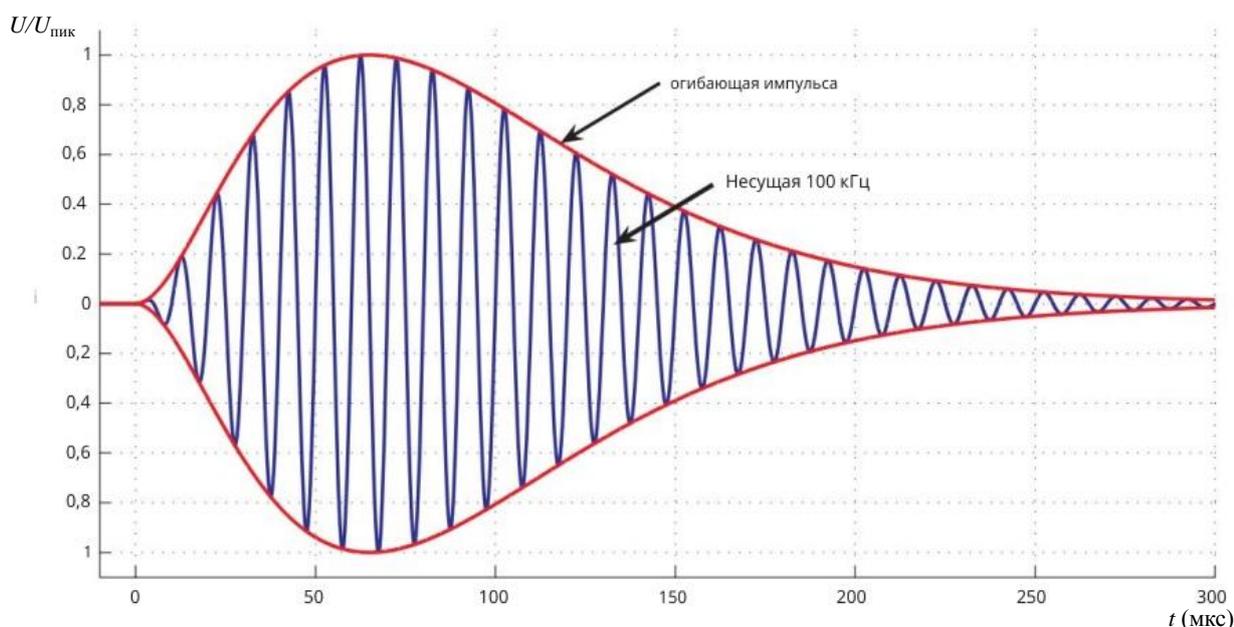


Рис. 2. Форма импульса «Loran-C»

Определение местоположения абонентской станции происходит разностно-дальномерным способом, по разности времени прихода сигналов от различных станций цепи. Также сигналы *GRI* используются для передачи контрольно-корректирующей информации (ККИ) глобальных навигационных спутниковых систем и другой оперативной информации с помощью опорных станций. Технология получила название *Eurofix* [9]. *Eurofix* использует трехступенчатую импульсную позиционную модуляцию (PPM) на последних шести из восьми импульсов *GRI*. Сообщение *Eurofix* имеет длину 30 *GRI*, содержащих фактически 56 бит данных. В зависимости от *GRI* это приводит к скорости передачи данных от 18,7 до 46,7 бит/с. *Eurofix* стандартизирован МСЭ и продемонстрировал успешную демодуляцию на расстояниях до 2000 км, рис. 1. Передача данных ведется по протоколу *RTCM SC-104 V2.3* [9]. В сообщении *\$GNRMC* первое поле – «Время фиксации UTC» на передатчике.

Таким образом, с помощью систем ИФРНС «Чайка» и «Loran-C» радиостанция сети декаметровая радиосвязи с ППРЧ может определить текущее время как по сообщениям *Eurofix*, так и по времени прихода фронта волны от передатчиков ИФРНС. Требуемая компенсация времени распространения волны, в отличие от диапазона КВ будет очень точной. А диапазоне ДВ земная волна опережает ионосферную, поэтому все измерения параметров сигналов в ИФРНС происходят только по переднему фронту. Следует отметить, что подавление ИФРН «Чайка» и «Loran-C» практически невозможно в силу высокой мощности передатчиков, из большого числа и дальнего распространения радиоволн ДВ диапазона. В силу этого в настоящее время происходит модернизация данных систем навигации в США, Германии и России.

Заключение

В табл. 2 приведен сравнительный анализ способов пассивной сетевой синхронизации в сети декаметровая радиосвязи с ППРЧ. Обоснованным выше требованиям к сетевой синхронизации удовлетворяют только ГЛОНАСС и ИФРНС.

Таблица 2 – Сравнительный анализ способов пассивной сетевой синхронизации в сети декаметровая радиосвязи с ППРЧ

№ п/п	Способ сетевой синхронизации	Необходимость использования дополнительного оборудования	Устойчивость к преднамеренным помехам	Точность сетевой синхронизации, мс	Доступность каналов сетевой синхронизации
1.	ГЛОНАСС	Да	Низкая	$\ll 1$	Высокая
2.	Синхронизация по рабочим сигналам дежурной станции сети	Да	Высокая	$< 2,5$	Высокая
3.	Синхронизация по сигналам службы единого времени КВ диапазона	Да	Средняя	< 2	Средняя
4.	Синхронизация по сигналам ИФРНС «Чайка» и «Loran-C»	Да	Высокая	$\ll 1$	Высокая

Однако ИФРНС уступая ГЛОНАСС по точности позиционирования (50-100 м) превосходят ГЛОНАСС по устойчивости к помехам. В связи с этим представляет интерес рассмотрение программной реализации приемника с функциями, необходимыми для АПД радиостанции с ППРЧ.

Литература

1. Панин Р. С., Путилин А. Н. Хвостунов Ю. С. Использование частотного ресурса системой декаметровая радиосвязи в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Техника средств связи. 2020. № 3 (151). С. 2-13.
2. Рекомендация ITU-R F.1487 «Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators», Geneva, 2010: URL: <https://itu.int>.
3. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. – Москва: Советское Радио, 1979.
4. ГОСТ 8.129-83 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты, Москва, 1985.
5. ГОСТ 8.515—2016 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталонные сигналы частоты и времени, излучаемые специализированными радиостанциями государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения. Временной код. – Москва: Стандартинформ, 2016.
6. ГОСТ Р 54025 (МЭК 61075:1991) Система радионавигационная «Чайка». Приемные устройства. Требования к техническим характеристикам. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2011.
7. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships — Minimum performance standards — Methods of testing and required test results.
8. ГОСТ Р 53168—2008 Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2020.

9. ГОСТ Р 53169- 2008 Система радионавигационная «Чайка». Формат передачи контрольно-корректирующей информации потребителям глобальных навигационных спутниковых систем. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2009.

10. Pelgrum W.J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.

11. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000. V. 36. Pp. 290-291.

12. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors. MDPI. 2020. V. 20. Pp. 23-29.

References

1. Panin R. S., Putilin A. N. Khvostunov Yu. S. Use of frequency resource by decimeter communication system in pseudorandom operation frequency tuning mode. Means of communication equipment. 2020. No. 3 (151). Pp. 2-13. (In Russian).

2. Recommendation ITU-R F.1487 "Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators". Geneva. 2010. URL: <https://itu.int>.

3. Kinkulkin I. E., Rubtsov V. D., Fabric M. A. *Fazovyj metod opredeleniya koordinat* [Phase method for determining coordinates]. Moscow. *Sovetskoe Radio* [Sov. Radio]. 1979. (In Russian).

4. GOST 8.129-83 State system for ensuring the uniformity of measurements. State primary standard and state verification scheme for time and frequency measuring instruments. Moscow. Standartinform. 1985. (In Russian).

5. GOST 8.515—2016 State system for ensuring the uniformity of measurements. Frequency and time reference signals emitted by specialized radio stations of the state time, frequency and rotation parameter determination service. Time code. Moscow. Standartinform. 2016. (In Russian).

6. GOST R 54025 (IEC 61075:1991) Chaika radio navigation system. Receiving devices. Requirements for technical characteristics. Test methods and required test results. Moscow. Standartinform. 2011. (In Russian).

7. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships — Minimum performance standards — Methods of testing and required test results.

8. GOST R 53168-2008 Chaika radio navigation system. Signals of transmitting stations. Technical requirements. Moscow. Standartinform. 2020. (In Russian).

9. GOST R 53169-2008 Chaika radio navigation system. Format for transmitting control and correction information to consumers of global navigation satellite systems. General technical requirements. Moscow. Standartinform. 2009. (In Russian).

10. Pelgrum W.J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.

11. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000. V. 36. Pp. 290-291.

12. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors. MDPI. 2020. V. 20. Pp. 23-29.

Статья поступила 01 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Путилин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник научно-технического центра. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: передача данных по радио, системы множественного доступа. Тел.: +7(812)448-19-01. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru.

Шаптала Василий Сергеевич – кандидат технических наук. Начальник отдела научно-технического центра. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: передача данных по радио, моделирование радиоканалов. Тел.: +7(812)448-19-01. E-mail: ShaptalaVS@inteltech.ru.

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

Passive synchronization in decameter radio networks with pseudo-random switching of operating frequencies

A. N. Putilin, V. S. Shaptala

Abstract: *The technology of providing a decameter radio network with pseudo-random switching of the operating frequency requires ensuring synchronous operation of all networks. Network synchronization of a radio station upon entering the device can be provided in the active mode, with going on the air, when switching on signals operating in the network. However, for some types of protected networks, the active mode of network synchronization is undesirable. Global navigation systems GPS and GLONASS can be switched off, which limits the possibility of synchronizing networks by their channels. It is possible to implement our own passive network synchronization system, which will require determining the coordinates of the interacting radio stations. Synchronization by precise time signals in the decameter range does not require placement in the included radio station, but its accuracy may require insufficient strength of the specific radio waves in this case. Also included in the consideration in the work is the pulse-phase radio navigation system Chaika, which provides simultaneous solution of navigation problems and binding to precise time. **The purpose of the work is:** to study the algorithms of passive network synchronization of radio stations of a decameter radio network upon entering into power supply. **The novelty of the work** consists in ensuring the timeliness of providing radio stations with network synchronization upon their commissioning. **The following results are obtained:** a reasonable justification for the choice of the network synchronization method is given, a comparison of the efficiency of various synchronization methods is given. **Practical innovation** consists in the possibility of a reasonable choice of the path of network synchronization of radio stations of a decameter radio network.*

Keywords: *Decameter radio network, passive network synchronization, pseudo-random switching of the operating frequency.*

Information about the Authors

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

Vasily Sergeevich Shaptala – Candidate of Technical Sciences. Head of Department of the Scientific and Technical Center of PJSC Inteltech. Research interests: radio data transmission, radio channel modeling. Tel.: +7(812)448-19-01. E-mail: ShaptalaVS@inteltech.ru.

Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

Библиографическая ссылка на статью:

Путилин А. Н., Шаптала В. С. Пассивная синхронизация в сетях декаметровой радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 20-27. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-20-27

Reference for citation:

Putilin A. N., Shaptala V. S. Passive synchronization in decameter radio networks with pseudo-random switching of operating frequencies. Means of communications equipment. 2024. No. 4 (168). Pp. 20-27. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-20-27 (in Russian).

Программная реализация демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы

Иванов Д. В., Путилин А. Н., Сыроветник Д. С., Царик И. В.

Аннотация. Обеспечение синхронной работы всех станций сети декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот является неременным условием её функционирования. Использование для этой цели глобальных навигационных системы GPS и ГЛОНАСС не всегда возможно. Их сигналы могут быть подавлены, заглушены или искажены. Синхронизация станций внутри сети, заключающаяся в определении текущего взаимного смещения их опорных генераторов, требует перехода в режим излучения и временного отключения всех передатчиков сети за исключением передатчиков синхронизирующихся станций. Такой алгоритм требует некоторых временных затрат и для некоторых видов сетей специального назначения может оказаться нежелательным. Наиболее приемлемым вариантом представляется одновременное решение задач навигации, и привязки к точному времени путем использования сигналов региональных импульсно-фазовых радионавигационных систем. Их сигналы длинноволнового диапазона могут распространяться на дальние расстояния, их станции имеют высокую мощность. Сигналы передатчиков региональных импульсно-фазовых радионавигационных систем практически не могут быть подавлены в силу их большого числа и технической сложности реализации постановки помех в длинноволновом диапазоне. **Целью работы является:** исследование возможности программной реализации демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы для обеспечения сетевой синхронизации радиостанций сети декаметрового радиосвязи при вводе в эксплуатацию. **Новизна работы** состоит в оценке точности и своевременности обеспечения сетевой синхронизации радиостанций при вводе их в эксплуатацию. **Получены следующие результаты:** приведено обоснование порядка обработки сигнала в демодуляторе импульсно-фазовой радионавигационной системы, определены этапы обработки сигналов, являющиеся критическими для эксплуатационных характеристик демодулятора. **Практическая значимость** состоит в возможности обеспечения сетевой синхронизации радиостанций сети декаметрового радиосвязи в любых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: демодулятор, пассивная сетевая синхронизация, радионавигационная система, сеть декаметрового радиосвязи.

Введение

Региональная импульсно-фазовая радионавигационная система (ИФРНС) длинноволнового диапазона «Чайка» предназначенная для определения координат кораблей и самолетов с погрешностью до 50...100 м, также может использоваться для синхронизации по времени. Её аналогом является зарубежная система «Loran-C». Формирование навигационных сигналов в передатчиках «Чайки» и «Loran-C» выполнено по единому стандарту. Передатчики этих систем могут работать совместно в единой цепи. ИФРНС – общее обозначение навигационной системы, безотносительно к размещению её в составе систем «Чайка» или «Loran-C».

Обоснование выбора ИФРНС для решения задачи пассивной синхронизации в сетях декаметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот приведено в работе [1]. Описание порядка и особенностей формирования сигналов ИФРНС представлено в [2-7]. Анализ записей реальных сигналов производился с помощью программной модели демодулятора ИФРНС, выполненной на языке программирования Python. При этом использована библиотека с открытым исходным кодом NumPy. Ниже анализ будет проводиться в соответствии с последовательностью обработки входного сигнала, реализованной в данной модели. Входной сигнал является вещественным, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 14 разрядов, частота дискретизации 400 кГц. Каждая

региональная цепь передатчиков ИФРНС имеет свой уникальный период повторения импульсов – *Group Repetition Interval (GRI)*. В исследуемой записи присутствуют сигналы *GRI 8000* – Европейской цепи с периодом повторения 80 мс.

Порядок и результаты обработки сигналов ИФРНС

На рис. 1 представлен входной сигнал ИФРНС во времени. На рис. 2 представлен спектр сигнала ИФРНС в вещественном, аналитическом видах и после фильтрации цифровым полосовым фильтром Ремеза (библиотека *NumPy*) с частотами среза 90 и 110 кГц.

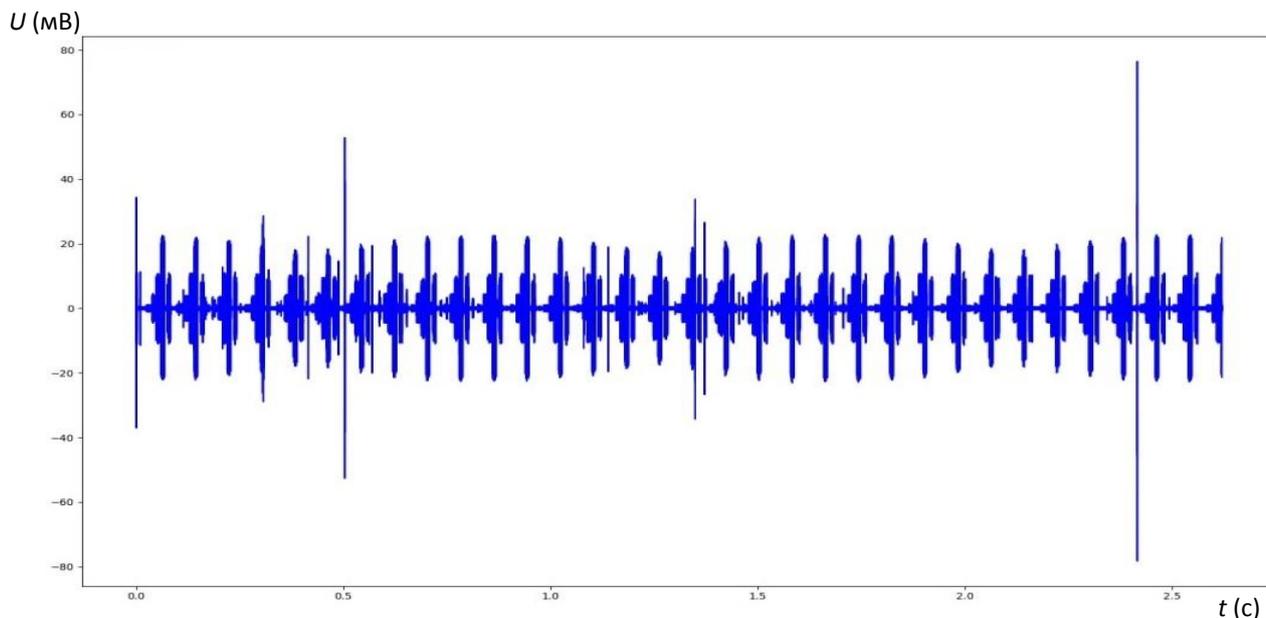


Рис. 1. Входной сигнал

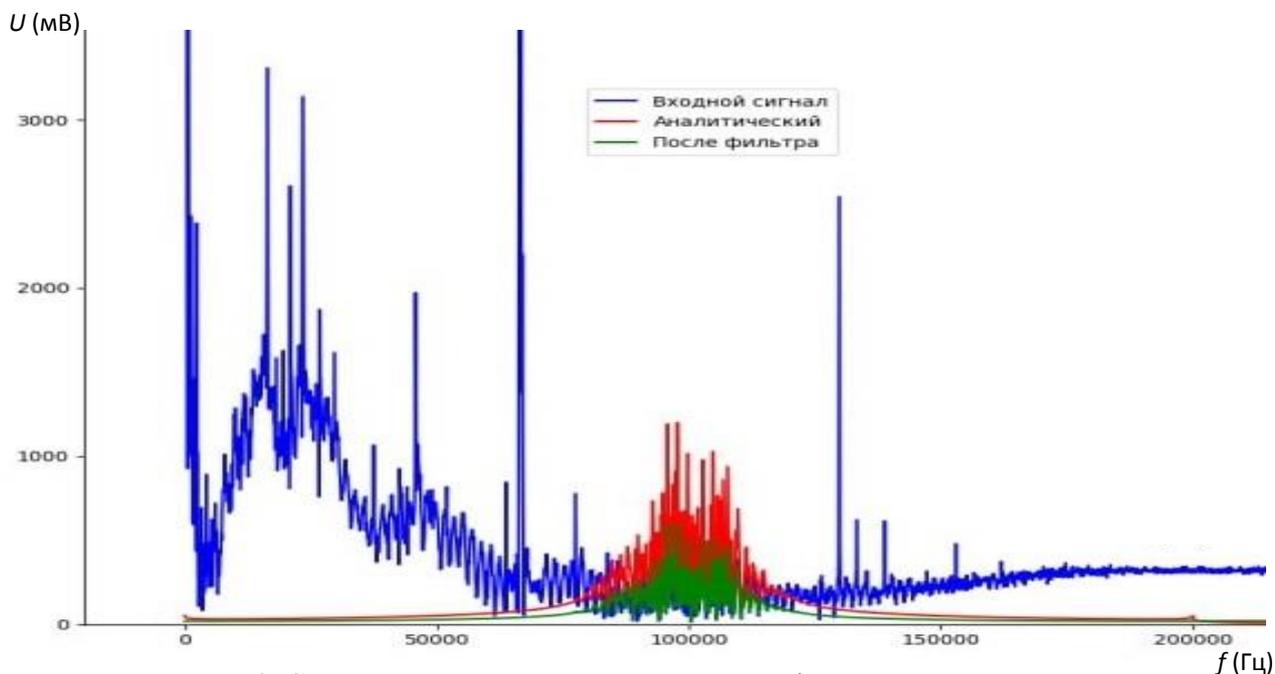


Рис. 2. Спектры входного, аналитического и отфильтрованного сигнала

Следует отметить, что внеполосные излучения (см. рис. 2) и сосредоточенные импульсные помехи (см. рис. 1) имеют большую энергетику. Для обеспечения эффективной работы приемника на входе АЦП должен быть реализован аналоговый преселектор с высокой частотной избирательностью и подавлением не менее чем на 20 дБ.

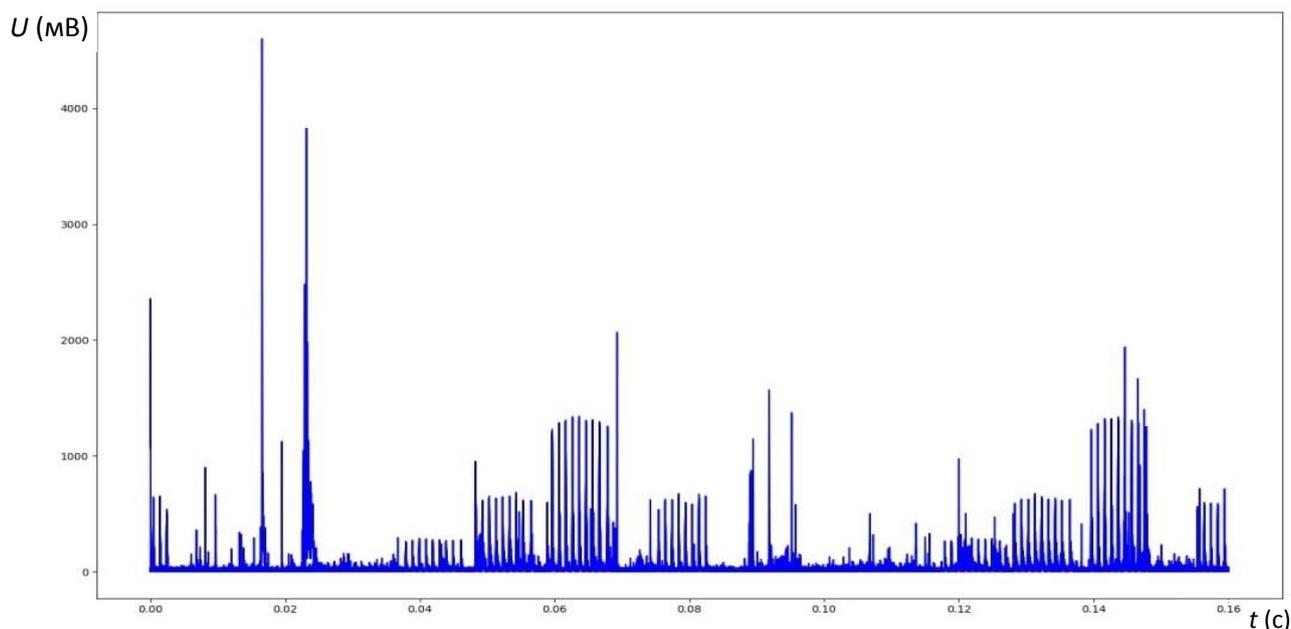


Рис. 3. Огибающая сигналов цепи GRI 8000 и помехи на интервале $2 \times GRI = 160$ мс

На рис. 3 представлена огибающая аналитического сигнала во времени на периоде излучения $2 \times GRI$, периоды A и B , [3, 5]. В сигнале присутствуют импульсные помехи, попавшие в полосу фильтра. Для очистки аналитического сигнала от импульсных помех выполняется накопление выборки сигнала с периодом повторения 80 мс, соответствующего GRI 8000. На записи сигнала 2,5 с присутствует 15 повторений $2 \times GRI$. На рис. 4 представлены накопленные огибающие сигнала одной станции с помехами, на рис. 5 накопленные огибающие цепи станций. Красной линией отмечено математическое ожидание по ансамблю реализаций.

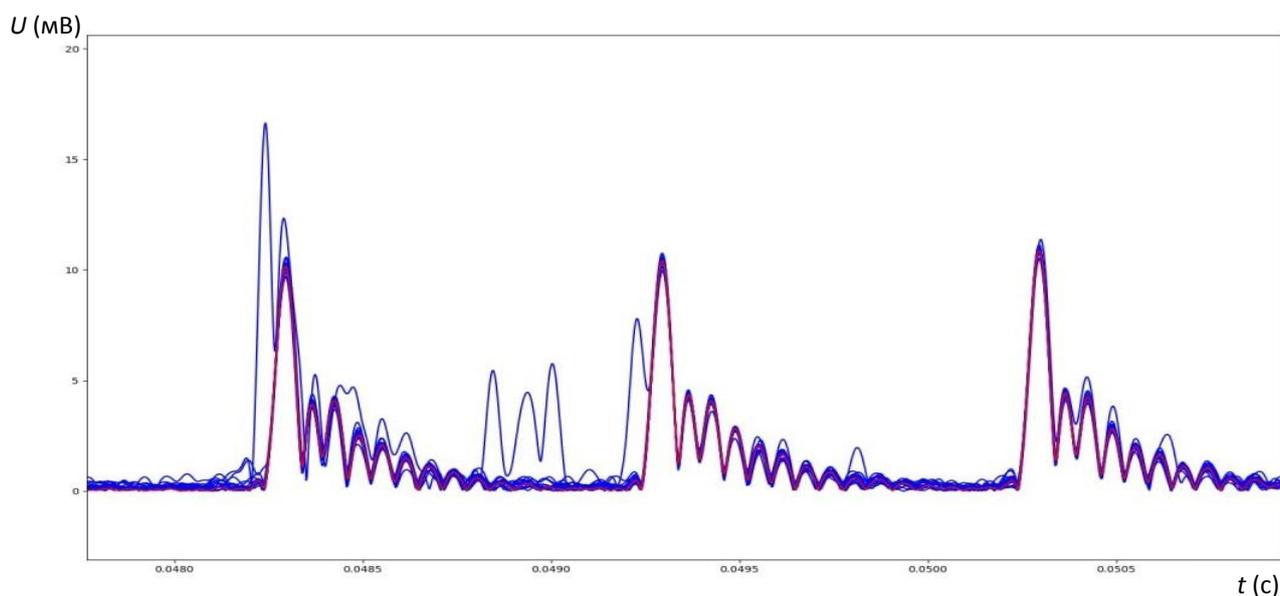


Рис. 4. Огибающая трех импульсов одной станции с помехами

Сигналы цепи регулярно повторяются, помехи – нет. Повторяющиеся сигналы GRI 8000 красного цвета, прочие – синего (помехи). Данная операция также позволяет выполнить компенсацию смещения частоты опорного генератора приемника поиском смещения, при котором энергия накопленной огибающей максимальна.

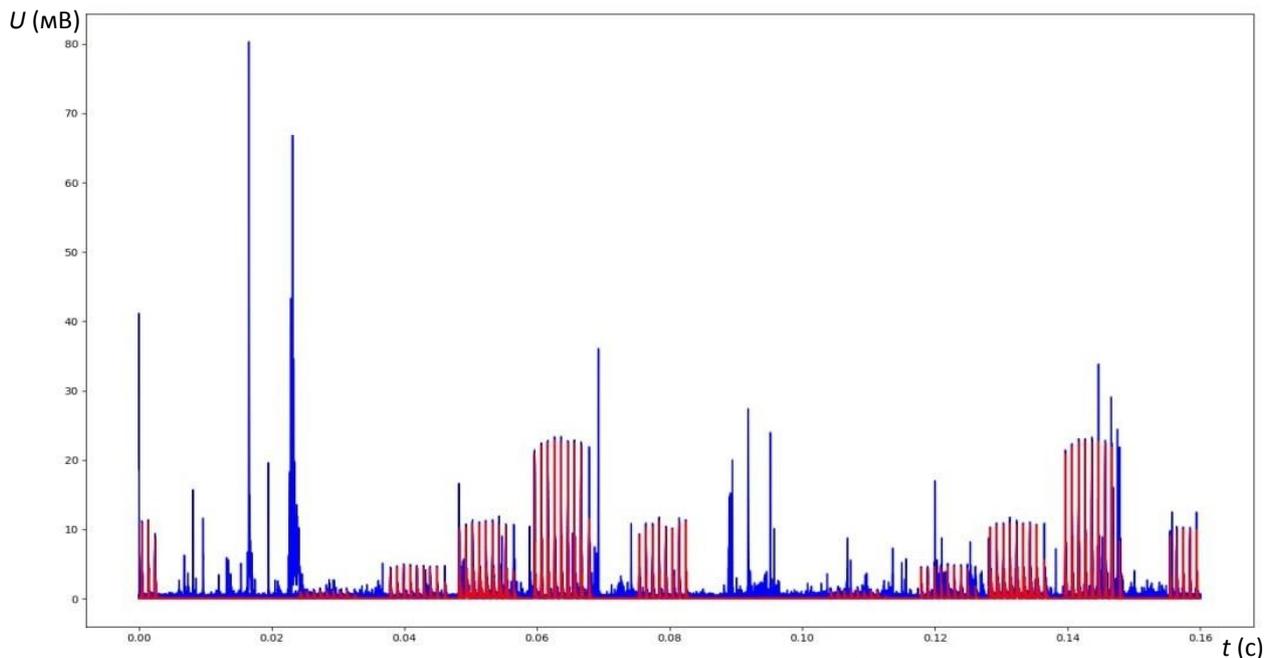


Рис. 5. Огибающая сигналов цепи *GRI 8000* и помех с идентификацией помех и сигналов

Для очистки накопленной выборки аналитического сигнала от импульсных помех используется эвристический алгоритм — отбрасывание отсчетов с амплитудой, превышающей текущее среднее значение амплитуды (математическое ожидание) на величину, большую дисперсии амплитуды. Результат представлен на рис. 6, период — $1 \times GRI$.

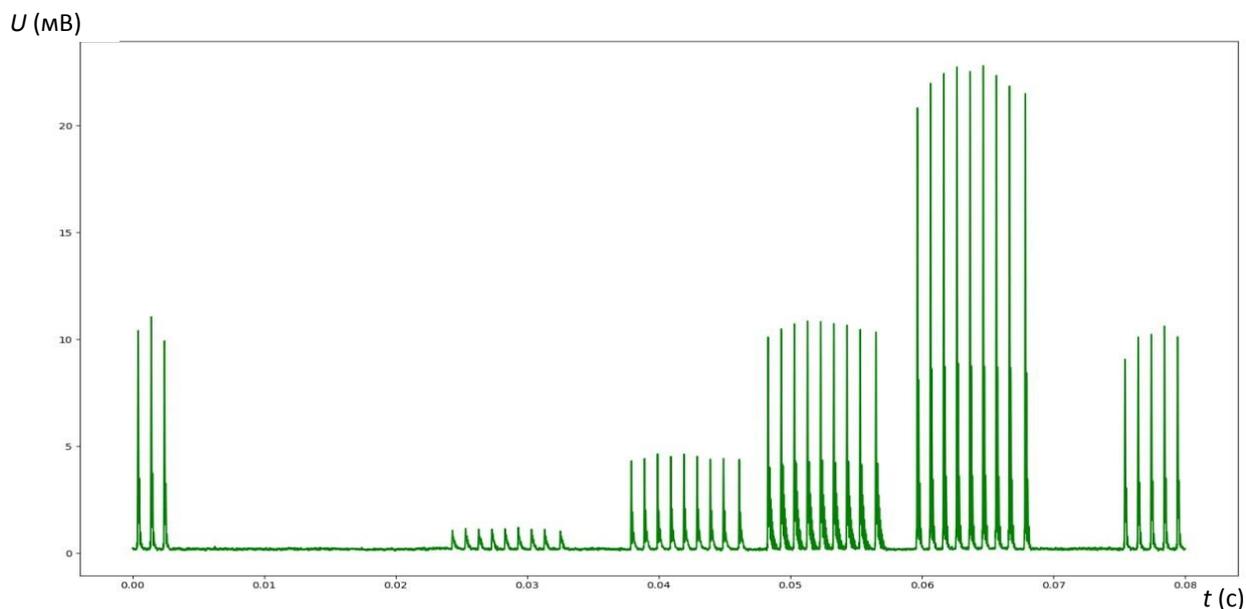


Рис. 6. Очищенная от помех огибающая сигналов цепи *GRI 8000*

Далее необходима идентификация станций цепи. Для этого в [5] используется маска переключения начальных фаз. У ведущей и ведомых станций маски различаются на периодах *GRI A* и *GRI B*. На рис. 7 представлена накопленная огибающая и несущая одного импульса одной станции: а) без подстройки частоты, б) с подстройкой частоты, в) с подстройкой частоты несущего колебания и частоты дискретизации. На рис. 8 представлена серия импульсов от одной станции: огибающая и начальные фазы полувольт. Красным цветом показаны начальные фазы 9-ти импульсов, соответствующие маске главной станции цепочки, период *GRI-A*.

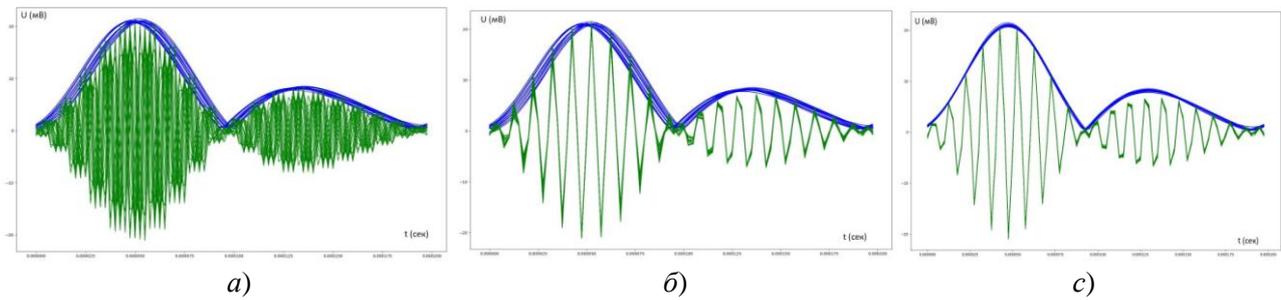


Рис. 7. Накопленная огибающая и несущая одного импульса одной станции: а) без подстройки частоты; б) с подстройкой частоты; с) с подстройкой частоты несущего колебания и частоты дискретизации

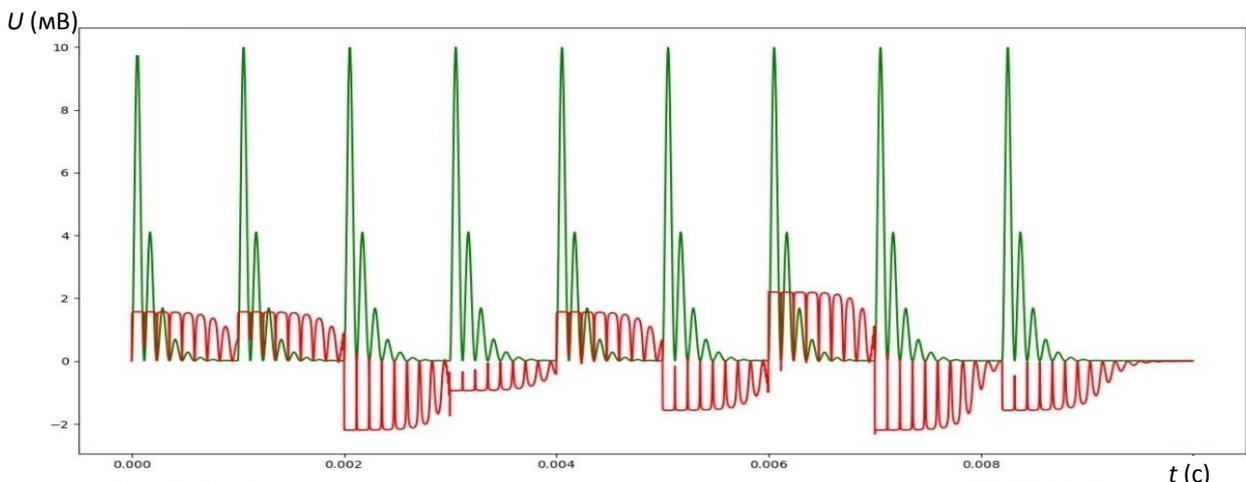


Рис. 8. Огибающая и начальные фазы сигналов главной станции цепи *GRI 8000* (Брянск) на периоде *GRI-A*

Так определяется главная станция. В цепи *GRI 8000* – это Брянск (Карачевский район), затем следуют Петрозаводск (Карелия, пос. Пряжа), Минск (г. Слоним, Белоруссия), Симферополь (Крым, пос. Плодовое), Самара (пос. Балашлейка). На рис. 6 Брянск – четвертая группа импульсов. Далее направо Карелия и проч. Слоним – пять последних импульсов и два в начале периода. Следует заметить, что при отсутствии в цепи сигналов одной или двух станций идентификация должна производиться по порядку следования импульсов во времени.

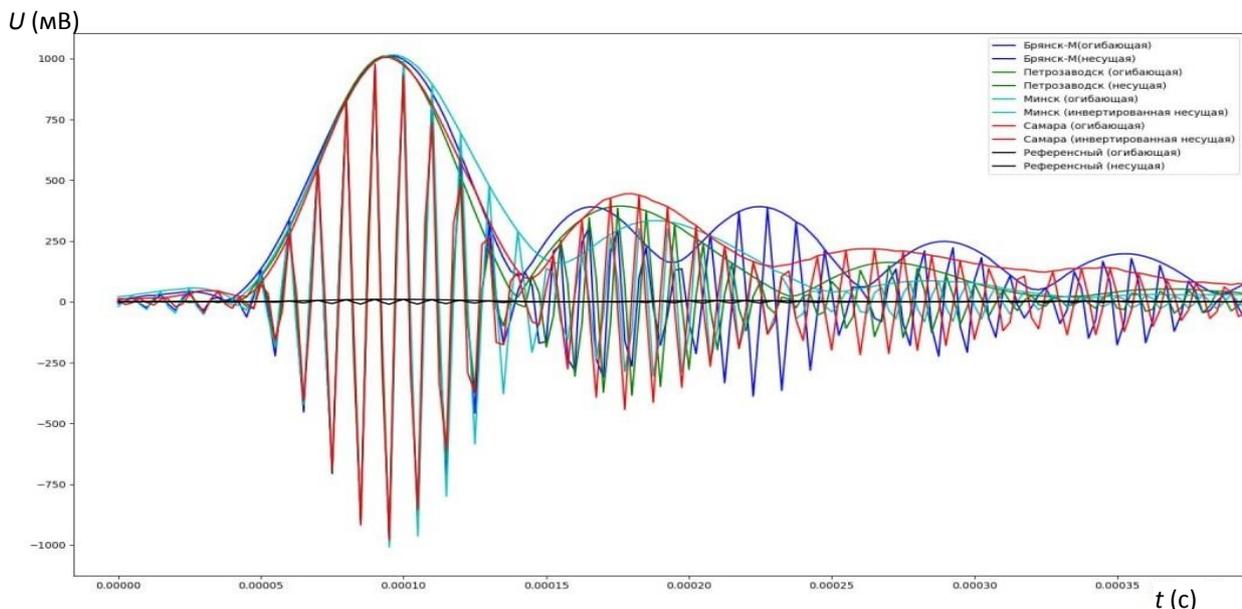


Рис. 9. Сравнение форм сигналов различных станций цепи

Сравнение форм сигналов различных станций цепи с нормировкой к одному уровню огибающей первой полуволны представлено на Рис. 9. Передние фронты огибающей сигналов различных станций, неискаженные позже приходящей ионосферной волной, имеют очень высокую степень совпадения. Задние фронты сильно искажены многолучевостью, имеют меньшую амплитуду, характеристики огибающей при затухании импульса различаются у различных станций. Отсюда следует вывод: весовая функция идентификации последовательности импульсов от станции ИФРНС (паттерн идентификации сигнала) на периоде $GRI A+B$ (18 импульсов) должен обеспечивать устранение влияния девиации хвоста импульса на приеме. На Рис. 10 приведены паттерны огибающих импульсов станций ИФРНС Чайка и Logan-C [5]. Обрезание паттерна предлагается начать с 50-ой мкс. Следует помнить, что форма сигнала станций Чайка различных цепей (в зависимости от мощности передатчиков) и Logan-C в соответствии с ГОСТ Р 53168—2008 различаются.

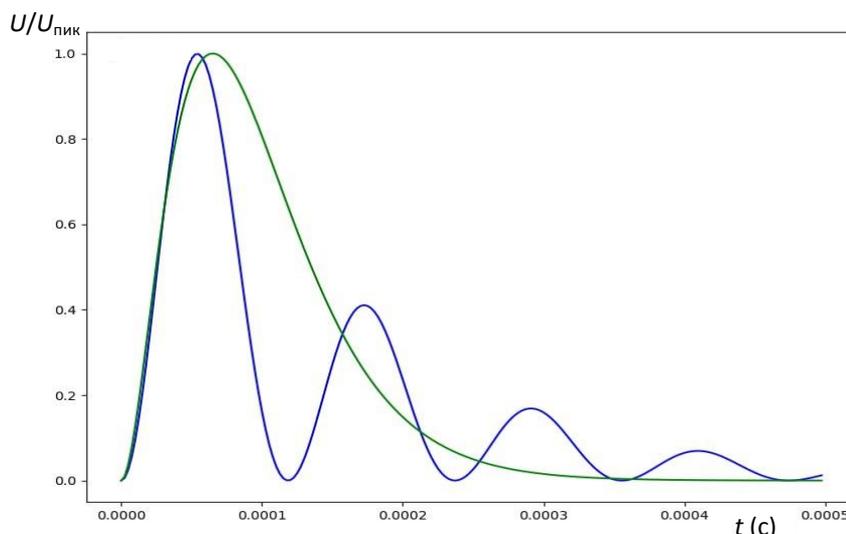


Рис. 10. Нормированные паттерны огибающих передатчиков ИФРНС «Чайка» и «Loran-C» по ГОСТ Р 53168-2008

Синхронизация времени прихода сигнала от станции ИФРНС реализуется вычислением взаимно-корреляционной функции (ВКФ) огибающей аналитического сигнала станции на $GRI A+B$ с паттерном передних фронтов огибающей сигнала, сформированным в соответствие с [5], но обрезанным с 50 мкс. Этот период времени соответствует минимальному времени прихода ионосферной волны, искажающей «чистый» сигнал земной волны. ВКФ умножается на нормирующий множитель, равный энергии (суммы квадратов амплитуд) принятого сигнала на указанном интервале. Совмещение времени перехода третьего колебания несущей через ноль для различных станций показано на рис. 11. Взаимные разности времени смещения для каждой пары передатчиков цепи являются исходными данными для определения положения абонентского приемника разностно-дальномерным методом [7]. При этом подтверждается наличие слабоискаженного переднего фронта огибающей и наличия перехода фазы на 30 мкс от начала импульса.

Псевдодальность от абонентского приемника до станции ИФРНС определяется в [5] временем третьего перехода текущей фазы импульса с момента начала импульса, определяемого как время главного выброса ВКФ минус 50 мкс. Это время, поделенное на скорость распространения волны, и определяет псевдодальность от абонентского приемника до передатчика цепи ИФРНС. Псевдодальность должна быть усреднена на нескольких повторениях $GRI A+B$. Число повторений зависит от скорости движения абонентского приемника – все повторения вычисления псевдодальности должны быть определены в точках с координатами, отстоящими друг от друга по дальности не более точности измерения координат ИФРНС – до 50-100 м.

После получения псевдодальностей до передатчиков ИФРНС становится возможным вычисление координат абонентского приемника. Для этого использовалась процедура, основанная на итеративном алгоритме градиентного спуска с вычислением невязки при помощи формулы Андойера-Ламберта [7-9]. Алгоритм вычисления положения абонентского приемника в соответствии с методом максимального правдоподобия должен использовать при осреднении степень доверия к каждому измерению. Она определяется энергетикой сигналов различных передатчиков цепи на входе абонентского приемника, рис. 6. Процедура уточнения координат при движении абонентского приемника в пространстве может быть реализована при помощи фильтра Калмана. В виду нелинейности функции измерения в качестве реализации рекомендуется выбрать «*Unscented Kalman Filter*», позволяющий успешно обрабатывать ошибки с распределением, отличным от гауссовского.

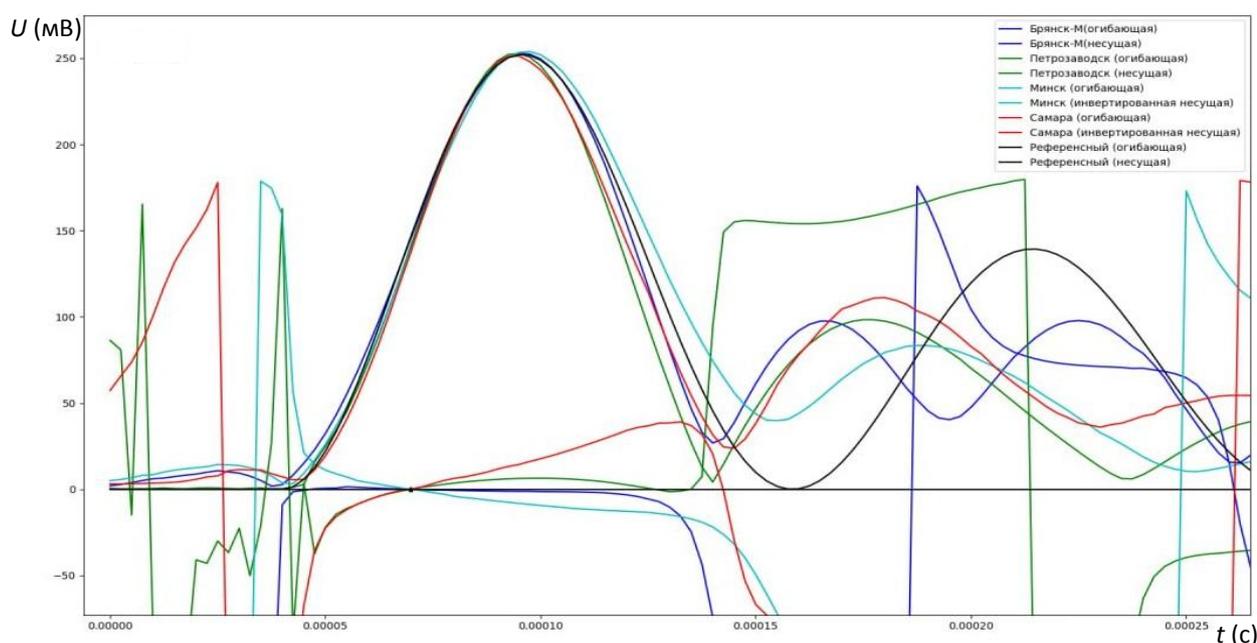


Рис. 11. Совмещение времен перехода третьего колебания несущей через ноль

Заключение

Пассивное вычисление точного времени, необходимое для функционирования радиостанций сети декаметровой радиосвязи становится возможным после позиционирования абонентского приемника и определения дальностей до передатчиков цепи. Излучение сигналов ИФРНС происходит по расписанию. Дальность определяет задержку сигнала, а, следовательно, и необходимую поправку времени. Поскольку точность измерения дальности у рассматриваемой системы в радиусе 1900 км от мест расположения передатчиков менее 100 м, то точность определения времени будет не хуже 333 нс. Время позиционирования абонентского приемника – до 3 с. Для обеспечения сети декаметровой радиосвязи требуемой точности и своевременности определения сетевого времени [1] вполне достаточно.

Литература

1. Путилин А. Н., Соколов В. А., Хвостунов Ю. С. Адаптация режимов работы станций сети декаметровой радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот // Техника средств связи. 2023. № 3 (163). С. 12-21.
2. Кинкулькин И. Е., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Фазовый метод определения координат. – Москва: Советское Радио, 1979. 280 с.
3. ГОСТ Р 54025 (МЭК 61075:1991) Система радионавигационная «Чайка». Приемные устройства. Требования к техническим характеристикам. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2011.

4. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships — Minimum performance standards — Methods of testing and required test results.
5. ГОСТ Р 53168-2008 Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2020.
6. ГОСТ Р 53169-2008 Система радионавигационная «Чайка». Формат передачи контрольно-корректирующей информации потребителям глобальных навигационных спутниковых систем. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2009.
7. Pelgrum W. J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.
8. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000. V. 36. Pp. 290-291.
9. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors. MDPI. 2020. V. 20. Pp. 23-29.

References

1. Putilin A.N., Sokolov V.A., Khvostunov Yu.S. Adaptation of operating modes of decameter radio network with pseudorandom switching of operating frequencies. Means of communication equipment. 2023. No. 3 (163). P. 12-21. (In Russian).
2. Kinkulkin I. E., Rubtsov V. D., Fabric M. A. *Fazovyj metod opredeleniya koordinat* [Phase method for determining coordinates]. Moscow. *Sovetskoe Radio* [Sov. Radio]. 1979. 280 p. (In Russian).
3. GOST R 54025 (IEC 61075:1991) Chaika radio navigation system. Receiving devices. Requirements for technical characteristics. Test methods and required test results. Moscow. Standartinform. 2011. (In Russian).
4. IEC 61075:1991 Loran-C receivers for ships — Minimum performance standards — Methods of testing and required test results.
5. GOST R 53168-2008 Chaika radio navigation system. Signals of transmitting stations. Technical requirements. Moscow. Standartinform. 2020. (In Russian).
6. GOST R 53169-2008 Chaika radio navigation system. Format for transmitting control and correction information to consumers of global navigation satellite systems. General technical requirements. Moscow. Standartinform. 2009. (In Russian).
7. Pelgrum W. J. New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 2006.
8. Fisher A. J. Loran-C cycle identification in hard-limiting receivers. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2000. V. 36. Pp. 290-291.
9. Wenhe Y., Kunjuan Z., Shifeng L., Xinghui W., Yu H. Precise Loran-C Signal Acquisition Based on Envelope Delay Correlation Method. Sensors. MDPI. 2020. V. 20. Pp. 23-29.

Статья поступила 05 декабря 2024 г.

Информация об авторах

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

Путин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник научно-технического центра ПАО «Интелтех». Область научных интересов: передача данных по радио, системы множественного доступа. Тел.: +7(812) 448-19-01. E-mail: PutilinAN@inteltech.ru.

Сыроветник Дмитрий Сергеевич – Ведущий инженер. ООО «Амунго». Область научных интересов: радионавигация, пространственная обработка сигналов. Тел. +7(921)419-24-91. E-mail: syrovetnikds@amungo-navigation.com.

Царик Игорь Владимирович – Главный конструктор. ООО "Амунго". Область научных интересов: радионавигация, пространственная обработка сигналов. Тел. +7(921)969-73-43, itsar@amungo-navigation.com.

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

Passive synchronization in decameter radio networks with pseudo-random switching of operating frequencies

D. V. Ivanov, A. N. Putilin, D. S. Syrovetnik, Tsarik I.W.

Abstract: Ensuring synchronous operation of all stations of a decameter radio communication network with pseudo-random switching of operating frequencies is an indispensable condition for its functioning. The use of global navigation systems GPS and GLONASS for this purpose is not always possible. Their signals can be suppressed, muffled or distorted. Synchronization of stations within the network, which consists in determining the current mutual offset of their reference generators, requires switching to the radiation mode and temporary disconnection of all network transmitters except for the transmitters of the synchronizing stations. Such an algorithm requires some time and may be undesirable for some types of special-purpose networks. The most acceptable option seems to be a simultaneous solution to the problems of navigation and reference to exact time by using signals of regional pulse-phase radio navigation systems. Their long-wave signals can propagate over long distances, their stations have high power. Signals of transmitters of regional pulse-phase radio navigation systems practically cannot be suppressed due to their large number and the technical complexity of implementing jamming in the long-wave range. **The aim of the work is:** to study the possibility of software implementation of the demodulator of signals of the pulse-phase radio navigation system to ensure network synchronization of radio stations of the decameter radio communication network during commissioning. **The novelty of the work consists** in assessing the accuracy and timeliness of ensuring network synchronization of radio stations during their commissioning. **The following results are obtained:** the substantiation of the signal processing order in the demodulator of the pulse-phase radio navigation system is given, the stages of signal processing that are critical for the operational characteristics of the demodulator are determined. **The practical significance consists** in the possibility of ensuring network synchronization of radio stations of the decameter radio communication network under any operating conditions.

Keywords: demodulator, decameter radio communication network, passive network synchronization, radio navigation system.

Information about the Authors

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

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

Dmitry Sergeevich Syrovetnik – Lead Engineer. Amungo LLC. Research interests: radio navigation, spatial signal processing. Tel. +7(921)419-24-91. E-mail: SyrovetnikDS@mail.ru.

Igor Vladimirovich Tsarik – Chief Designer. Amungo LLC. Research interests: radio navigation, spatial signal processing. Tel. +7(921)969-73-43, itsar@amungo-navigation.com.

Address: 197342, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов Д. В., Путилин А. Н., Сыроветник Д. С., Царик И. В. Программная реализация демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 28-36. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-28-36

Reference for citation:

Ivanov D. V., Putilin A. N., Syrovetnik D. S., Tsarik I. W. Software implementation of a demodulator of signals of a pulse-phase radio navigation system // Means of Communication Equipment. 2024. No. 4 (168). P. 28-36. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-28-36

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.248, 621.384.3

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-37-46

Модифицированная методика оценивания эффективности функционирования квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сети с учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе

Закутаев А. А., Емельянов А. В., Ширококов В. В.

Аннотация. В статье на основе анализа существующего задела предложен вариант модификации известной методики оценивания эффективности функционирования распределенной наземной сети квантово-оптических средств. Обоснована необходимость учета дополнительных внешних факторов, оказывающих существенное влияние на процесс целевого функционирования квантово-оптических средств, таких как динамический характер метеорологической обстановки в условиях среднесрочного прогнозирования, а также энергетические потери сигнала при его распространении на атмосферной трассе. Учет вышеуказанных особенностей позволяет рассматривать ограниченную выборку вариантов задействования квантово-оптических средств для информационного обмена. **Постановка задачи:** выбор наилучшего варианта задействования квантово-оптических средств методом «идеального объекта» по критерию минимального превышения фактического времени наблюдения космического аппарата над временем, требуемым для информационного обмена между наземным квантово-оптическим средством и бортом космического аппарата, и критерию минимальных потерь мощности оптического сигнала на атмосферной трассе. **Целью работы** является повышение результативности информационного обмена по линиям «космос-земля» за счет совершенствования методики оценивания эффективности функционирования квантово-оптических средств в составе наземной распределенной наземной сети. **Методы:** в статье применены известные общенаучные методы системного анализа, теории эффективности целенаправленных процессов, математического моделирования, линейной и многокритериальной оптимизации. **Новизна:** учет энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе и динамического характера метеорологической обстановки при оценивании эффективности процессов функционирования квантово-оптических средств в составе наземной распределенной наземной сети. **Результат:** предлагаемая модифицированная методика позволит оценить результативность информационного обмена между наземными квантово-оптическими средствами и бортом космического аппарата в зависимости от временных интервалов его видимости. **Практическая значимость:** возможности программной реализации предлагаемой методики и её использовании при планировании сеансов работы существующих и перспективных квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сети.

Ключевые слова: квантово-оптическая система, распределенная сеть, эффективность, передача энергии

Актуальность

Решение широкого круга задач, как народного хозяйства, так и в области обороны связано с использованием околоземного космического пространства [1]. Одной из ключевых областей при этом является обеспечение связи и передачи данных [2]. В настоящее время все большее распространение получают оптические линии связи (ОЛС), одним из основных достоинств которых является высокая скорость передачи данных [3]. Несмотря на достигнутый уровень развития, существенное влияние на эффективность их функционирования оказывает атмосфера Земли. Подобное влияние, с точки зрения мер противодействия, можно разделить на две составляющие:

- влияние первой составляющей заключается в ослаблении оптического излучения, приводящем к увеличению потерь данных при их передаче;
- влияние второй составляющей определяется возможностью нахождения на трассе распространения сигнала атмосферных образований, которые полностью блокируют оптическое излучение, что влечет невозможность формирования канала связи.

Для решения указанных проблем используются различные подходы. Обеспечение возможности функционирования ОЛС в условиях низкого коэффициента пропускания атмосферной трассы достигается путем повышения мощности лазерного излучения и уменьшения его расходимости [4-7]. Одним из способов уменьшения степени влияния второго фактора является создание распределённых наземных сетей приемо-передающих пунктов [7]. Задача обеспечения требуемого уровня эффективности их функционирования при этом становится более комплексной, поскольку возникает необходимость учета возникающей многоканальности. В указанных условиях повышается важность таких аспектов как диспетчеризация и планирование сеансов связи. Одним из условий повышения их качества является обеспечение данными прогноза метеобстановки в районе размещения приемо-передающих пунктов.

В ряде работ, например в [3, 8], представлены результаты исследований в рассматриваемой предметной области и описан подход к повышению эффективности функционирования распределенной наземной сети квантово-оптических средств (КОС) за счет оснащения районов их размещения метеокомплексами, а также научно-методический аппарат оценивания соответствующего показателя. Однако разработанная методика не учитывает степень затухания оптического сигнала при различных углах визирования космических аппаратов (КА). Указанный фактор оказывает наибольшее влияние при наличии избыточности наземных приемо-передающих пунктов, а также ограниченности объема передаваемых данных. Таким образом, задача по совершенствованию научно-методического аппарата оценивания эффективности функционирования КОС в составе распределенной наземной сети с учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе является актуальной и имеет практическую направленность.

Анализ существующего задела в рассматриваемой предметной области

В работе [8] в качестве показателя эффективности функционирования КОС в составе распределенной наземной сети выбран $Q_{КОС}$, значение которого рассчитывается в соответствии с выражением:

$$Q_{КОС} = \frac{T_{\text{факт}}}{T_{\text{пот}}} = \frac{\sum_{i=n} t_{\text{факт } i}}{T_{\text{пот}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пот}}$ – длительность временного интервала, на котором потенциально возможно было ведение информационного обмена; $T_{\text{факт}}$ – общее время отсутствия облачности на атмосферной трассе; $t_{\text{факт } i}$ – продолжительность i -ого временного интервала, в течении которого на атмосферной трассе отсутствовали атмосферные образования, препятствующие распространению оптического излучения.

В случае, когда объем передаваемых данных достаточно мал и для его передачи требуется время, меньшее, чем $\sum_{i=n} t_{\text{факт } i}$, или он может быть разделён на пакеты, для которых выполняется аналогичное условие, может возникнуть ситуация, когда $\sum_{i=n} t_{\text{факт } i}$ будет превышать требуемое значение одновременно у нескольких КОС.

При этом выбор для задействования конкретного КОС по критерию максимума фактического времени передачи данных

$$\sum_{i=n} t_{\text{факт } i} \rightarrow \max$$

не всегда будет оправдан, поскольку на практике не все КОС будут обладать одинаковыми тактико-техническими характеристиками и обеспечивать одинаковый объем теряемой информации при распространении в атмосфере Земли. Указанный фактор в методике был нивелирован принятием соответствующего допущения об идентичности всех КОС в составе наземной распределённой сети.

Также в рамках методики [8] не был учтен фактор динамического характера метеобстановки в районе расположения распределённой сети. При оценивании выбранного показателя эффективности КОС для решения задачи выбора текущая обстановка рассматривается как статичная на момент входа КА в зону действия каждой КОС. Вместе с тем, при наличии ветра такие атмосферные образования как облака за время $T_{\text{пот}}$ могут перемещаться на значительные расстояния и перекрывать канал передачи данных.

С учетом результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что существующий научно-методический аппарат оценивания имеет следующие недостатки:

- при формировании оптимальной конфигурации каналов передачи данных не учитываются потери информации, возникающие при прохождении сигнала через атмосферу Земли для каждого из рассматриваемых вариантов;
- при расчете временных интервалов, в течение которых возможно формирование канала связи и передача данных, не учитывается динамический характер метеобстановки.

Структура и порядок работы модифицированной методики оценивания эффективности функционирования распределенной наземной сети квантово-оптических средств

Установление связи и информационный обмен между наземной КОС и бортом КА возможны только при наличии условий прямой видимости. Атмосферные слои в различной мере снижают энергетические характеристики оптического сигнала с некоторым коэффициентом ослабления. Из рис. 1 видно, что при наличии облачности для установления связи между КОС и КА помимо необходимого условия прямой видимости следует учитывать, что существует область, пригодная для ведения информационного обмена. Такая область будет ограничена полусферой при угле места α [8], определяемого техническими возможностями КОС и особенностями распространения оптического сигнала. Учитывая вышесказанное, очевидно, что та часть траектории движения КА по орбите, где будет существовать возможность ведения информационного обмена, определяется углом между направлением оптической оси наземной КОС, ориентированной в зенит, и линией, ориентированной на точку траектории КА, ближайшую к КОС.

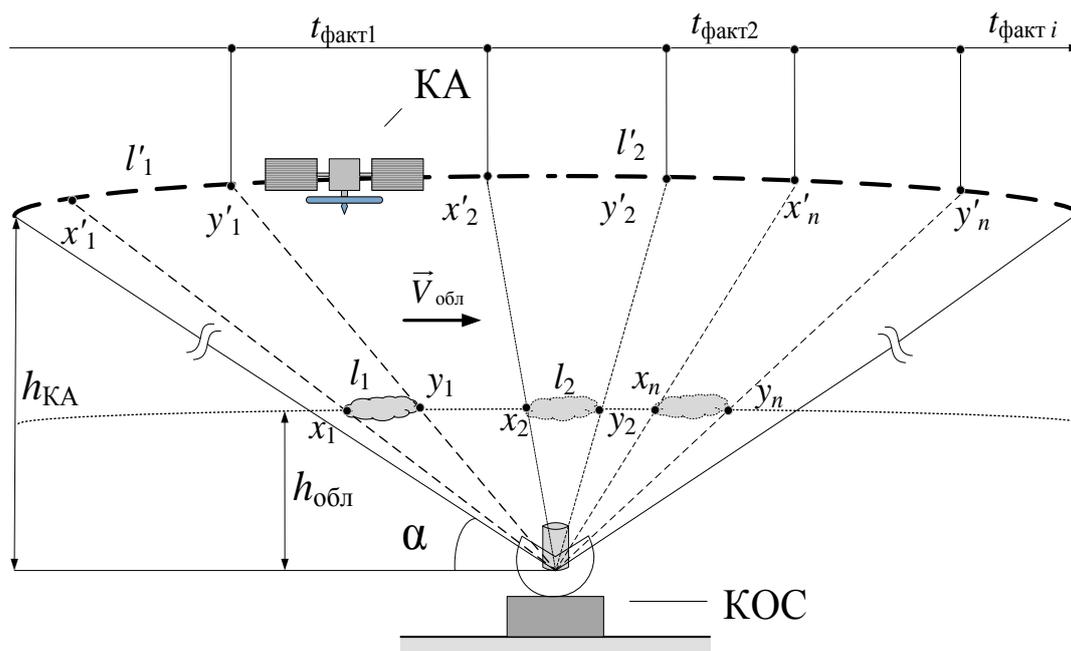


Рис. 1. Схема формирования участков траектории КА с учетом состояния атмосферы

При пролете КА над зоной действия КОС разделим время наблюдения на равные отрезки, длительностью Δt . Очевидно, что размеры проекций расстояний, которые будет проходить КА за выбранный интервал, будут различаться, ввиду различий между угловыми скоростями относительно наземной КОС.

Предположим, что интервалы разбиения существенно меньше общего времени наблюдения. Для простоты последующих расчетов, а также с учетом вышеуказанного предположения, введем следующие допущения: траектория движения КА линейна, проекции облаков на трассе распространения сигнала линейны. Учитывая допущения и используя известную теорему о подобии треугольников $Ox_n Y_n$ и $Ox'_n Y'_n$, вычислим размер проекции облаков на траекторию движения КА:

$$\frac{x'_n y'_n}{x_n y_n} = \frac{Ox'_n}{Ox_n} = \frac{Oy'_n}{Oy_n},$$

где O – центр позиции размещения КОС.

На первом этапе предлагаемой методики расчет временных интервалов (1), в течение которых возможно проведение информационного обмена между КОС и КА, осуществляется в соответствии со следующими исходными данными:

– параметры траектории КА

$$\mathbf{X} = \{\Omega, i, \omega, a, e, u\},$$

где $\Omega, i, \omega, a, e, u$ – соответствующие параметры орбиты КА;

– параметры КОС

$$\mathbf{Y} = \{X_{КОС}, Y_{КОС}, Z_{КОС}, \alpha\},$$

где $X_{КОС}, Y_{КОС}, Z_{КОС}$ – координаты точки стояния КОС, например, в геоцентрической системе координат, α – минимальный угол места при котором возможна передача данных;

– характеристики атмосферных образований относительно траектории КА

$$\mathbf{Z} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), h_{обл}, t_{вх}, \Delta t, V_{обл}\},$$

где (x_i, y_i) – координаты начал и концов сечений атмосферных образований, $h_{обл}$ – высота облачных образований относительно точки стояния КОС, $t_{вх}$ – время вхождения облачного образования в зону перекрытия канала передачи данных с КА, Δt – интервал разбиения временного промежутка наблюдения КА, $V_{обл}$ – скорость прохождения облачного образования через зону перекрытия канала передачи данных.

Соответственно, фактическое время наблюдения КА представляет собой функциональную зависимость вида

$$t_{факт} = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}).$$

Для реализации данной методики введем еще одно важное предположение: величина расстояния между КОС и КА не влияет на результативность информационного обмена. Требуемые характеристики канала связи могут быть достигнуты посредством увеличения мощности передатчика, размещенного на КОС.

Технические возможности современных КОС позволяют осуществлять связь с космическими объектами в секторе, ограниченном величиной 120 градусов [9] (при углах менее 30 градусов над горизонтом сеансы связи будут выполняться с искажениями ввиду особенностей условий наблюдения). В указанном секторе проекции границ области видимости на земную поверхность ограничены окружностью, радиусом 150-200 км.

Анализ особенностей функционирования современных метеокомплексов контроля и прогнозирования состояния атмосферы [5-7] показал, что существующие образцы, в частности, радиолокационный метеокомплекс «Монокль» (табл. 1) применяется для контроля и прогнозирования изменения параметров атмосферы при обеспечении процессов функционирования в различных сферах (деятельность аэропортов, предприятий промышленности и т.д.). Комплекс обеспечивает получение координатных параметров облаков и других атмосферных образований на дальности около 150 км. Используя известные скоростные характеристики потоков ветра, «Монокль» позволяет предсказывать их перемещения на временном интервале до 5 часов (рис. 2) [10].

На втором этапе методики на основе исходных данных осуществляется формирование всего множества возможных вариантов конфигурации сети передачи данных между наземными КОС и КА с учетом прогнозирования их траекторий и известных точек стояния КОС.

На третьем этапе методики для каждого КОС с учетом среднесрочного прогноза по нахождению облачных образований на трассе наблюдения производится расчет фактического времени передачи данных. Зная значения времени вхождения облачного образования в зону перекрытия канала передачи данных с КА $t_{вх}$, для учета динамического характера метеобстановки необходимо разбить интервал времени пролета КА на равные дискретные подынтервалы $\Delta t \approx 1...5$ с и осуществить расчет времени выхода облачного образования из зоны перекрытия канала передачи данных $t_{вых}$.

Таблица 1 – Основные характеристики МРЛК БЗ «Монокль»

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Дальность обнаружения опасных метеоявлений, км	150
2	Зона обзора, град: по азимуту по углу места	0-360 1-90
3	Точность измерения дальности высоты, м	не хуже 100
4	Точность измерения углов, град	не хуже 1
5	Точность измерения скорости, м/с	не хуже 1
6	Оперативность обновления информации о характеристиках облачности, мин	10

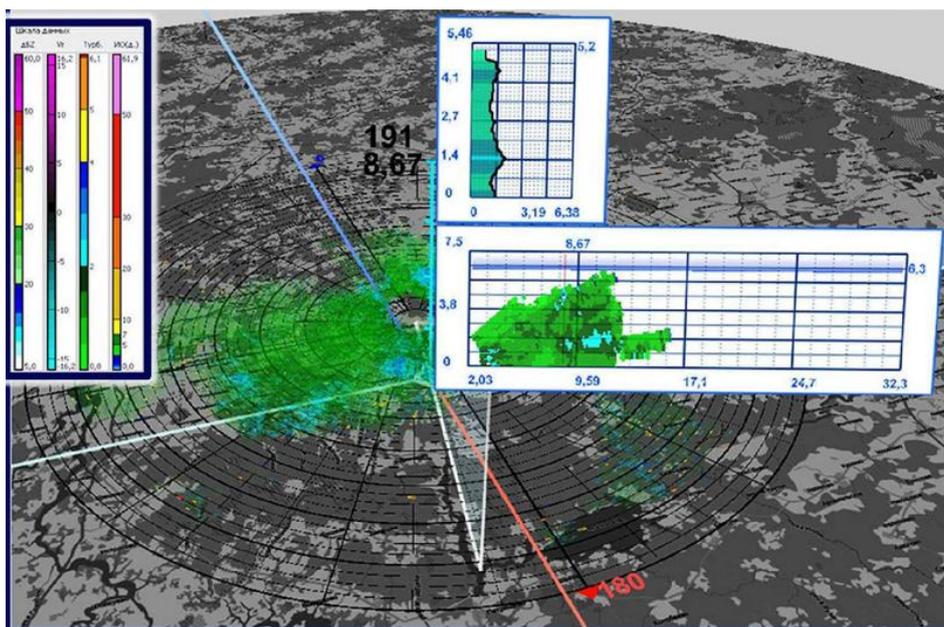


Рис. 2. Иллюстрация возможностей метеокомплекса «Монокль» по получению и визуализации метеорологической информации в районе расположения КОС

Имея расчетные значения $t_{вых}$ для каждого КОС осуществляется выбор тех КОС, для которых выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_{факт i} \geq t_{треб}$$

где $t_{треб}$ – время, требуемое для передачи на борт КА всей необходимой информации.

На четвертом этапе методики производится расчет энергетических потерь мощности оптического сигнала при прохождении через атмосферу.

При этом общие потери оптического сигнала при прохождении через атмосферу складываются из потерь мощности, обусловленных расходимостью лазерного излучения

$P_{расх j}$, и потерь мощности, связанных с поглощением и рассеиванием в атмосфере $P_{атм}$, и определяются в соответствии с выражением [11]:

$$P_{общ j} = P_{расх j} + P_{атм},$$

где

$$P_{расх j} = 10 \lg \left(\frac{S_{пятна j}}{S_{приемн}} \right),$$

в котором $S_{пятна j}$ – площадь пятна излучения в месте размещения КОС при дальности до КА $h_{КА}$ рассчитывается по формуле

$$S_{пятна j} = \frac{\pi d_{пятна j}^2}{4} = \frac{\pi (h_{КА j} \cdot \theta)^2}{4},$$

где θ – угол расходимости лазерного излучения.

Значение площади входного зрачка КОС $S_{прием}$ определяется выражением

$$S_{прием} = \frac{\pi d_{прием}^2}{4},$$

где $d_{прием}$ – диаметр входного зрачка КОС.

Величина потерь мощности, связанных с поглощением и рассеиванием в атмосфере $P_{атм}$ рассчитывается по формуле:

$$P_{атм} = \alpha \cdot h_{КА},$$

где α – величина километрического затухания.

Пример результатов расчетов представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Пример результатов расчета потерь мощности оптического сигнала, вызванных влиянием атмосферы

Номер КОС	Номер КА			
	КА-1	КА-2	...	КА- <i>i</i>
КОС-1	$P_{общ 1 1}$	$P_{общ 1 2}$	...	$P_{общ 1 j}$
КОС-2	$P_{общ 2 1}$	$P_{общ 2 2}$	...	$P_{общ 2 j}$
...
КОС- <i>j</i>	$P_{общ i 1}$	$P_{общ i 2}$	...	$P_{общ i j}$

Далее из усеченного множества КОС, полученного на третьем этапе, осуществляется выбор *j*-й КОС по критерию минимизации потерь сигнала на атмосферной трассе $P_{общ j} \rightarrow \min$.

На пятом этапе методики осуществляется вычисление ранее определенных показателей эффективности работы распределенной сети КОС. В рамках предложенного подхода алгоритм расчета интервалов $t_{факт i}$ останется неизменным, даже если в одной области будет несколько КОС, способных осуществлять передачу данных. При этом расчет показателя $Q_{КОС}$ следует выполнять отдельно для каждого КОС и каждого КА.

Предполагается, что при наличии нескольких КА в зоне, потенциально пригодной для ведения информационного обмена, вычисление $Q_{КОС}$ выполняется посредством перебора всех вариантов передачи по схеме «каждый с каждым».

Результаты, полученные по итогам расчета, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Пример результатов расчета показателей эффективности КОС

Номер КОС	Номер КА			
	КА-1	КА-2	...	КА- <i>M</i>
КОС-1	$Q_{КОС 1 1}$	$Q_{КОС 1 2}$	...	$Q_{КОС 1 M}$
КОС-2	$Q_{КОС 2 1}$	$Q_{КОС 2 2}$	...	$Q_{КОС 2 M}$
...
КОС- <i>R</i>	$Q_{КОС R 1}$	$Q_{КОС R 2}$	...	$Q_{КОС R M}$

На шестом этапе методики формируется оптимальная конфигурация каналов передачи данных «космос-земля» по выбранным на этапах 3, 4 критериям.

Задача выбора может решаться с использованием различных оптимизационных методов, одним из которых может являться метод «идеального объекта» [12].

Для сопоставления значений показателей разнородных критериев необходимо выполнить их нормировку для каждого критерия по формулам:

$$a(t_{\text{факт } ij}) = \frac{t_{\text{треб}} - t_{\text{факт } ij}}{t_{\text{треб}} - t_{\text{факт } \min}}, \quad a(P_{\text{общ } ij}) = \frac{P_{\text{общ } 0} - P_{\text{общ } ij}}{P_{\text{общ } 0} - P_{\text{общ } \max}}.$$

Для отсеивания наихудших вариантов используем следующие метрики в виде сверток:

$$L[a(t_{\text{факт } i})] = \sqrt{\sum_{j=1}^n t_{\text{факт } ij}^2} \quad \text{и} \quad L[a(P_{\text{общ } ij})] = \sqrt{\sum_{j=1}^n P_{\text{общ } ij}^2},$$

которые можно представить в виде комплексного показателя, характеризующего «близость» конфигурации сети к «идеальному» объекту:

$$Q_{\text{КОС}} = \min_{ij} \sqrt{\sum_{j=1}^n t_{\text{факт } ij}^2 + \sum_{j=1}^n P_{\text{общ } ij}^2}.$$

В самом же простом случае осуществляется полный перебор значений вышеуказанного показателя и поиск его максимального значения $Q_{\text{КОС } \max}$.

Общая схема предлагаемой методики представлена на рис. 4.

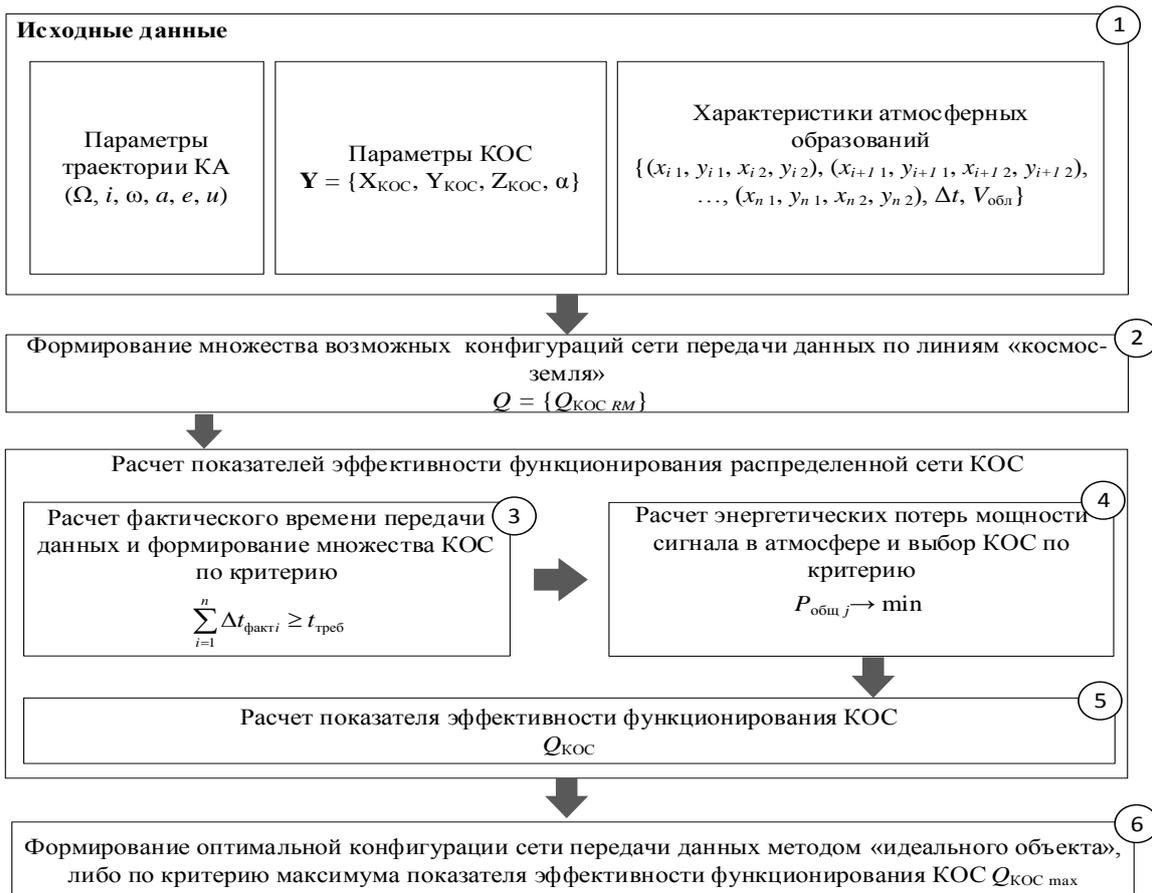


Рис. 4. Общая схема модифицированной методики оценивания эффективности функционирования распределенной наземной сети КОС

В зависимости от решаемой КОС задачи, а также ограничений и допущений, критерии выбора целевого показателя, как и методы оптимизации структуры наземной сети КОС передачи данных, могут отличаться.

Выводы

В статье на основе анализа существующего задела, а также особенностей функционирования КОС в составе распределенной наземной сети при решении задачи информационного обмена с бортом КА выявлен ряд недостатков научно-методического аппарата оценивания эффективности процесса их функционирования.

На основе известного методического аппарата предложена модернизированная методика оценивания эффективности функционирования наземных КОС в составе распределенной сети с учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе, а также динамического характера метеобстановки в районе их размещения.

Применение предлагаемой методики позволит повысить результативность информационного обмена между наземными КОС и бортом КА. Результаты программной реализации разработанной методики могут быть использованы для повышения оперативности планирования сеансов работы существующих и перспективных КОС в составе распределенной наземной сети.

Литература

1. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации / учеб. пособ. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 96 с.
2. Михайлов Р. Л. Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 52-82.
3. Закутаев А. А., Емельянов А. В., Лесив А. Б. Способ оценивания эффективности квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 108-113.
4. Алишев Я. В. Предельная пропускная способность и потенциальная помехоустойчивость оптических сетей и систем телекоммуникаций // Доклады БГУИР. Минск: Белорусский ГУИР. 2004. № 2. С. 44-56.
5. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции: в 2 т. / Ч. 1. Тактико-технические характеристики: уч. пособ. СПб.: РГГМУ, 2016. 170 с.
6. Ref. B211184RU-A©Vaisala Метеорологические станции для метеорологического применения. 2013. 8 с.
7. Модернизация метеорологической и актинометрической сетей Росгидромета: итоги и перспективы [Электронный ресурс] URL: http://irkugms.ucoz.ru/news/modernizacija_meteorologicheskoy_i_aktinometricheskoy_setej_rosgidrometa_itogi_i_perspektivy/2013-09-18-869 (дата обращения: 03.04.2017).
8. Живицкий И. В. Адаптивное слежение за воздушно-космическими объектами в наземных лазерных локаторах с управлением излучаемым полем // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. СПб.: ГУАП. 2007. 176 с.
9. Оружие и технологии России: энциклопедия. XXI век / под ред. С. Б. Иванова. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2005. Т. XI: Оптико-электронные системы и лазерная техника. 719 с.
10. Безуглов А. А., Галаева К. И., Детков А. Н. Метеорологический радиолокационный комплекс обеспечения безопасности полётов авиации в различных климатических зонах // Общеросс. науч.-техн. журнал «Полёт». М.: Машиностроение – Полет. 2017. № 3-4. С. 46-50.
11. Молчанов С. В., Калекина С. О. Применение когерентного временно-частотного мультиплексирования для повышения производительности атмосферной оптической системы связи // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2019. № 2. С. 31-39.
12. Вишнеков А. В., Карпова И. П., Ферапонтова И. С. Расчет ценности альтернатив для метода «идеальной точки» в многокритериальных задачах принятия решения для ситуационных центров // Качество. Инновации. Образование. 2010. № 12. С. 56-60.

References

1. Dmitriev A. L. Optical information transmission systems. St. Petersburg, SPbGU ITMO, 2007. 96 p. (In Russian).
2. Mikhailov R. L. Models and routing algorithms in the transport ground-space communications network for military purposes. Control, communication and security systems. 2015. No. 3. Pp. 52-82. (In Russian).

3. Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Lesiv A. B. A method for evaluating the effectiveness of quantum optical means as part of a distributed terrestrial network. Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. 2021. No. 6. Pp. 108-113. (In Russian).
4. Alishev Ya. V. Limiting bandwidth and potential interference resistance of optical networks and telecommunication systems. Reports of the BSUIR. Minsk. Belorussian GUIR. 2004. No. 2. pp. 44-56. (In Russian).
5. Voskanyan K. L., Kuznetsov A. D., Seroukhova O. S. Automatic meteorological stations. V. 1. Tactical and technical characteristics. St. Petersburg. RGGMU, 2016. 170 p. (In Russian).
6. Ref. B211184RU-A©Vaisala Meteorological stations for meteorological applications. 2013. 8 p.
7. Modernization of meteorological and actinometric networks of Roshydromet: results and prospects [Electronic resource] URL: http://irkugms.ucoz.ru/news/modernizacija_meteorologicheskoy_aktinometricheskoy_setej_rosgidrometa_itogi_i_perspektivy/2013-09-18-869 (accessed 03.04.2017). (In Russian).
8. Zhivitsky I. V. Adaptive tracking of aerospace objects in ground-based laser locators with radiated field control. Diss. for the degree. step. Candidate of Technical Sciences St. Petersburg. GUAP. 2007. 176 p. (In Russian).
9. Weapons and technologies of Russia: encyclopedia. XXI century. Edited by S.B. Ivanov. Moscow. Izdat. house "Weapons and Technologies", 2005. V. XI. Optoelectronic systems and laser technology. 719 p. (In Russian).
10. Bezuglov A. A., Galaeva K. I., Detkov A. N. Meteorological radar complex for aviation flight safety in various climatic zones. Obscheross. nauch.-tehn. magazine "Flight". Moscow. Mechanical engineering – Flight. 2017. No. 3-4. Pp. 46-50. (In Russian).
11. Molchanov S. V., Kalekina S. O. Application of coherent time-frequency multiplexing to improve the performance of an atmospheric optical communication system. Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Ser. Physical, mathematical and technical sciences. 2019. No. 2. Pp. 31-39. (In Russian).
12. Vishnekov A. V., Karpova I. P., Ferapontova I. S. Calculation of the value of alternatives for the "ideal point" method in multi-criteria decision-making tasks for situational centers. Quality. Innovation. Education. 2010. No. 12. Pp. 56-60. (In Russian).

Статья поступила 10 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Закутаев Александр Александрович – начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: методы оценивания эффективности функционирования и совершенствования программно-алгоритмического обеспечения оптико-электронных и квантово-оптических средств. Тел. +7 952 355 22 92. E-mail: zakutaev.a@mail.ru.

Емельянов Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: методы оценивания эффективности функционирования и совершенствования программно-алгоритмического обеспечения оптико-электронных и квантово-оптических средств. Тел. +7 911 283 65 95. E-mail: slash1@inbox.ru.

Широбоков Владислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: методы оценивания эффективности функционирования и совершенствования программно-алгоритмического обеспечения оптико-электронных и квантово-оптических средств. Тел. +7 981 761 28 41. E-mail: 17126vlad@gmail.com. Адрес: 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

A modified methodology for evaluating the efficiency of the functioning of quantum-optical means as part of a distributed terrestrial network, taking into account the energy loss of the signal on the atmospheric route

A. A. Zakutaev, A. V. Emelyanov, V. V. Shirobokov

Annotation. In this article proposed a modification of the well-known methodology for evaluating the efficiency of the functioning of a distributed terrestrial network of quantum optical means based on the analysis of the existing groundwork. The need to take into account additional external factors that have a significant impact on the process of targeted functioning of the quantum optical means, such as the dynamic nature of the meteorological situation in the conditions of medium-term forecasting, as well as energy losses of the signal during its propagation along the atmospheric route. Taking into account the above features allows us to consider a limited selection of options for using quantum optical means for information exchange. **Problem statement:** choosing the best option for using the quantum optical means by the "ideal object" method according to the criterion of the minimum excess of the actual observation time of the spacecraft over the time required for information exchange between the ground-based quantum optical means and the spacecraft board, and the criterion of minimum power loss of the optical signal on the atmospheric track. **The aim of the work** is to increase the effectiveness of information exchange along the «space-Earth» lines by improving the methodology for evaluating the effectiveness of the quantum optical means functioning as part of a terrestrial distributed terrestrial network. **Methods:** the article uses well-known general scientific methods of system analysis, the theory of effectiveness of purposeful processes, mathematical modeling, linear and multi-criteria optimization. **Novelty:** it consists in taking into account the energy losses of the signal on the atmospheric route and the dynamic nature of the meteorological situation when evaluating the effectiveness of the processes of functioning of the quantum optical means as part of a terrestrial distributed terrestrial network. **The result is** that the proposed modified methodology will allow us to evaluate the effectiveness of information exchange between ground-based spacecraft and spacecraft board, depending on the time intervals of its visibility. **The practical significance** lies in the possibility of software implementation of the proposed methodology and its use in planning sessions of existing and prospective quantum optical means as part of a distributed terrestrial network.

Key words: quantum optical system, distributed network, efficiency, energy transfer.

Information about Authors

Alexandr Alexandrovich Zakutaev – Head of the Laboratory of the Military Institute (Research) of Military Space Academy of Mozhaisky. Research interests: methods for evaluating the efficiency of functioning and improving software and algorithmic support of optoelectronic and quantum optical means. Phone: +7 911 283 65 95. E-mail: zakutaev.a@mail.ru.

Alexandr Vladimirovich Emelyanov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Military Institute (Research) of Military Space Academy of Mozhaisky. Research interests: methods for evaluating the efficiency of functioning and improving software and algorithmic support of optoelectronic and quantum optical means. Phone: +7 911 283 65 95. E-mail: slash1@inbox.ru.

Vladislav Vladimirovich Shirobokov – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, Head of the Laboratory of the Military Institute (Research) of Military Space Academy of Mozhaisky. Research interests: methods for evaluating the efficiency of functioning and improving software and algorithmic support of optoelectronic and quantum optical means. Phone: +7 981 761 28 41. E-mail: 17126vlad@gmail.com. Address: 197198, Russia, г. Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

Библиографическая ссылка на статью:

Закутаев А. А., Емельянов А. В., Широбокров В. В. Модифицированная методика оценивания эффективности функционирования квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сети с учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 37-46. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-37-46

Reference for citation:

Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Shirobokov V. V. A modified methodology for evaluating the efficiency of the functioning of quantum-optical devices as part of a distributed terrestrial network, taking into account the energy loss of the signal on the atmospheric route. Means of Communication Equipment. 2024. No. 4 (168). P. 37-46. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-37-46 (in Russian)

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-47-56

Средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта

Сивинцева О. А.

Аннотация. В данной статье рассматриваются средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта. Снижение пик-фактора и повышение уровня информационной безопасности в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием являются актуальными задачами, которые требуют комплексного подхода. **Постановка задачи** представленной статьи заключается в анализе показателей энергетической эффективности и информационной безопасности, обеспечиваемых средствами маскирования информации с целью снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе формирователей псевдослучайных последовательностей с использованием систем Спротта, реализованных над полем Галуа. В работе применяется метод компьютерного моделирования в программной среде MatLab для моделирования исследуемых систем и методы математической статистики для исследования основных показателей, таких как: пик-фактор, кумулятивная функция распределения и энтропия. **Новизна** работы заключается в разработке нового способа формирования псевдослучайных последовательностей на основе систем Спротта с хаотической динамикой, реализованных в полях Галуа, с целью маскирования информации и снижения пик-фактора в системах передачи информации с ортогональным частотным мультиплексированием. **Результат** заключается в том, что проведен анализ показателей информационной безопасности и энергетической эффективности четырех вариантов систем с ортогональным частотным мультиплексированием. **Практическая значимость** состоит в возможности использования полученных результатов при разработке систем передачи информации путем использования новых возможностей для комплексного подхода к решению проблемы энергетической эффективности и информационной безопасности в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием.

Ключевые слова: комплементарная кумулятивная функция распределения, ортогональное частотное мультиплексирование, пик-фактор, псевдослучайные последовательности, сигнальные созвездия, система Спротта.

Актуальность

Современный мир, в котором информация стала неотъемлемым элементом жизни, требует бесперебойной и надежной коммуникации. Ортогональное частотное мультиплексирование (*OFDM*) – технология, лежащая в основе многих современных беспроводных систем связи, – позволяет передавать огромные объемы данных с высокой скоростью и надежностью [1-2]. Однако, как и у любой технологии, у *OFDM* есть свои ограничения. Одним из таких ограничений является высокий пик-фактор (*PAPR*), который приводит к неэффективному использованию ресурсов передатчика и проблемам с нелинейными искажениями в канале передачи [3].

Снижение *PAPR* – это ключ к повышению энергоэффективности *OFDM*-систем. Низкий *PAPR* позволяет использовать передатчик с меньшим запасом мощности, что приводит к снижению энергопотребления, а также минимизирует вероятность нелинейных искажений, что повышает качество сигнала и надежность передачи [4-5].

Однако, одних лишь усилий по повышению энергоэффективности недостаточно. В современном мире, где киберугрозы становятся все более изощренными, информационная безопасность – это фундаментальное требование к любой системе связи. Повышение степени

скремблирования и энтропии в передаваемом сигнале усложняет задачу перехвата и дешифровки данных, делая систему более устойчивой к атакам [6].

Метод отображения сигнальных созвездий (*Selective Mapping, SLM*) [7] представляет собой один из наиболее эффективных способов снижения *PAPR*, который основывается на выборе оптимальной версии сигнала из множества возможных, с целью минимизации пикового значения. Данный метод интересен для исследования не только своей способностью существенно уменьшать *PAPR*, но и тем, что он не требует значительных изменений в структуре системы передачи, что делает его легко интегрируемым в существующие *OFDM*-решения.

Скремблирование данных и увеличение энтропии становятся важными инструментами для защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа [8]. При этом использование средств маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе отображения сигнальных созвездий с использованием систем Спротта может оказать положительное влияние на степень скремблирования и энтропию, что открывает новые горизонты для комплексного подхода к решению проблемы энергетической эффективности и информационной безопасности систем связи с *OFDM*.

Постановка задачи

Применение метода отображения сигнальных созвездий и метода скремблирования информации с использованием псевдослучайных чисел на основе новых систем Спротта, выполненных над полем Галуа требует проведения оценок степени снижения пик-фактора сигналов, а также энтропии маскированной информации.

Цель работы

Цель работы – проведение анализа показателей энергетической эффективности и информационной безопасности системы *OFDM* с *SLM*, реализованной на основе динамической системы Спротта в полях Галуа.

Описание структурных схем исследуемых моделей *OFDM* системы и *OFDM* системы с *SLM*

Системы связи на основе *OFDM* и *OFDM* с *SLM* представляют собой мощные инструменты для передачи данных в современных беспроводных сетях. *OFDM* обеспечивает эффективное использование спектра и устойчивость к многолучевости, в то время как *SLM* позволяет оптимизировать характеристики сигнала, снижая *PAPR* и улучшая качество связи. В данной работе проведен анализ *OFDM* системы в традиционном представлении и системы *OFDM* с *SLM*.

Традиционная реализация *OFDM* системы представлена на рис.1.

Исходная информация на передающей стороне представляется в виде 8-битного цветного изображения размерностью 256x256 пикселей. Полученный двоичный информационный поток скремблируется путем сложения по модулю два с псевдослучайной последовательностью (далее – ПСП), которая формируется при помощи генератора на основе системы Спротта, реализованной в полях Галуа. Для генератора псевдослучайных последовательностей устанавливаются начальные условия в виде порождающего полинома для создания поля Галуа и начальных значений переменных x_0 , y_0 , z_0 системы Спротта.

Далее при помощи последовательно-параллельного преобразователя скремблированный поток разделяется на 256 параллельных потоков. Количество разделяемых потоков в данном случае определяется числом поднесущих передаваемого *OFDM* сигнала. Модуляция сигналов осуществляется при помощи формирователя модуляционных символов *QAM-16*, где происходит преобразование исходного сигнала в

квадратурный. Для переноса полученного модулированного сигнала во временную область используется обратное быстрое преобразование Фурье. Также для избежания межсимвольной интерференции при передаче сигнала параллельный поток расширяется путем добавления в начало защитного интервала, полученного дублированием его последних символов. Далее, для передачи сигнала, поток объединяется в единый с помощью параллельно-последовательного преобразователя. В канале связи передаваемый сигнал смешивается с белым Гауссовским шумом, после чего поступает в приемную часть системы.

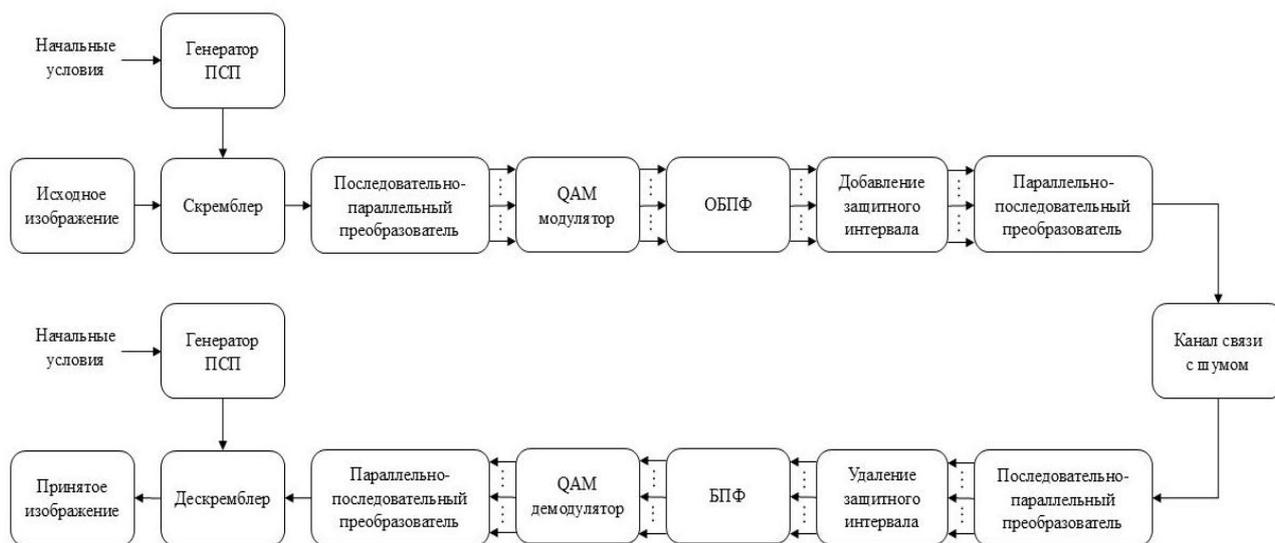


Рис. 1. Структурная схема OFDM системы

На приемной стороне выполняются обратные передающей стороне операции. Принятый сигнал при помощи последовательно-параллельного преобразователя разделяется на 256 параллельных потоков, после чего происходит удаление защитного интервала и перенос сигнала в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье. Полученный комплексный поток демодулируется QAM-демодулятором и преобразуется в последовательный поток, который дескремблируется генератором ПСП на основе системы Спротта. Необходимым требованием к генератору на приемной стороне является соответствие его начальных условий начальным условиям генератора на передающей стороне. Принятая двоичная информация преобразуется в 8-битное цветное изображение размерностью 256x256 пикселей.

Далее рассмотрим систему OFDM с методом SLM, представленную на рис. 2. Система OFDM с SLM представляет собой один из наиболее интересных и эффективных методов снижения PAPR.

Аналогично рассмотренной ранее системе OFDM в системе OFDM с SLM исходная информация представляет собой 8-битное цветное изображение, которое скремблируется с помощью генератора на основе системы Спротта, реализованной в полях Галуа. При помощи последовательно-параллельного преобразователя полученный поток делится на параллельные потоки длиной 256 символов, соответствующей числу поднесущих передаваемого сигнала. Потоки модулируются QAM-модулятором и переносятся во временную область при помощи обратного быстрого преобразования Фурье. Также происходит и добавление защитного интервала. Отличие рассматриваемой системы состоит в генерации различных последовательностей OFDM на каждой итерации, на основе исходных данных. Каждая из последовательностей подвергается модификации с использованием различных фазовых сдвигов. Из всех созданных последовательностей

выбирается та, которая имеет наименьший *PAPR*. Изменение фазы на каждой итерации обеспечивается перемножением модулированных символов исходного сигнала на разные фазовые коэффициенты, представляющие собой зависимость от 4-битных псевдослучайных чисел системы Спротта.

Кроме того, на четных итерациях имеется возможность перестановки фазовых коэффициентов, что является простым техническим решением в получении нового массива передаваемого сигнала с исходным набором фазовых коэффициентов. Перестановка коэффициентов в соответствии с [7] осуществляется в окне преобразования Фурье. При количестве поднесущих равном 256, осуществляется перестановка 1-го и 129-го фазового коэффициента.

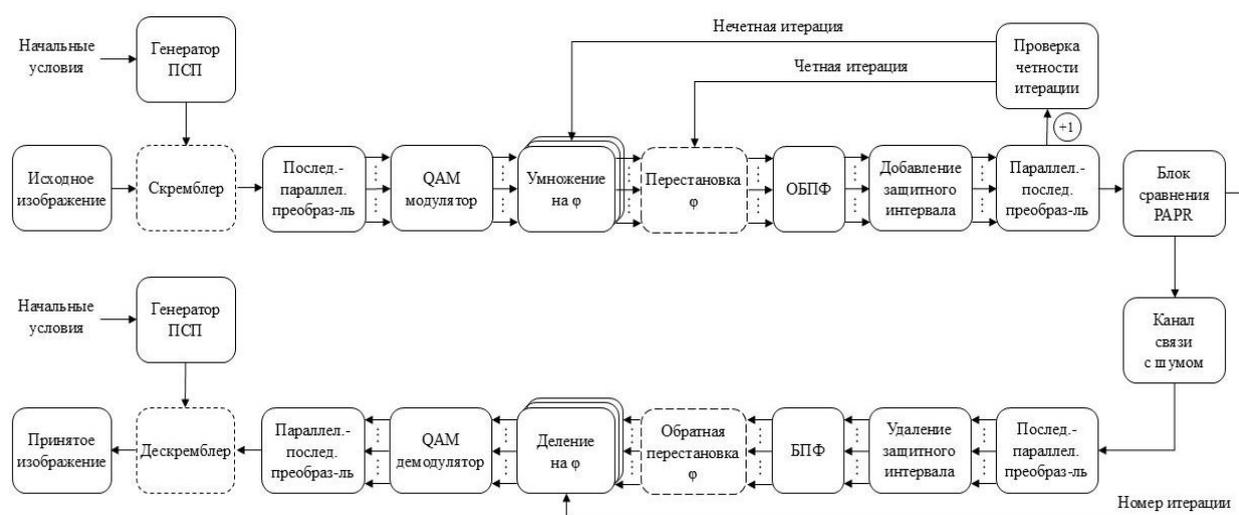


Рис. 2. Структурная схема OFDM системы с методом SLM

Таким образом, в блоке сравнения из нескольких массивов исходного сигнала с разными фазами выбирается массив сигнала с наименьшим пик-фактором и передается на приемную сторону. Также на приемную сторону необходимо передать информацию о выбранном номере итерации.

На приемной стороне производятся обратные операции: принятый сигнал преобразуется в параллельный поток, после чего происходит удаление защитного интервала и перенос в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье. Для демодуляции принятого информационного потока необходимо избавиться от фазовых коэффициентов путем их обратной перестановки, при наличии перестановок на передающей стороне, и деления символов принятого сигнала на фазовые коэффициенты принятой итерации. Для получения принятого изображения размерностью 256x256 пикселей сигнал проходит QAM-демодулятор, объединяется в единый поток и дескремблируется с помощью генератора ПСП на основе системы Спротта с заданными на передающей стороне начальными условиями.

Описание генератора псевдослучайной последовательности на основе систем Спротта

Для скремблирования информационного сигнала и получения фазовых коэффициентов в системе OFDM с SLM применяется ПСП, генерируемая с использованием модифицированной системы Спротта, где алгебраические операции выполняются в полях Галуа. Выполнение алгебраических операций в полях Галуа обеспечивает формирование целочисленных значений, что упрощает схемотехническую реализацию генератора [9-10].

Система Спротта представляет собой динамическую систему, основанную на использовании нелинейных динамических систем для генерации псевдослучайных последовательностей. Основная идея заключается в том, что информация, полученная из динамической системы, является достаточно сложной и непредсказуемой, что делает ее подходящей для обеспечения информационной безопасности в средствах маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе формирователей ПСП с использованием систем Спротта.

Классическая система Спротта описана в книге [11]. В общем виде системы Спротта могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 \cdot x + B_1 \cdot x \cdot y + C_1 \cdot y + D_1 \cdot y \cdot z + E_1 \cdot z^2 + F_1 \cdot z + G_1 \\ \dot{y} = A_2 \cdot x^2 + B_2 \cdot x + C_2 \cdot x \cdot z + D_2 \cdot y^2 + E_2 \cdot y + F_2 \cdot y \cdot z + G_2 \cdot z^2 + H_2 \cdot z + I_2 \\ \dot{z} = A_3 \cdot x^2 + B_3 \cdot x + C_3 \cdot x \cdot y + D_3 \cdot x \cdot z + E_3 \cdot y^2 + F_3 \cdot y + G_3 \cdot z + H_3 \end{cases}$$

где $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2, I_2, A_3, B_3, C_3, D_3, E_3, F_3, G_3, H_3$ – коэффициенты, подбираемые под каждую систему уравнений.

В данной работе используются 16 уравнений Спротта. Каждое уравнение на одном шаге вычислений позволяет получить 16-битные двоичные массивы x, y, z . Формирование массивов осуществляется при помощи перемешивания систем Спротта. На первом шаге вычислений формируются двоичные массивы при помощи первого уравнения. На каждом последующем шаге вычислений осуществляется псевдослучайный выбор номера одной из 16 систем Спротта. Номер системы определяется по четырем младшим битам 16-битного числа, полученного путем сложения двоичных массивов x, y, z на предыдущем шаге. Размерность формируемого системой Спротта массива псевдослучайных чисел должна соответствовать размерности исходной информации [12].

В работе [13] представлены результаты прохождения тестов *FIPS 140-2* последовательностями, сформированными генераторами на основе систем Спротта. Тесты *FIPS 140-2* являются мерой определения степени случайности последовательностей, создаваемых генераторами ПСП. Выявлено, что генераторы на основе систем Спротта проходят набор универсальных тестов *FIPS 140-2* с вероятностью не менее 0,9988 %.

Результаты моделирования

Для оценки распределения пик-фактора сигнала *OFDM* исследовалась комплементарная кумулятивная функция распределения (*CCDF*). Кумулятивная функция распределения показывает вероятность того, что пиковая мощность сигнала будет меньше или равна заданному значению [14].

В данной работе *CCDF* оценивалась для 4 вариантов реализации *OFDM* системы: традиционная *OFDM* система, *OFDM* система с *SLM*, а также вариации системы *OFDM* с *SLM* со скремблированием и перестановкой фазовых коэффициентов. На рис. 3а и рис. 3б представлены графики *CCDF* для различных алгоритмов работы *OFDM* при 4 и 16 итерациях, соответственно.

По результатам исследования установлено, что наименьший пик-фактор наблюдается для *OFDM* системы с применением метода *SLM* со скремблированием и перестановками фазовых коэффициентов. Наибольшее значение пик-фактора соответствует традиционной *OFDM* системе. Так, при 16 итерациях пик-фактор *OFDM* системы при вероятности функции распределения 10^{-1} больше на 1,3 дБ по сравнению с *OFDM* системой с *SLM* со скремблированием и перестановками фазовых коэффициентов.

Кроме того, выявлено, что при увеличении количества итераций пик-фактор снижается. Так, пик-фактор при вероятности функции распределения 10^{-3} при выполнении 4 итераций больше на 0,8 дБ по сравнению с 16 итерациями.

Для оценки информационной безопасности исследовалась энтропия сигналов рассматриваемых *OFDM*-систем. Показатель энтропии отражает степень неопределенности в передаваемых данных. Высокая энтропия означает более сложную структуру данных, что затрудняет их анализ и предсказание [15-16].

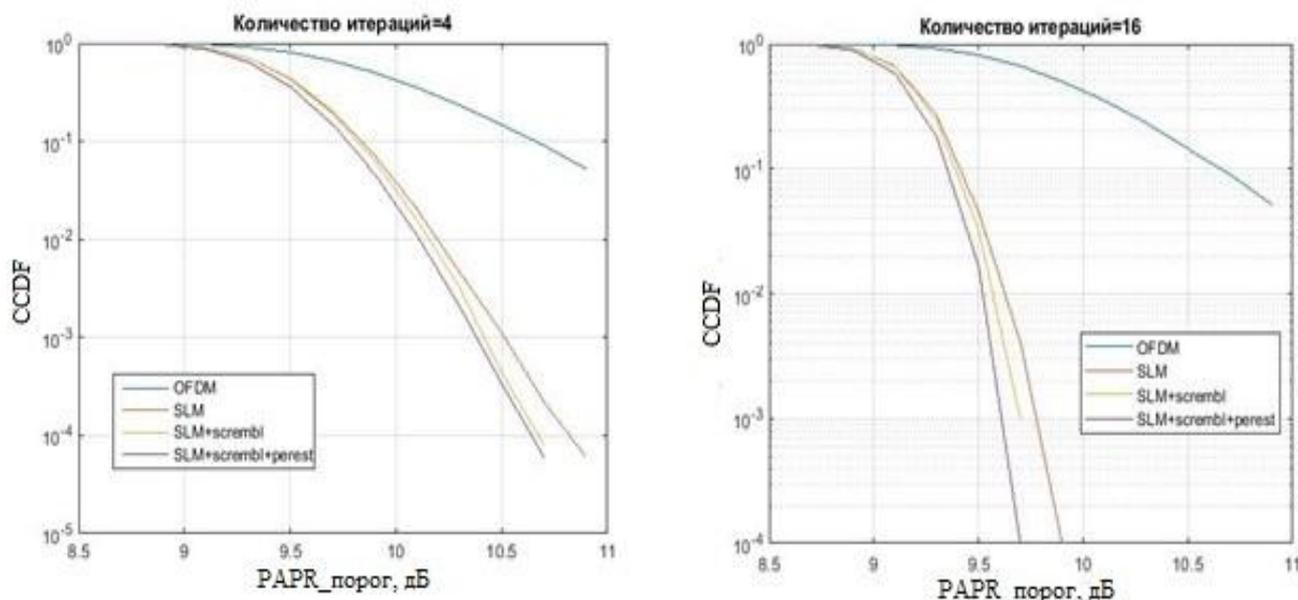


Рис. 3. Графики *CCDF* для различных алгоритмов работы *OFDM* при 4 и 16 итерациях

Результаты оценки энтропии для системы *OFDM* с *SLM* представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оценки энтропии для системы *OFDM* с *SLM*

Количество итераций	Исходное изображение	SLM система со скремблированием			SLM система без скремблирования	
		После скремблирования	После добавления фазовых коэффициентов без перестановок	После добавления фазовых коэффициентов с перестановками	После добавления фазовых коэффициентов без перестановок	После добавления фазовых коэффициентов с перестановками
1	7,4696	7,9991	7,9991	7,9991	7,9587	7,9587
2			7,9991	7,9991	7,9587	7,9587
3			7,9991	7,9991	7,9587	7,9588
4			7,9991	7,9992	7,9587	7,9588
5			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
6			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
7			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
8			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
9			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
10			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
11			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588
12			7,9992	7,9992	7,9588	7,9588

Установлено, что использование скремблирования исходной информации с помощью ПСП на основе системы Спротта, реализованной в полях Галуа, оказывает положительное влияние на энтропию сигнала, таким образом, энтропия скремблированного сигнала

становится больше энтропии исходного сигнала на 0,53. Добавление фазовых коэффициентов приводит к небольшому повышению данного показателя, начиная с 5 итерации, а добавление перестановки фазовых коэффициентов приводит к повышению энтропии, начиная с 4 итерации. При отсутствии скремблирования добавление фазовых коэффициентов и их перестановка приводит к увеличению энтропии исходного сигнала на 0,48. Таким образом, увеличение энтропии в системах *OFDM* может быть достигнуто через использование метода *SLM* и скремблирования, в которых использованы псевдослучайные числа на основе систем Спротта.

Выводы

В данной работе были рассмотрены средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта. Проанализированы четыре варианта реализации системы с ортогональным частотным мультиплексированием: традиционная *OFDM* система, *OFDM* система с отображением сигнальных созвездий, а также вариации системы *OFDM* с отображением сигнальных созвездий со скремблированием и перестановкой фазовых коэффициентов. Для оценки энергетической эффективности и информационной безопасности исследовались такие показатели, как: пик-фактор, кумулятивная функция распределения и энтропия. Выявлено, что система *OFDM* с отображением сигнальных созвездий со скремблированием и перестановками фазовых коэффициентов обеспечивает наименьший пик-фактор среди четырех вариантов реализации *OFDM*-системы, и выигрыш составляет 1,3 дБ по сравнению с традиционной системой. Кроме того, результаты показывают влияние на пик-фактор количества итераций, увеличение которых также приводит к снижению данного показателя.

При анализе показателей маскирования информации оценивалась энтропия полученных сигналов. Установлено, что скремблирование исходной информации с помощью псевдослучайной последовательности на основе системы Спротта увеличивает энтропию сигнала на 0,53, а добавление фазовых коэффициентов и их перестановка в методе отображения сигнальных созвездий также приводит к увеличению энтропии. По результатам проведенного анализа табл. 1 можно сделать вывод о том, что для улучшения показателя энтропии при маскировании информации достаточно небольшого количества итераций по изменениям фазовых коэффициентов методом *SLM* и методом скремблирования.

Литература

1. Зуев М. Ю. Комплексное повышение эффективности радиоэлектронных устройств и систем передачи информации с *OFDM* на основе нелинейных систем с динамическим хаосом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. № 1 (25). С. 55-64.
2. Khyati K., Desai Comparison of *SLM* and *PTS* method for *PAPR* reduction in *OFDM* // International Journal of Engineering Research & Technology. 2014. Т. 3. № 6. С. 1638-1641.
3. Султанов А. Х., Мешков И. К., Ишмияров А. А. Метод повышения энергетической эффективности систем *OFDM*, основанный на уменьшении пик-фактора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 3. С. 25-31.
4. Musabe R., Lionel M. B., Ushindi V. M., Atupenda M., James Ntaganda and Gaurav Bajpai *PAPR* reduction in *LTE* network using both peak windowing and clipping techniques // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2019. Т. 6. 11 p.
5. Sultan A., Yang X., Hajomer A. A. E., Hussain S. B., Weisheng Hu. Chaotic distribution of *QAM* symbols for secure *OFDM* signal transmission // Optical Fiber Technology. 2019. Т. 47. Pp. 61-65.
6. Loginov S. S., Zuev M. Y., Agacheva Y. G., Sivintseva O. A. Information Scrambling by Lorenz System Based Sequences in *OFDM* // Systems of Signal Synchronization, Generating and

Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166047.

7. Логинов С. С., Сивинцева О. А., Шоркин С. П. Устройство уменьшения пик-фактора сигналов OFDM на основе селективного отображения сигнальных созвездий. Патент на полезную модель №223097. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (RU). – № 2023126320: заявл. 13.10.2023; опублик. 31.01.2024.

8. Земцов А. Н., Цыбанов В. Ю. Скремблирование цифровых изображений // Инженерный вестник Дона. 2020. Т. 6. 8 с.

9. Буткевич Ю. Р., Зуев М. Ю., Логинов С. С., Сивинцева О. А. Формирователи псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца в средствах повышения эффективности функционирования систем передачи информации с OFDM // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. Т. 1 (53). С. 33-44.

10. Логинов С. С., Зуев М. Ю. Тестирование генераторов псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца, реализованной над конечным полем Галуа // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. № 1 (9). С. 111-114.

11. Кузнецов С. П. Динамический хаос. – М.: Физматлит., 2001. 376 с.

12. Логинов С. С., Ишмиев И. И., Сивинцева О. А. Методы снижения пик-фактора сигналов FBMC на основе дискретно-нелинейной системы Спротта, реализованной над конечным полем Галуа // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22. № 1 (85). С. 64-69.

13. Сивинцева О. А., Раупов Р. Р., Логинов С. С. Тестирование генераторов псевдослучайных сигналов на основе систем Спротта // Материалы конференции «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2024». 2024. С. 444-445.

14. Md. Tanvir Ul Haque and Md. Sharif Hossen PAPR Reduction in OFDM System Using Clipping and Filtering Methods Based on CCDF // I. J. Computer Network and Information Security. 2019. Т. 10. С. 12-18.

15. Guo X., Zhao H., Wang W. Entropy Loading Design for the MIMO-OFDM Visible Light Communication System Using the OCT Precoding Technique // Advances in Condensed Matter Physics. 2020. Т. 20. 7 с.

16. Che D., Shieh W. Entropy-loading: multi-carrier constellation-shaping for colored-SNR optical channels // in Proceedings of the Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2017. Pp. 1-3.

References

1. Zuev M. Yu. *Kompleksnoe povyshenie effektivnosti radioelektronnyh ustrojstv i sistem peredachi informacii s OFDM na osnove nelinejnyh sistem s dinamicheskim kaosom* // [Complex efficiency improvement of radioelectronic devices and information transmission systems with OFDM based on nonlinear systems with dynamic chaos]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems]. 2022. No. 1 (25). Pp. 55-64. (In Russian).

2. Khyati K., Desai Comparison of SLM and PTS method for PAPR reduction in OFDM. International Journal of Engineering Research & Technology. 2014. V. 3. No. 6. Pp. 1638–1641.

3. Sultanov A. H., Meshkov I. K., Ishmiyarov A. A. *Metod povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistem OFDM, osnovannyj na umen'shenii pik-faktora* [Method of increasing the energy efficiency of OFDM systems based on reducing the peak factor]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems]. 2018. V. 21. No. 3. Pp. 25-31. (In Russian).

4. Musabe R., Lionel M. B., Ushindi V. M., Atupenda M., Ntaganda J., Bajpai G. PAPR reduction in LTE network using both peak windowing and clipping techniques. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2019. V. 6. 11 p.

5. Sultan A., Yang X., Hajomer A. A. E., Hussain S. B., Hu W. Chaotic distribution of QAM symbols for secure OFDM signal transmission. Optical Fiber Technology. 2019. V. 47. Pp. 61-65.

6. Loginov S. S., Zuev M. Y., Agacheva Y. G. and Sivintseva O. A. Information Scrambling by Lorenz System Based Sequences in OFDM. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166047

7. Loginov S. S., Sivintseva O. A., Shorkin S. P. *Ustrojstvo umen'sheniya pik-faktora signalov OFDM na osnove selektivnogo otobrazheniya signal'nyh sozvezdij*. [Device for reducing the PAPR of signals from OFDM based on selective mapping of signal constellations]. *Patent na poleznuyu model' №223097* [Patent for utility model №223097]. *Zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet im. A.N. Tupoleva-KAI» (RU)* [Applicant and patent holder of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (RU)]. № 2023126320, application 13.10.2023: published 31.01.2024. (In Russian).

8. Zemtsov A.N., Tsyganov V.Yu. *Skremblirovanie cifrovyyh izobrazhenij* [Scrambling of digital images]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2020. V. 6. 8 p.

9. Butkevich Yu.R., Zuev M.Yu., Loginov S.S., Sivintseva O.A. *Formirovateli psevdosluchajnyh signalov na osnove sistemy Lorentsa v sredstvakh povysheniya effektivnosti funkcionirovaniya sistem peredachi informacii s OFDM* [Pseudorandom signal generators based on the Lorentz system in means of improving the efficiency of information transmission systems with OFDM]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems]. 2022. V. 1 (53). Pp. 33-44. (In Russian).

10. Loginov S.S., Zuev M.Yu. *Testirovanie generatorov psevdosluchajnyh signalov na osnove sistemy Lorentsa, realizovannoj nad konechnym polem Galua* [Testing pseudorandom signal generators based on the Lorentz system implemented over a finite Galois field]. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Synchronization, signal generation and processing systems]. 2018. No. 1 (9). Pp. 111-114. (In Russian).

11. Kuznetsov S.P. *Dinamicheskij kaos* [Dynamic chaos]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2001. 376 p. (In Russian).

12. Loginov S.S., Ishmiev I.I., Sivintseva O.A. *Metody snizheniya pik-faktora signalov FBMC na osnove diskretno-nelinejnoj sistemy Sprotta, realizovannoj nad konechnym polem Galua* [Methods for reducing the peak factor of BMC signals based on a discrete-nonlinear Sprott system implemented over a finite Galois field]. *Infokommunikacionnye tekhnologii* [Information and communication technologies]. 2024. V. 22. No. 1 (85). Pp. 64-69. (In Russian).

13. Sivintseva O.A., Raupov R.R., Loginov S.S. *Testirovanie generatorov psevdosluchajnyh signalov na osnove sistem Sprotta* [Testing pseudorandom signal generators based on Sprott systems]. *Materialy konferencii «Prikladnaya elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy – 2024»* [Proceedings of the conference «Applied Electrodynamics, photonics and living systems -2024»]. 2024. Pp. 444-445. (In Russian).

14. Md. Tanvir Ul Haque and Md. Sharif Hossen PAPR Reduction in OFDM System Using Clipping and Filtering Methods Based on CCDF. I. J. Computer Network and Information Security 2019. Vol. 10. pp.12-18.

15. Guo X., Zhao H., Wang W. Entropy Loading Design for the MIMO-OFDM Visible Light Communication System Using the OCT Precoding Technique. *Advances in Condensed Matter Physics*. 2020. V. 20. 7 p.

16. Che D., Shieh W. Entropy-loading: multi-carrier constellation-shaping for colored-SNR optical channels. In *Proceedings of the Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. 2017. Pp. 1-3.

Статья поступила 04 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Сивинцева Ольга Андреевна – аспирант кафедры электронных и квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ). Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ). Область научных интересов: динамический хаос, системы с ортогональным мультиплексированием. Тел. +7 960 033-66-55. E-mail: sivinceva96@mail.ru. Адрес: 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.10.

Means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on Sprott systems

O. A. Sivintseva

Annotation. This article discusses the means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on Sprott systems. Reducing the PAPR and increasing the level of information security in communication systems with orthogonal frequency multiplexing are urgent tasks that require an integrated approach. **The problem statement and the purpose** of the presented article are to analyze the indicators of energy efficiency and information security provided by means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on pseudorandom sequence generators using Sprott systems implemented over the Galois fields. The paper uses the **method of computer modeling** in the MatLab software environment for modeling the systems under study and the **method of mathematical statistics** to study the main indicators such as: PAPR, cumulative distribution function and entropy. **The novelty of the work** lies in the development of a new method for the formation of pseudorandom sequences based on Sprott systems implemented in Galois fields in order to mask information and reduce the PAPR in information transmission systems with orthogonal frequency multiplexing. **The result** is that the analysis of information security and energy efficiency indicators of four variants of systems with orthogonal frequency multiplexing has been carried out. **The practical significance** lies in the possibility of using the results obtained in the development of information transmission systems by using new opportunities for an integrated approach to solving the problem of energy efficiency and information security in communication systems with orthogonal frequency multiplexing.

Keywords: complementary cumulative distribution function, orthogonal frequency multiplexing, crest factor, pseudorandom sequences, signal constellations, the Sprott system.

Information about Authors

Olga Andreevna Sivintseva – Postgraduate of the Department of Electronic and Quantum Information Transmission Media. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI. Research interests: dynamic chaos, orthogonal multiplexing systems.
Tel. +7 960 033-66-55. E-mail: sivinceva96@mail.ru.
Address: 10 Karl Marx Street, Kazan, 420111, Russian Federation, Republic of Tatarstan.

Библиографическая ссылка на статью:

Сивинцева О. А. Средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 47-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-47-56

Reference for citation:

Sivintseva O. A. Means of masking information and reducing the PAPR of signals with orthogonal frequency multiplexing based on Sprott systems. Means of Communications Equipment. 2024. No. 4 (168). PP. 47-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-47-56 (in Russian)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.396.4

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-57-68

Модель линии спутниковой связи с парциальными каналами

Драгунов М. Ю.

Аннотация. *Цель исследования:* разработать модель линии спутниковой связи с несколькими парциальными каналами, работающей в стволе с прямой ретрансляцией сигналов. **Методы исследования:** в качестве основного выбран метод определения энергетических параметров радиолинии при воздействии на нее различных дестабилизирующих факторов в стволе спутникового ретранслятора с прямой ретрансляцией сигналов, адаптированный под расчет нескольких парциальных каналов с учетом требований к скорости передачи и качеству канала связи. **Результаты:** предложена модель линии спутниковой связи в стволе с прямой ретрансляцией при работе земными станциями с парциальными каналами. **Новизна:** в отличие от существующих моделей, где линия спутниковой связи представлена одним каналом с фиксированным диапазоном частот в стволе ретранслятора связи, в предлагаемой модели количество каналов радиолинии изменяется в зависимости от исходных данных для ее моделирования, а также в работе усилителя мощности земной станции в многосигнальном режиме с учетом возможного искажения сигнала вследствие его многосигнальности, сохраняя баланс мощностей на его выходе. **Научная значимость:** модель линии спутниковой связи с парциальными каналами позволяет получить основные энергетические параметры системы, оценить качество связи в различных условиях, что позволяет оптимизировать распределение частотного ресурса ретранслятора связи в стволе с прямой ретрансляцией по критерию максимума пропускной способности, что, в свою очередь, повышает скорость передачи радиолинии спутниковой связи. **Применимость:** предлагаемая модель радиолинии спутниковой связи позволяет повысить скорость передачи данных за счет гибкой настройки параметров каждого парциального канала, выбора частотных полос для их работы в зависимости от требований к качеству связи, доступного ресурса и помеховой обстановки.

Ключевые слова: баланс мощностей, линия спутниковой связи, парциальный канал, пик-фактор, прямая ретрансляция сигналов, частотный ресурс.

Введение

Спутниковая связь является одной из ключевых технологий, обеспечивающих глобальную коммуникацию и передачу данных. В условиях стремительного развития информационных технологий и увеличения объемов данных, передаваемых по всему миру, актуальность спутниковой связи возрастает. Это также подтверждается широким использованием средств спутниковой связи военными потребителями. Ввиду массогабаритных показателей и технических возможностей станции спутниковой связи в силовых структурах уверенно берут на себя роль основного поставщика всех видов услуг связи и передачи данных [1-3].

В работе [4] предложена методика повышения коэффициента использования частотного ресурса ретранслятора связи (РС) за счет применения земных станций (ЗС) с парциальными каналами (ПК), суть которой заключается в разбиении необходимого для работы ЗС диапазона частот на несколько меньших диапазонов, которые подбираются из числа незанятых частот всего ствола ретранслятора связи (РС). Таким образом, предлагается распределить незанятый частотный ресурс РС для работы ЗС с ПК.

Для силовых структур использование станций с парциальными каналами представляет особый интерес, поскольку позволяет повысить пропускную способность ствола РС, разведзащищенность радиолиний за счет распределения трактов передачи и приема по всей частотной полосе ствола ретранслятора, а также адаптивно менять частоты ПК при воздействии помехи.

Целью статьи является моделирование спутниковой радиолинии, состоящей из нескольких ПК, суть которого состоит в расчете ее основных энергетических параметров.

Постановка задачи на моделирование линии спутниковой связи с парциальными каналами

Эффективность моделирования линии спутниковой связи зависит от нескольких факторов, включая используемые технологии, методы моделирования и конкретные параметры системы. Модель спутниковой радиолинии с парциальными каналами включает в себя ряд основных элементов (рис. 1):

- передающий тракт земной станции для формирования и излучения радиосигналов нескольких парциальных каналов;
- среда распространения радиосигнала с дестабилизирующими факторами, влияющими на качество связи;
- спутник – ретранслятор;
- приемный тракт ЗС для приема и обработки нескольких ПК.

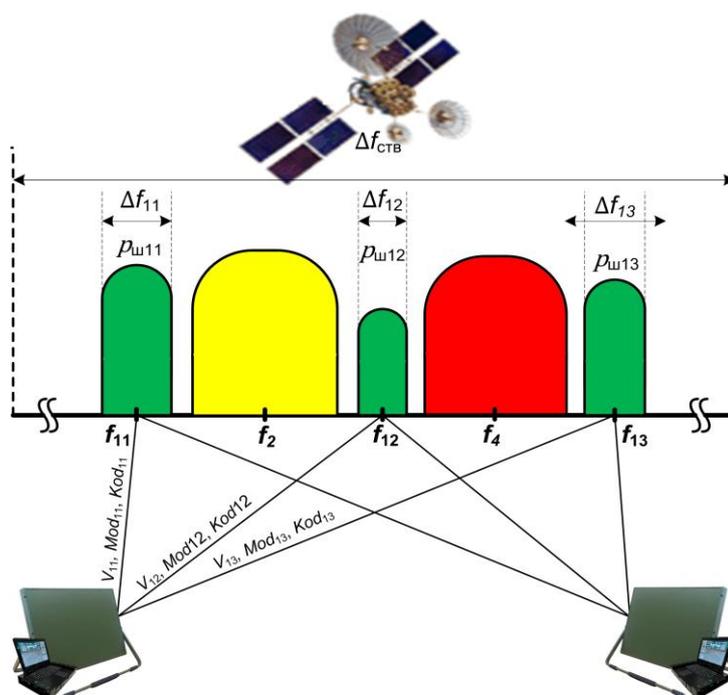


Рис.1. Схема спутниковой радиолинии с несколькими парциальными каналами

Каждое направление спутниковой связи при работе ЗС с ПК реализуется несколькими парциальными каналами, каждый из которых характеризуется рядом параметров:

- $V_{i,j}$ – абонентская скорость передачи i -го ПК;
- $f_{i,j}$ – частота несущей радиосигнала i -го ПК;
- $P_{i,j}$ – мощность радиосигнала i -го ПК;
- $Mod_{i,j}$ – вид модуляции i -го ПК;
- $Kod_{i,j}$ – параметры кодирования i -го ПК, где i – номер ЗС ($i=1...N$), j – номер ПК ($j=1...Q_i$), Q_i – количество ПК i -й ЗС [4].

Радиолиния спутниковой связи с несколькими ПК работает на свободных участках частотного диапазона ствола РС (Δf_{11} , Δf_{12} , Δf_{13} на рис. 1.) Каждая полоса характеризуется уровнем шума ($p_{ш11}$, $p_{ш12}$, $p_{ш13}$ на рис. 1) и центральной частотой (f_{11} , f_{12} , f_{13} на рис. 1).

Скорость передачи в радиолинии спутниковой связи (1) распределяется между ПК, причем скорости в каждом из ПК не зависят друг от друга:

$$V_i = \sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j} . \quad (1)$$

Модель радиолинии при работе ЗС с ПК должна позволить определить уровень сигнала $P_{\text{пер ЗС}}$ на выходе передатчика ЗС и его распределение по парциальным каналам, достаточное для обеспечения связи с требуемым качеством, определяемым вероятностью битовой ошибки на выходе каждого ПК, с учетом возможных кратковременных пиковых значений излучаемой мощности ввиду многосигнальности рассматриваемой линии спутниковой связи.

Модель линии спутниковой связи с парциальными каналами

Целью моделирования является определение основных энергетических параметров радиолинии с ПК [5-7]. Энергетический расчет отдельного ПК, являющегося составной частью радиолинии, в режиме прямой ретрансляции сигнала проводится по методике, представленной в [7].

Уровень сигнала передающей ЗС на входе ствола РС определяется первым уравнением передачи (2):

$$P_{\text{пр РС}} = P_{\text{пер ЗС}} - \eta_{\text{пер ЗС}} + G_{\text{пер ЗС}} + G_{\text{пр РС}} - \eta_{\text{пр РС}} - L_{\Sigma 1} , \quad (2)$$

где $P_{\text{пер ЗС}}$ – мощность передатчика ЗС для излучения отдельного ПК; $\eta_{\text{пер ЗС}}$ – затухание фидерного тракта ЗС; $G_{\text{пер ЗС}}$ – коэффициент усиления антенны ЗС на передачу; $G_{\text{пр РС}}$ – коэффициент усиления антенны РС на прием; $\eta_{\text{пр РС}}$ – затухание фидерного тракта РС; $L_{\Sigma 1}$ – затухание сигнала ПК в свободном пространстве на восходящем участке радиолинии спутниковой связи.

Одновременно с работой ЗС с ПК также работает множество других ЗС, сигналы которых присутствуют на входе РС. Совокупность сигналов ЗС совместно с внутренним шумом РС усиливаются и излучаются в направлении приемных ЗС.

Значение суммарного шума РС на входе приемной ЗС также определяется в соответствии с первым уравнением передачи.

Таким образом, на входе приемной ЗС присутствуют:

- полезный сигнал отдельного ПК передающей ЗС;
- множество сигналов других ЗС;
- суммарный ретранслированный через РС шум;
- суммарный шум приемной ЗС.

Тогда значение SNR (*Signal-To-Noise Ratio*) – отношение мощности полезного сигнала к спектральной плотности шума (3) в полосе частот сигнала отдельного ПК:

$$h^2 = \frac{E_6}{N_{\text{ш}}} , \quad (3)$$

где E_6 – энергия, затрачиваемая на передачу одного бита информации; $N_{\text{ш}}$ – спектральная плотность мощности шума;

Направление спутниковой связи для отдельного ПК от передающей до приемной ЗС считается пригодным, когда значение отношения мощности полезного сигнала к спектральной плотности шума h^2 превышает требуемое значение – h^{2*} (4):

$$h^2 \geq h^{2*} . \quad (4)$$

Аналогичным образом определяется пригодность направления спутниковой связи для отдельного ПК в обратном направлении.

Требуемая мощность излучения ПК на выходе передатчика ЗС определяется в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 2. Здесь $L_{\Sigma 1}, L_{\Sigma 2}$ – суммарное затухание сигнала на участке «земля-борт» и «борт-земля» соответственно; K_p – коэффициент усиления ствола ретранслятора.

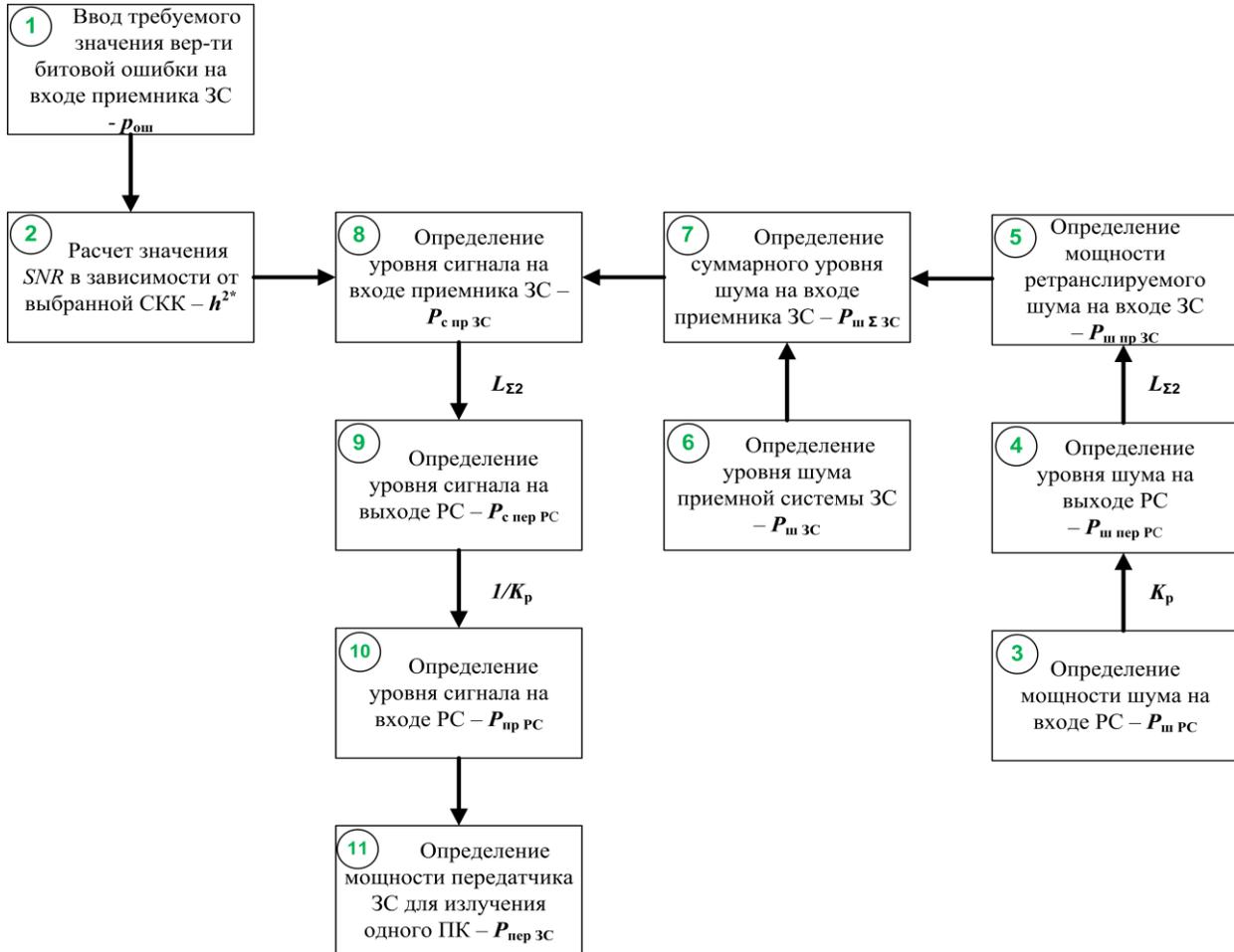


Рис. 2. Последовательность определения величин при энергетическом расчете i -го ПК

Тогда отношение уровня сигнала к уровню шума (5) на входе приемной ЗС для i -го парциального канала имеет вид:

$$\frac{P_{с пр ЗС i}}{P_{ш \Sigma ЗС i}} = \frac{E_{ЗС i} \cdot E_{РС} \cdot G_{прм.ЗС} \cdot G_{прм.РС} \cdot \eta_{прм.ЗС i} \cdot \eta_{прм.РС}}{E_{ЗС i} \cdot G_{прм.РС} \cdot \eta_{прм.РС} \cdot P_{ш.ЗС i} \cdot L_{\Sigma 2} + E_{РС} \cdot G_{прм.ЗС} \cdot \eta_{прм.ЗС i} \cdot P_{ш.РС} \cdot L_{\Sigma 1}}, \quad (5)$$

где $E_{ЗС i}, E_{РС}$ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность i -го ПК и РС; $G_{прм.ЗС i}, G_{прм.РС}$ – коэффициенты усиления на передачу антенны ЗС и РС; $\eta_{прм.ЗС i}, \eta_{прм.РС}$ – затухание сигнала i -го ПК и РС в приемном фидерном тракте.

Итоговое выражение для определения необходимого уровня сигнала на выходе усилителя мощности ЗС с ПК (6) с учетом выражения (5):

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{Q_i} \left[\frac{P_{с пр ЗС i}}{P_{ш \Sigma ЗС i}} \right]. \quad (6)$$

Требования к скорости передачи ЗС задаются системой неравенств (7):

$$\sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j} = V_i^*, \quad Q_i \leq Q_i^*, \quad i = 1 \dots N, \quad (7)$$

где Q_i^* – максимально допустимое количество ПК i -й ЗС; V_i^* – требуемая скорость передачи данных i -й ЗС.

Итоговая схема модели линии спутниковой связи при работе ЗС с ПК представлена на рис. 3. С целью упрощения расчета энергетических параметров ПК, целесообразно внести некоторые ограничения для парциальных радиолиний: модуляция – фазовая двухпозиционная (ФМ-2) или фазовая квадратурная (ФМ-4); кодирование – сверточное ($R = 1/2, K = 5$) или ($R = 3/4, K = 7$).

В данной постановке возможны два варианта расчета радиолинии с ПК:

1) при фиксированном значении суммарной скорости передачи данных (скорость магистрального канала) – $V_{МК} = \sum_{j=1}^{Q_i} V_{i,j}$;

2) при фиксированном значении суммарной ширины полосы частот – $\Delta f_{\Sigma ПК}$, необходимой для работы ЗС с ПК с требуемыми параметрами.

Наибольший интерес представляет вариант с фиксированным значением $V_{МК}$, поскольку при определении необходимого для работы количества ПК нет привязки к значениям $\Delta f_{i,j}$ и подбор частотных полос осуществляется в соответствии с требованиями к качеству ПК радиолинии. Результаты расчета для первого варианта с учетом фиксированных параметров модуляции и кодирования для каждого ПК представлены в табл. 1 и на рис. 4 и 5.

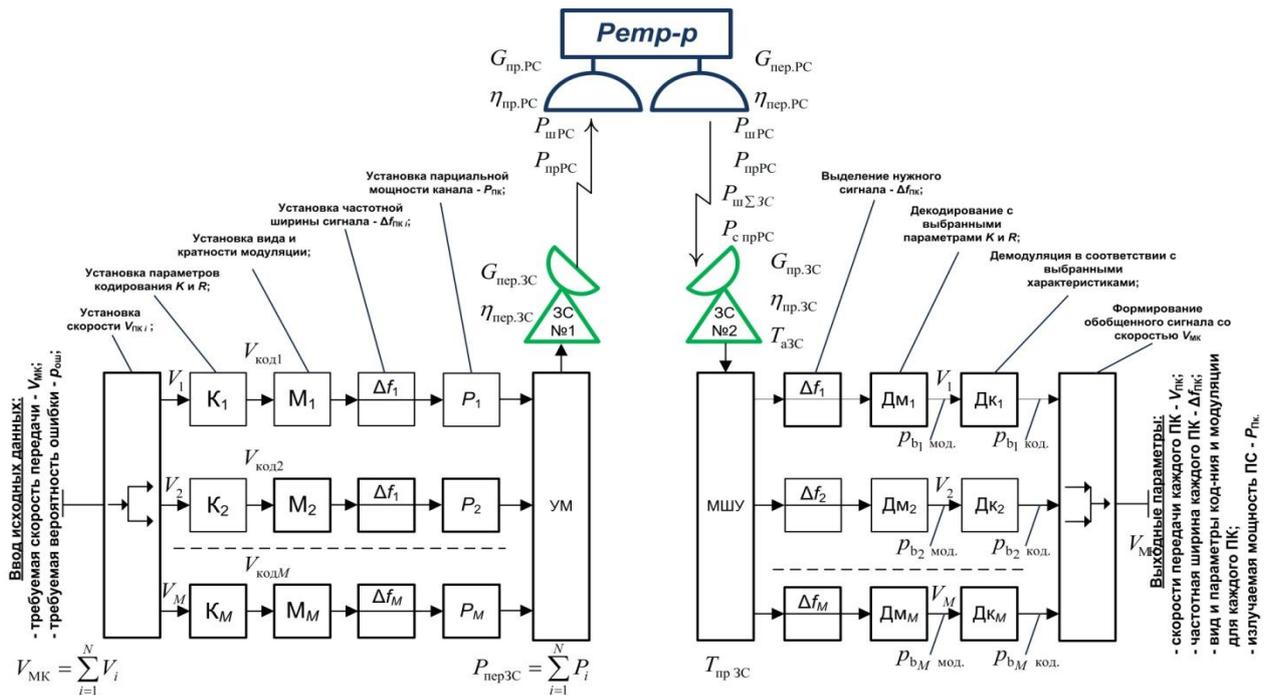


Рис. 3. Модель радиолинии спутниковой связи при работе ЗС с ПК

Оценка вероятности битовой ошибки p_b проводилась в приближениях, описанных в [11] для каждого ПК, в зависимости от выбранной модуляции (8) и помехоустойчивого кодирования (9) [8-11].

$$p_{b \text{ мод.}} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} p_{b_i \text{ мод.}}}{Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} \frac{1}{\sqrt{4\pi E_{b_i} \Delta f_i}} \exp\left(-\frac{E_{b_i} \Delta f_i}{P_{ш_i}}\right)}{Q_i}, \quad (8)$$

где $E_{bi}/P_{шi}$ – отношение энергии бита к мощности шума i -го ПК; Δf_i – ширина полосы частот i -го ПК; Q_i – количество ПК.

Таблица 1 – Характеристики радиолинии при работе ЗС с ПК

Характеристика радиолинии	Значение		
	1-й ПК	2-й ПК	3-й ПК
Скорость передачи данных, кбит/с	0.75	0.5	0.25
Занимаемая полоса частот, Гц	500	500	500
Вид и параметры модуляции и помехоустойчивого кодирования	ФМ-4, $R=3/4, K=7$	ФМ-4, $R=1/2, K=5$	ФМ-2, $R=1/2, K=5$
Вероятность битовой ошибки в канале	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}

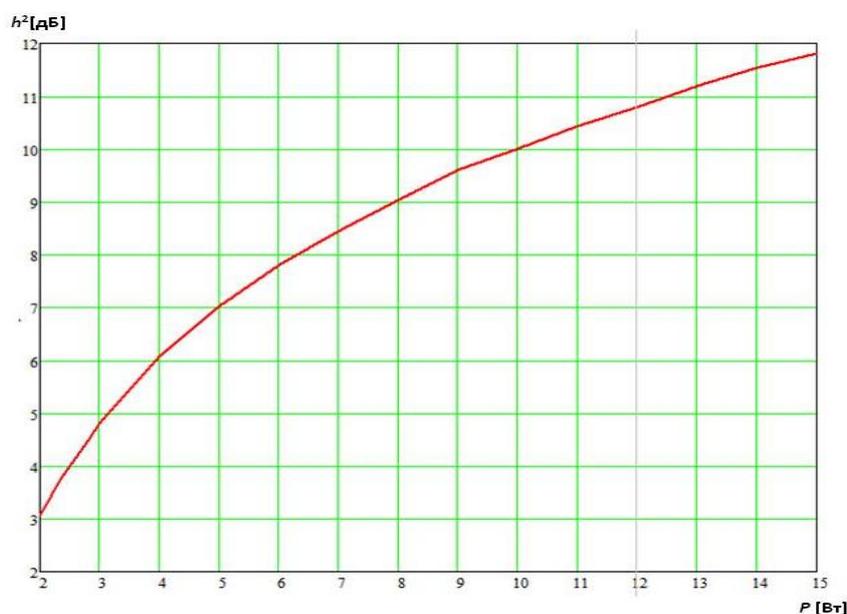


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал-шум от мощности передатчика ЗС с ПК

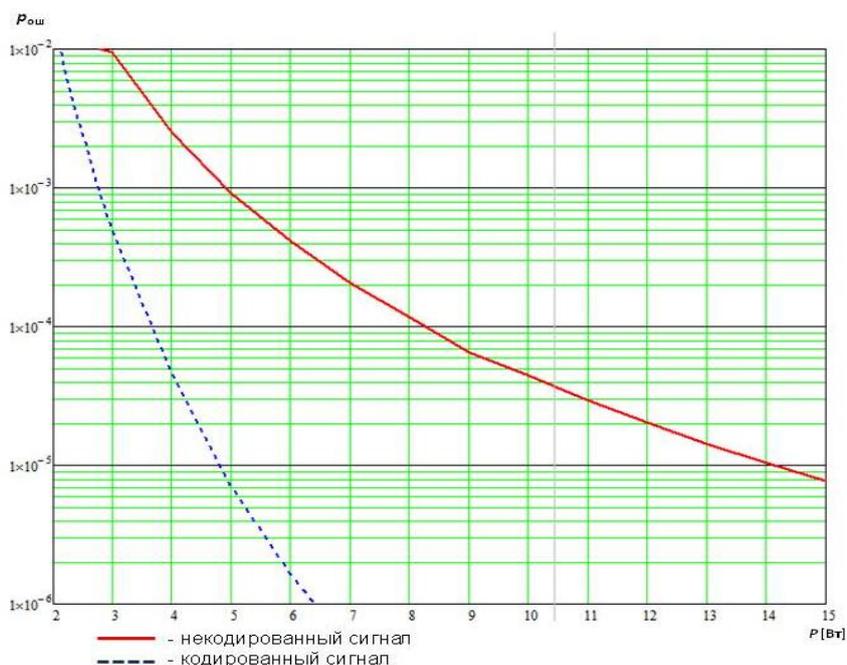


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от мощности передатчика ЗС с ПК

$$P_{b \text{ код.}} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} P_{b_i \text{ код.}}}{Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi R \Delta f_i}{P_{\text{ш}_i}}}} \exp\left(-R \frac{E_{b_i} \Delta f_i}{P_{\text{ш}_i}}\right)}{Q_i}, \quad (9)$$

где R – степень кодирования.

Таким образом, для достижения необходимой вероятности битовой ошибки передающая станция должна работать с мощностью передатчика равным 5 Вт.

Распределение мощности усилительного каскада передатчика между парциальными каналами. Влияние пик-фактора при работе парциальными каналами

Усилительный каскад передающей земной станции с парциальными каналами обеспечивает усиление отдельных парциальных сигналов в соответствии с требуемым уровнем мощности, причем работа усилителя мощности (УМ) осуществляется в многосигнальном режиме.

По мере увеличения уровня сигнала на входе УМ, он переходит в нелинейный режим усиления, появляются комбинационные помехи, поэтому УМ не используется в режиме максимальной мощности, соответствующей режиму насыщения, при этом теряется выходная мощность и коэффициент полезного действия (КПД), что негативно сказывается на энергетике радиолинии спутниковой связи. С другой стороны, имеет место низкий уровень комбинационных помех и отсутствие подавления слабого сигнала сильным.

При подаче на вход УМ сигнала нескольких парциальных каналов, суммарный уровень сигнала (10):

$$P_{\text{вх УМ}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{вх } i}, \quad (10)$$

где N – количество ПК; $P_{\text{вх } i}$ – мощность сигнала i -го ПК на входе УМ.

С учетом выражения (10) выходной уровень сигнала (11):

$$P_{\text{вых УМ}} = K \cdot P_{\text{вх } 1} + K \cdot P_{\text{вх } 2} + \dots + K \cdot P_{\text{вх } N} = K \cdot \sum_{i=1}^N P_{\text{вх } i}, \quad (11)$$

где K – коэффициент усиления.

Мощность излучения для каждого ПК индивидуальна ввиду различных значений их ширины полос частот, что, в свою очередь, влияет на скорость передачи данных отдельных ПК и достижение необходимого значения вероятности битовой ошибки на приеме.

Значение SNR на входе ЗС с ПК определяется в зависимости от вида модуляции, параметров помехоустойчивого кодирования и допустимого значения вероятности битовой ошибки на приеме.

Мощность шума i -го ПК (12) зависит от ширины полосы частот сигнала:

$$P_{\text{ш } i} = n_{\text{ш}} k T_0 \Delta f_i, \quad (12)$$

где $n_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника, определяемый маломушумящим усилителем, общим для всех ПК, а $k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Отношение сигнал-шум i -го ПК (13):

$$h^2 = \frac{P_i}{P_{\text{ш } i}} = \frac{P_{i+1}}{P_{\text{ш } i+1}} = \frac{P_N}{P_{\text{ш } N}}, \quad (13)$$

откуда баланс мощностей излучаемых сигналов (14) будет следующим:

$$\frac{P_{c i}}{P_{\text{ш } i}} = \frac{\Delta f_i}{\Delta f_{i+1}} = \frac{V_i}{V_{i+1}}. \quad (14)$$

Выходная мощность i -го ПК (15):

$$P_{\text{вых } i} = P_{\text{УМ}} \frac{P_{\text{ВХ } i}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{ВХ } i}} = P_{\text{УМ}} \frac{V_i}{\sum_{i=1}^N V_i}. \tag{15}$$

Кроме комбинационных помех при работе УМ в многосигнальном режиме существует вероятность возникновения в любой момент времени максимальной пиковой амплитуды, называемой пик-фактором или *PAPR* (*Peak-to-Average Power Ratio*).

При прохождении сигналов ПК через усилительный каскад передатчика, работающего в многосигнальном режиме, происходит сложение всех парциальных сигналов, в следствие чего фазы несущих могут накладываться друг на друга и это приведет к кратковременному повышению излучаемой мощности.

Частое появление подобных всплесков приводит к ограничению информационного сигнала, что в свою очередь влияет на качество передаваемой информации, появление, нежелательных излучений внутри и за пределами полосы частот сигнала, потере информации и невозможности ее восстановления после приема. При передаче сигнала важно, чтобы он был способен передавать свои максимальные значения без каких-либо искажений, так как только достоверная точность передачи сигнала сможет обеспечить эффективную передачу информации и целостность данных на приемной стороне.

Величина пик-фактора определяется как отношение максимальной мощности сигнала к средней (16):

$$K_{\Pi} = \frac{P_{\text{пик}}}{P_{\text{ср}}} = \frac{\max(S^2(t))}{P_{\text{ср}}}, \tag{16}$$

где $S(t)$ – вектор сигнала по времени; $P_{\text{пик}}$ – значение пиковой мощности сигнала; $P_{\text{ср}}$ – значение средней мощности сигнала.

Сигнал с ПК выглядит как *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) сигнал (рис. 6.), где отчетливо видны резко возникающие всплески, превышающие пороговое значение напряжения. Высокое значение *PAPR* требует наличия выходного усилительного каскада с достаточно большим динамическим диапазоном усиления, к тому же, за счет пиковых всплесков повышается выходная мощность усилителя мощности, приводящая к снижению энергетической эффективности системы в целом.

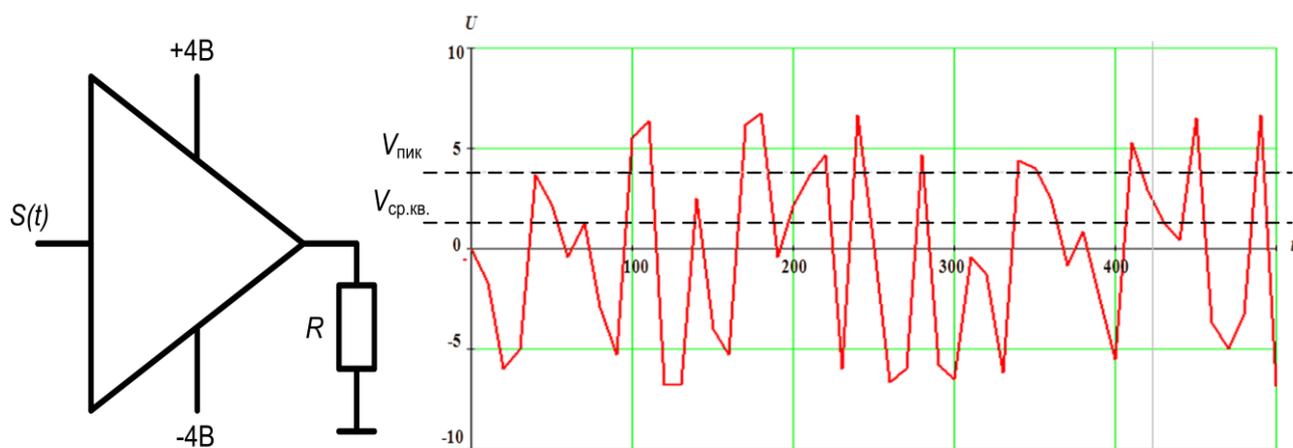


Рис. 6. Пример, иллюстрирующий усиление мощности сигнала с высоким значением *PAPR*

Упрощенная схема работы УМ представлена на рис. 6. Обобщенный сигнал на выходе передатчика, являющийся совокупностью парциальных сигналов, характеризуется пиковым и среднеквадратическим значениями напряжения – $U_{\text{пик}}$ и $U_{\text{ср.кв.}}$. Чтобы сигнал оставался

информативным, необходимо, чтобы между его максимальным значением напряжения и напряжением питания имелся достаточно большой запас, предотвращающий усечение пиков в сигнале [12].

На примере представленной на рис. 6 схеме видно, что при среднеквадратическом значении выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 1$ В, отношении пикового напряжения к среднеквадратическому $U_{\text{пик}} / U_{\text{ср.кв}} = 4$ В, уже на уровне 4 В будут наблюдаться кратковременные пиковые всплески. Следовательно максимальное значение полного размаха напряжения $U_{\text{max}} = 8$ В. Тогда выходная мощность равна 20 мВт, а ток нагрузки равен 20 мА, следовательно потребляемая от источника питания мощность – 80 мВт. Таким образом, коэффициент полезного действия усилительного каскада передатчика составляет всего 25 %.

Приведенный выше пример показывает, как важно учитывать влияние пик-фактора на коэффициент полезного действия усилительных каскадов при проектировании передающих систем высокой мощности.

С другой стороны, наличие запаса по напряжению приводит к значительному уменьшению коэффициента полезного действия, которое может быть достигнуто. При наличии высокого пик-фактора в сигнале следует придерживаться в выборе питающего напряжения ближе к пиковому значению.

При работе ЗС с ПК, парциальный сигнал на выходе передатчика описывается моделью (17):

$$S(t) = \sum_{i=1}^N U_i \cos(\omega_{0i} + \phi_k)t, \quad (17)$$

где N – количество ПК; U_i – максимальная амплитуда i -го ПК; $\phi_k(t)$ – фазовый член i -го ПК; ω_{0i} – несущая частота i -го ПК.

Задача состоит в оценке величины пик-фактора сигнала (17), которая определяется соотношением (16).

Мгновенная мощность $P(t)$ сигнала $S(t)$ пропорциональна квадрату его огибающей (18):

$$P(t) = A^2(t). \quad (18)$$

На основе выражения (17), многочастотный сигнал с ПК на выходе передающей ЗС определяется следующим образом (19):

$$S(t) = x(t) \cos \omega_{0i}t + y(t) \sin \omega_{0i}t, \quad (19)$$

где $x(t) = \sum_{i=1}^N U_i \cos \phi_k t$, $y(t) = \sum_{i=1}^N U_i \sin \phi_k t$.

С учетом выражения (19), значение $A(t)$ из формулы (18) можно определить следующим образом (20):

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}. \quad (20)$$

Так как передающий усилительный каскад ЗС для всех ПК один, то значение $PAPR$ можно определить согласно (21):

$$K_{\Pi} = \frac{P_{\text{пик}}}{P_{\text{ср}}} = \frac{\max(P_{\text{пик}})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right]}, \quad (21)$$

где $P_{\text{пик}} = \max(P_i)$ – пиковая мощность i -го ПК; n – число независимых отсчетов на интервале длительности элементарного сигнала.

Зная порядок определения пик-фактора для многокомпонентного сигнала с ПК, можно применить схемы его уменьшения.

Выводы

В статье рассмотрена модель линии спутниковой связи специального назначения работающая земной станцией с парциальными каналами, выполнена оценка качества принимаемого сигнала в различных условиях, что критически важно для обеспечения надежности систем.

Приведенная модель позволяет получить основные энергетические параметры радиолинии спутниковой связи, в том числе при условии сложной шумовой обстановки, что позволяет в результате повысить помехоустойчивость радиолиний и скорость передачи данных.

Применение ЗС с ПК приводит к увеличению коэффициента использования частотного ресурса ретранслятора связи и пропускной способности радиолинии спутниковой связи, что особенно важно при постоянном увеличении количества потребителей и объема передаваемой информации в сети спутниковой связи.

Литература

1. Стрелец В. Перспективы спутниковой связи в свете решений ВКР // Электросвязь. 2020. № 2. С. 5-9.
2. Владимирова Л. Спутниковая связь на пороге больших перемен // Первая миля. 2019. № 8 (85). С. 16-19.
3. Маслаков П. А., Копалов Ю. Н. Пути развития систем спутниковой связи в условиях совершенствования телекоммуникационных технологий // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9-10 (183-184). С. 39-46.
4. Бурлаков С. О., Драгунов М. Ю., Мишин Д. Ю., Новиков Е. А. Методика распределения частот спутникового ретранслятора для работы земных станций с парциальными каналами // Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2024. № 691. С. 26-31.
5. Жирнов А. И., Забело А. Н., Веркин С. С., Таиров Р. З., Горанько С. А. Методика расчета энергетических показателей радиолинии спутниковой связи // Вопросы науки. 2022. № 3. С. 15-20.
6. Чипига А. Ф., Щербаков В. С. Энергетический расчет спутниковой радиолинии в диапазоне метровых волн // В сборнике: Актуальные проблемы современной науки. Международная научно-практическая конференция. 2013. С. 188-191.
7. Бурлаков С. О., Веркин С. С., Егрусев В. Е., Антонов В. В. Методика оценки требуемой мощности передатчика земной станции // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 728-734.
8. Звонарев В. В., Попов А. С. Потенциальная помехоустойчивость когерентного приема четырехпозиционного фазоманипулированного радиосигнала в присутствии когерентной гармонической помехи // Информационно-управляющие системы. 2021. № 1 (110). С. 45-54.
9. Паршуткин А. В., Бучинский Д. И., Комлык Д. А. Исследование помехоустойчивости приемников сигналов с дискретной фазовой модуляцией в условиях помех с угловой модуляцией шумов // Труды МАИ. 2023. № 129.
10. Агеев Ф. И., Вознюк В. В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных противоположных фазоманипулированных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Труды МАИ. 2022. № 124.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
12. Коржихин Е. О., Власюк И. В. Методы снижения пик-фактора в системах наземного цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2 // Системы подвижной связи и цифрового телерадиовещания. Выпуск по итогам 6 отраслевой научной конференции МТУСИ «Технологии информационного общества». 2012. № 9. С. 83-86.

References

1. Strelec V. *Perspektivy sputnikovoj svyazi v svete reshenij VKR* [Prospects for satellite communications in the light of the decisions of the World Radiocommunication Conference]. *Electrosvyaz'* [Telecommunications and Radio Engineering]. 2020. № 2. Pp 5-9. (In Russian).
2. Vladimirova L. *Sputnikovaya svyaz' na poroge bol'shih peremen* [Satellite communications on the verge of big changes]. *Pervaya milya* [The first mile]. 2019. № 8 (85). Pp. 16-19. (In Russian).
3. Maslakov P. A., Kopalov Yu. N. *Puti razvitiya sistem sputnikovoj svyazi v usloviyah sovershenstvovaniya telekommunikacionnyh tekhnologij* [Ways to develop satellite communication systems in the context of improving telecommunication technologies]. *Voprosy oboronnoj tekhniki* [Issues of defense technology. Series 16]. 2023. № 9-10. Pp. 39-46. (In Russian).
4. Burlakov S. O., Dragunov M. Yu., Mishin D. Yu., Novikov E. A. *Metodika raspredeleniya chastot sputnikovogo retranslyatora dlya raboty zemnyh stancij s parcial'nymi kanalami* [The method of frequency distribution of a satellite repeater for the operation of earth stations with partial channels]. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo* [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy]. 2024. № 691. Pp. 26-31. (In Russian).
5. Zhirnov A. I., Zabelo A. N., Verkin S. S., Tairov R. Z., Goran'ko S. A. *Metodika rascheta energeticheskikh pokazatelej radiolinii sputnikovoj svyazi* [The method of calculating the energy parameters of a satellite radio line]. *Voprosy nauki* [Questions of science]. 2022. № 3. Pp.15-20. (In Russian).
6. Chipiga A. F., Shcherbakov V. S. *Energeticheskij raschet sputnikovoj radiolinii v diapazone metrovyh voln* [Energy calculation of a satellite radio line in the meter wave range]. *V sbornike: Aktual'nye problemy sovremennoj nauki. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [In the collection: Actual problems of modern science/ International Scientific and Practical Conference]. 2013. Pp. 188-191. (In Russian).
7. Burlakov S. O., Verkin S. S., Egrushev V. E., Antonov V. V. *Metodika ocenki trebuej moshchnosti peredatchika zemnoj stancii* [Methodology for estimating the required power of the Earth station transmitter]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie* [Innovation. Science. Education]. 2020. № 23. Pp. 728-734. (In Russian).
8. Zvonarev V. V., Popov A. S. *Potencial'naya pomekhustojchivost' kogerentnogo priema chetyrehpozicionnogo fazomanipulirovannogo radiosignala v prisutstvii kogerentnoj garmonicheskoy pomekhi* [Potential noise immunity of coherent reception of a four-position phase-manipulated radio signal in the presence of coherent harmonic interference]. *Informacionno – upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. 2021. № 1 (110). Pp. 45-54. (In Russian).
9. Parshutkin A. V., Buchinskij D. I., Komlyk D. A. *Issledovanie pomekhustojchivosti priemnikov signalov s diskretnoj fazovoj modulyaciej v usloviyah pomekh s uglovoj modulyaciej shumov* [Investigation of the noise immunity of receivers of signals with discrete phase modulation in conditions of interference with angular modulation of noise]. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute]. 2023. № 129. (In Russian).
10. Ageev F. I., Voznyuk V. V. *Metodika rascheta veroyatnosti bitovoj oshibki optimal'nogo posimvol'nogo kogerentnogo priema dvoichnyh protivopolozhnyh fazomanipulirovannyh signalov pri nalichii v kanale radiosvyazi uzkopolosnoj shumovoj pomekhi* [A method for calculating the probability of a bit error for optimal character-by-character coherent reception of binary opposite phase-manipulated signals in the presence of narrowband noise interference in a radio communication channel]. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute]. 2022. № 124. (In Russian).
11. Sklyar B. *Digital communications. Fundamentals and Applications*. Second Edition. Prentice Hall PTR. 2003. (In Russian).
12. Korzhihin E. O., Vlasyuk I. V. *Metody snizheniya pik-faktora v sistemah nazemnogo cifrovogo televisionnogo veshchaniya standarta DVB-T2* [Methods for reducing the peak factor in terrestrial digital television broadcasting systems of the DVB-T2 standard]. *Sistemy podvizhnoj svyazi i cifroovogo teleradioveshchaniya. Vypusk po itogam 6 otraslevoj nauchnoj konferencii Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki «Tekhnologii informacionnogo obshchestva»* [Mobile communication and digital broadcasting systems. The issue is based on the results of the 6th branch scientific conference of the Moscow Technical University of Communications and Informatics «Technologies of the Information Society»]. 2012. № 9. Pp. 83-86. (In Russian).

Статья поступила 26 октября 2024 г.

Информация об авторе

Драгунов Михаил Юрьевич – адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: системы специальной спутниковой связи. Тел.: +7(981)797-28-33. E-mail: dragunov1992@mail.ru.

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

Model of a satellite communication line with partial channels

M. Yu. Dragunov

Annotation. The purpose of the study: to develop a model of a satellite communication line with several partial channels operating in a trunk with direct signal relay. **Research methods:** as the main method, a method was chosen for determining the energy parameters of a radio line when exposed to various destabilizing factors in the trunk of a satellite repeater with direct signal retransmission, adapted to the calculation of several partial channels, taking into account the requirements for transmission speed and quality of the communication channel. **Results:** a model of a satellite communication line in a trunk with direct retransmission when working with Earth stations with partial channels is proposed. Unlike existing models, where the satellite communication line is represented by a single channel with a fixed frequency range in the trunk of a communication repeater, in the proposed model the number of radio line channels varies depending on the initial data for its modeling, as well as in the operation of the power amplifier of the earth station in multisignal mode, taking into account possible signal distortion due to its multisignality, maintaining a balance capacities at its output. The model of a satellite communication line with partial channels allows you to obtain the main energy parameters of the system, evaluate the quality of communication in various conditions, which allows you to optimize the distribution of the frequency resource of the communication repeater in the trunk with direct retransmission according to the criterion of maximum bandwidth, which, in turn, increases the transmission rate of the satellite radio line. **Scientific novelty:** the proposed model of a satellite communication radio line allows to increase the data transfer rate by flexibly configuring the parameters of each partial channel, selecting frequency bands for their operation depending on the requirements for communication quality, available resource and interference situation.

Keywords: satellite communication line, partial channel, direct signal retransmission, frequency resource, power balance, peak factor.

Information about the author

Dragunov Mikhail Yurievich – postgraduate student at the Military Academy of Communications named after Marshal Soviet Union S.M. Budyonny. Field of research: special satellite communication systems. Tel.: +7(981)797-28-33. E-mail: dragunov1992@mail.ru.

Address: 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky Prospekt, 3.

Библиографическая ссылка на статью:

Драгунов М. Ю. Модель линии спутниковой связи с парциальными каналами // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 57-68. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-57-68

Reference for citation:

Dragunov M. Yu. Model of a satellite communication line with partial channels. Means of Communication Equipment. 2024. No. 4 (168). Pp. 57-68. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-57-68 (in Russian).

Методы моделирования в создании систем и средств вторичной радиолокации

Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Смолин А. Ю., Яруллин Р. Р.

Аннотация. В данной статье приведен анализ существующих множества моделей, позволяющих существенно снизить затраты на разработку радиоэлектронных систем и средств вторичной радиолокации. **Постановка задачи** представленной статьи, заключается в перечислении существующих методов моделирования радиоэлектронных систем, их классификации по объединяющим признакам и приведении предполагаемых результатов, которых с их помощью можно достичь, **с целью** оптимального проектирования систем и средств вторичной радиолокации. **Методы:** Используя аналитический метод исследования, определены основные типы моделей, их свойства и полученные результаты, и предложена соответствующая классификация. **Полученные результаты** представляют собой подробную и полную классификацию моделей различных видов, позволяющих решить задачи квазиоптимального проектирования отдельных схем, устройств, средств и системы в целом. **Модели:** модель ситуации, модель радиоэлектронного противодействия, модель нарушителя, модель распределения объектов в зонах, их движения и порядка применения средств системы, модели условий распространения радиоволн, модели противодействия средствам системы, модели функционирования устройств, входящих в состав средств вторичной радиолокации, модели функционирования средств, модель воспроизведения условий функционирования средств, установка полунатурного моделирования условий применения системы и средств, модель оценки характеристик антенных систем, комплекс облета и оценки технических решений по сопряжению приемо-передающих средств вторичной радиолокации при размещении на объектах и информационно-регистрирующий комплекс определения условий функционирования и контроля применения средств вторичной радиолокации подробно описаны и поделены на пять уровней **Практическая значимость:** Представленные результаты могут быть использованы при проектировании радиоэлектронных систем и средств связи вторичной радиолокации.

Ключевые слов: классификация моделей, натурные модели, полунатурные модели, типы моделей.

Постановка задачи

Создание сложных радиоэлектронных систем, является комплексной задачей. При проектировании системы в целом и входящих в нее средств должны использоваться модели различных видов, позволяющие существенно снизить затраты на разработку, выявить существенные недостатки, неточности реализации закладываемых алгоритмов на ранних стадиях разработки. Проектирование любых радиоэлектронных систем ведется на разных уровнях описания реальных устройств, требующих построения различных моделей: электромагнитных, схмотехнических, системотехнических [1-4]. Создание обобщенной модели всех процессов, протекающих в реальных устройствах, несмотря на развитие современных вычислительных средств, в настоящее время представляется невозможным. Поэтому возникает необходимость развития различных видов моделей, позволяющих решить задачи квазиоптимального проектирования отдельных схем, устройств, средств и системы в целом. Таким образом, *целью данной статьи* является классификация моделей, которые необходимо использовать при проектировании систем и средств вторичной радиолокации.

Основная часть

На начальном этапе проектирования любой системы, прежде всего, должны формулироваться требования, которые к ней предъявляются. Данные описания являются фактически моделями *первого уровня* (табл. 1) проектирования систем вторичной радиолокации.

Таблица 1 – Классификация моделей, необходимых при создании систем и средств опознавания

№	Тип модели	Наименование модели	Результаты на выходе модели
1.	Описательные модели применения и противодействия системе	Модель ситуации	Описание порядка применения системы и средств
		Модель радиоэлектронного противодействия	Описание способов радиоэлектронного противодействия, включая способы провоцирования и имитации
		Модель нарушителя	Описание нарушителя и путей парирования угроз от его действий
2.	Аналитические и компьютерные модели применения систем	Модель распределения объектов в зонах, их движения и порядка применения средств системы	Оценки плотностей вероятностей распределений сигналов на входе средств
		Модели условий распространения радиоволн	
		Модели противодействия средствам системы	Оценки плотностей вероятностей распределений помех на входе средств
3.	Аналитические и компьютерные модели функционирования средств	Модели функционирования устройств, входящих в состав средств опознавания	Оценки вероятностей прохождения сигналов в устройствах
		Модели функционирования средств	Оценки вероятностей прохождения сигналов в средствах и системных характеристик
4.	Полунатурные модели	Модель воспроизведения условий функционирования средств	Оценка прохождения сигналов в реальных устройствах и средствах
		Установка полунатурного моделирования условий применения системы и средств	Оценка соответствия тактико-технических (системных) характеристик средств
		Модель оценки характеристик антенных систем	Оценка характеристик антенных систем
5.	Натурные модели и комплексы	Комплекс облета и оценки технических решений по сопряжению запросчиков системы государственного опознавания при размещении на объектах ВВТ	Оценка выполнения вероятностных характеристик средств при размещении на объектах вооружений и военной техники (ВВТ)
		Информационно-регистрирующий комплекс определения условий функционирования и контроля применения средств опознавания	Оценка реальных условий функционирования и контроля применения средств опознавания

В качестве моделей данного уровня должны использоваться: модель ситуации, модель радиоэлектронного противодействия и модель нарушителя. В качестве общей задачи описательных моделей можно рассматривать формирование порядка применения проектируемой системы и методов противодействия различного вида.

Описательные модели применения и противодействия системе позволяют перейти к моделям *второго уровня* – аналитическим и компьютерным моделям применения систем (табл. 1). Модели применения предполагают описание распределения объектов в зонах их движения и порядка использования средств проектируемой системы. Такое описание требует определения размеров моделируемой зоны, задания плотностей распределения объектов по высотам, координатам, введения классификации типов средств системы (по дальностям действия, линиям взаимодействия и др.). Важным элементом подобных моделей является определение алгоритмов применения средств системы от наиболее простого задания коэффициентов включения до определения признаков или условий взаимодействия средств, происходящих в моделируемой ситуации. Радиоэлектронные системы функционируют в сложных условиях распространения радиоволн. В радиотехнике в течение всего периода существования были разработаны различные модели, позволяющие учитывать распространение

радиоволн в различных условиях. Не претендуя на полноту всех используемых моделей, необходимо отметить следующие: распространение радиоволн с учетом затенения, модели мелко- и крупномасштабных замираний [5], модели отражений от винтов вертолета [6-10], модели отражений от турбин самолета [11-15], модели отражений от поверхности моря [16-20], модели распространения в условиях городской застройки [21-25], модели распространения в условиях пересеченной местности [26-30]. Модели распределения объектов в зонах, их движения и порядка применения средств системы, а также модели распространения радиоволн позволяют оценить многомерные плотности вероятностей распределения сигналов на входе средств. Использование модели радиоэлектронного противодействия с учетом моделей распространения радиоволн позволяет сформировать оценки плотностей вероятностей распределений помех на входе средств.

Оценки многомерных плотностей вероятностей сигналов и помех позволяют перейти к *третьему уровню* моделирования радиоэлектронных систем – созданию аналитических и компьютерных моделей функционирования средств. Радиоэлектронные устройства, входящие в состав средств вторичной радиолокации, представляют собой совокупность линейных, нелинейных, инерционных и безынерционных элементов, описываемых известными аналитическими выражениями [31]. В то же время развитие компьютерного моделирования позволило создать целый ряд программных средств системо- и схмотехнического уровня, используемых разработчиками. Модели функционирования устройств, входящих в состав средств вторичной радиолокации позволяют оценить вероятности прохождения сигналов в условиях действия смесей сигналов и помех, полученных на втором уровне моделирования. В свою очередь модели функционирования устройств позволяют синтезировать модели функционирования средств как совокупности устройств. Такие модели позволяют производить оценку системных характеристик средств вторичной радиолокации в заданных условиях применения. Фактически на данном уровне моделирования оценивается возможность выполнения основополагающих требований к системным характеристикам.

В качестве *четвертого уровня* моделирования предлагается использовать полунатурные модели условий функционирования и условий применения средств системы (табл. 1). Модель воспроизведения условий функционирования средств может быть единой с моделью условий применения средств системы. В то же время у приведенной в табл. 1 классификации имеется определенный смысл. Под моделью воспроизведения условий функционирования средств предполагается совокупность полунатурных моделей сложных условий сигнально-помеховой обстановки и условий распространения радиоволн. В то же время полунатурная модель применения предполагает сосредоточение основного внимания на вопросах порядка применения системы и средств.

Антенные системы значительно влияют на результирующие характеристики радиоэлектронных систем. Для оценки характеристик антенн необходимо использование полунатурных моделей, представляющих собой безэховые камеры, предназначенные для оценки характеристик направленности и уровней боковых лепестков антенн. Оценки, получаемые в данных моделях, могут использоваться для уточнения моделей третьего уровня.

Натурные модели и комплексы (табл. 1) позволяют оценить вероятностные характеристики средств при их размещении непосредственно на объектах. Одной из основных проблем при сопряжении приемо-передающих устройств с комплексами обнаружения является оценка вероятностных характеристик вторичной радиолокации при различных высотах и дальностях полета опознаваемого объекта. В подобных случаях обычно использовались пилотируемые летательные аппараты. Развитие беспилотных летательных аппаратов и улучшение массогабаритных характеристик приемо-передающих устройств системы вторичной радиолокации позволяет в настоящее время по-новому подойти к процессам натурального моделирования сопряжения приемо-передающих устройств с комплексами обнаружения. Оценка реальных условий функционирования и контроля применения средств вторичной радиолокации является важным этапом оценки эффективности их применения. Подобные оценки должны

выполняться с помощью информационно-регистрирующих комплексов определения условий функционирования и контроля применения средств вторичной радиолокации. Подобные комплексы позволяют получить необходимые данные для уточнения и корректировки моделей практически всех анализируемых в данной работе уровней, уточнить требования к перспективным системам и средствам вторичной радиолокации.

Выводы

1) Предложена классификация моделей, которые необходимо использовать при проектировании систем и средств вторичной радиолокации.

2) Описательные, аналитические, компьютерные, полунатурные и натурные модели применения и функционирования позволяют сформировать единый комплексный подход к проектированию систем и средств вторичной радиолокации от корректного задания требований до всесторонней оценки получаемых характеристик.

Литература

1. Плотницкая Е. С., Веремьев В. И., Воробьев Е. Н. Теоретическая модель сигнала, отраженного от вращающихся винтов вертолета // Доклады 22 международной НТК DSPA-2020. IEEE, 2020. С. 327-331.
2. Гейстер С. Р., Нгуен Т. Т. Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от несущего винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры // Известия вузов России. Радиоэлектроника. Т. 22. 2019. № 3. С. 74-87.
3. Poonle A. A., and Owolabi O. J. Path Loss Modelling Of UHF Radio Wave Propagation in Ado-Ekiti, Nigeria. ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD), 2019. V. 2 (1). Pp. 90-102.
4. Ogbulezie J. C., Akonjom N. A., Ojomu S. A., Ezugwu A. O., and Igajah I. E. A Review of Path Loss Models for UHF radio waves Propagation: Trends and Assessment. International Journal of Research in Engineering and Science. 2016. V. 4 (7). Pp. 67-75.
5. Ebhota C. V., Isabona J., and Srivastava V. M. Base Line Knowledge on Propagation Modelling and Prediction Techniques in Wireless Communication Networks. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13 (7). Pp. 1919-1934.
6. Nazmat T. S. B., Nasir F., Segun I. P., Muhammed A. S., Abdulkarim A. O., and Carlos T. C., "Path Loss Predictions For Multi-Transmitter Radio Propagation In VHF Bands Using Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System", Engineering Science and Technology, an International Journal, Elsevier. Pp 679-691, 2018.
7. Saakian A. S. Radiowave Propagation Fundamentals. Artech House. 2011.
8. Sizun H. Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications. 2011.
9. Нгуен Тьен Тхай, Нгуен Чунг Тхань, Нгуен Тьен Тай. Устранение влияния сигнала, отраженного от корпуса летательного аппарата, на каналы построения изображений его винтов // Евразийский Союз Ученых. 2020. Т. 2. № 71. С. 32-37.
10. Si Tran Nguyen Nguyen, et al. Signal Separation of Helicopter Radar Returns Using Wavelet-Based Sparse Signal Optimisation. Edinburgh. National Security and ISR Division Defence Science and Technology Group, 2016. 70 p.
11. Bańczyk M. K., Samczynski P., Kulpa K., Misiurewicz J. Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars // IET Radar Sonar Navigation. 2015. V. 9. № 9. Pp. 1276-1283.
12. Богданов А. В., Лобанов А. А., Кучин А. А., Голубенко В. А. Метод комплексного распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровских РЛС воздушного базирования на этапе первичной обработки сигналов // Журнал СВУ. Техника и технологии. 2020. № 13 (3). С. 311-327.
13. Воробьев Е. Н. Распознавание воздушных целей в пассивном когерентном локаторе: дис. канд. техн. наук: 2.2.16. СПб., 2022. 120 с.
14. Lim H., Myung N. High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation Analysis of Aircraft Models // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2011. № 25 (8-9). Pp. 1092-1102.
15. Надточий В. Н. Математическая модель отраженного сигнала от воздушной цели с турбореактивным двигателем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2017. № 4 (19). С. 1-9.
16. Слюсарь Н. М. Частотные спектры сигналов, отраженных от самолетов с турбореактивными двигателями // Информационные радиосистемы и радиотехнологии. 2020. Материалы Республиканской научно-практической конференции. – Минск: БГУИР, 2020. – С. 257-261.

17. Малиновский В. В., Кориненко А. Е., Кудрявцев В. Н. Эмпирическая модель радиолокационного рассеяния в диапазоне длин волн 3 см на морской поверхности при больших углах падения // Известия вузов. Радиофизика. 2018. № 61 (2). С. 110-121.
18. Ерёмка В. Д., Кабанов В. А., Логвинов Ю. Ф., Мыщенко И. М., Разказовский В. Б., Роевко А. Н. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью. – Севастополь: Вебер, 2013. – 217 с.
19. Милащенко Е. А., Валеев В. Г. Прогнозирование характеристик обнаружения мелких морских целей с учетом негауссовских морских отражений применительно к когерентно-импульсной РЛС // Журнал Радиоэлектроники. 2014. № 3. С. 1-12.
20. Пирогов А. А., Жураковский В. Н. Моделирование сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности // Инженерный Вестник. 2017. № 5. С. 26-41.
21. Шебалкова Л. В. Моделирование сигнала, отраженного от морской поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2017: 13 междунар. науч. конгр. и выставка «Наука. Оборона. Безопасность – 2017»: сб. матер. национ. науч. конф. Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – С. 81-84.
22. Тихомиров А. В., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю., Михайлов В. Ю. Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн // Труды МАИ. 2017. № 97. С. 1-20.
23. Асотов Д. В., Авдеев В. Б., Сладких В. А., Матвеев Б. В. Моделирование процессов распространения радиоволн в условиях городской застройки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. № 9 (4). С. 1-5.
24. Затучный Д. А., Сладь Ж. В. О влиянии на распространение радиоволн в городе профиля его застройки // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 37-43.
25. Коврегина В. Н., Коврегина Г. М. Метод активного радиолокационного наблюдения дронов при мешающих отражениях в условиях городской застройки // Системный анализ и логистика. 2023. Вып. №2 (36). С. 11-19. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-2-11-19.
26. Corre Y. Yves Lostanlen Three-Dimensional Urban EM Wave Propagation Model for Radio Network Planning and Optimization Over Large Areas // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2009. № 58 (7). Pp. 3112-3123.
27. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математическая модель сигнала, отраженного от земной поверхности, при сопровождении РЛС низколетящей цели // Доклады БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 17-23.
28. Смирнов Н. В. Исследование работы радиовысотомера с линейной частотной модуляцией над лесной поверхностью. Пояснительная записка магистра. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 143 с.
29. Якута К. И. Математическая модель радиовысотомера. – Минск: УО «Белорусская государственная академия авиации», 2021. – 18 с.
30. Фомин А. Н., Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д. и др. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга / под общ. ред. И. Н. Ищука. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 292 с.
31. Bokov A., Markov Y., Vazhenin V., Margilevsky S. Universal mathematical model of SAR signals for natural surfaces // ITM Web Conf. Volume 30, 2019 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019). 2019. Pp. 1-7.

References

1. Plotnitskaya E. S., Veremyev V. I., Vorobyov E. N. *Teoreticheskaya model' signala, otrazhennogo ot vrashchayushchihsya vintov vertoleta* [Theoretical model of a signal reflected from rotating helicopter rotors]. *Doklady 22-j mezhdunarodnoj konferencii DSPA2020* [Proceedings of the 22-nd international conference DSPA-2020]. IEEE, 2020. Pp. 327-331. (In Russian)
2. Geister S. R., Nguyen T. T. *Matematicheskie modeli radiolokacionnogo signala, otrazhennogo ot nesushchego vinta vertolet, v prilozhenii k obrashchennomu sintezu apertury* [Mathematical models of a radar signal reflected from a helicopter main rotor as applied to inverse aperture synthesis]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Bulletin of Russian Universities. Radio Electronics]. 2019. V. 22. No. 3. Pp. 74-87. (In Russian)
3. Poonle A. A., and Owolabi O. J. Path Loss Modelling Of UHF Radio Wave Propagation in Ado-Ekiti, Nigeria. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, 2019. V. 2 (1). Pp. 90-102.

4. Ogbulezie J. C., Akonjom N. A., Ojomu S. A., Ezugwu A. O., and Igajah I. E. A Review of Path Loss Models for Uhf radiowaves Propagation: Trends and Assessment. *International Journal of Research in Engineering and Science*. 2016. V. 4 (7). Pp. 67-75.
5. Ebhota C. V., Isabona J., and Srivastava V. M. Base Line Knowledge on Propagation Modelling and Prediction Techniques in Wireless Communication Networks. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. V. 13 (7). Pp. 1919-1934.
6. Nazmat T. S. B., Nasir F., Segun I. P., Muhammed A. S., Abdulkarim A. O., and Carlos T. C. Path Loss Predictions For Multi-Transmitter Radio Propagation In VHF Bands Using Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System. *Engineering Science and Technology, an International Journal, Elsevier*. 2018. Pp. 679-691.
7. Saakian A. S. *Radiowave Propagation Fundamentals*. Artech House. 2011.
8. Sizon H. *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications*. 2011.
9. Nguyen Tien Thai, Nguyen Chunt Thanh, Nguyen Tien Thai *Ustranenie vliyaniya signala, otrazhennogo ot korpusa letatel'nogo apparata, na kanaly postroeniya izobrazhenij ego vintov* [Elimination of the influence of a signal reflected from an aircraft body on the channels for constructing images of its rotors]. *Evrazijskij Soyuz Uchenyh (ESU)* [Eurasian Union of Scientists (ESU)]. 2020. V. 2. No 71. Pp. 32-37.
10. Si Tran Nguyen Nguyen, Sandun Kodituwakku, Rocco Melino. Hai-Thanh Tran Signal Separation of Helicopter Radar Returns Using Wavelet-Based Sparse Signal Optimisation. Edinburgh. National Security and ISR Division Defence Science and Technology Group. 2016. 70 p.
11. Bańczyk M. K., Sameczynski P., Kulpa K., Misiurewicz J. Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars. *IET Radar Sonar Navigation*. 2015. V. 9. No 9. Pp. 1276-1283.
12. Bogdanov A. V., Lobanov A. A., Kuchin A. A., Golubenko V. A. *Metod kompleksnogo raspoznavaniya vozdushnyh celej v impul'sno-doplerovskih RLS vozdushnogo bazirovaniya na etape pervichnoj obrabotki signalov* [Method of integrated recognition of air targets in air-based pulse-Doppler radars at the stage of primary signal processing]. *ZHurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of SFU. Engineering and Technology]. 2020. No. 13 (3). Pp. 311-327. (In Russian)
13. Vorobyov E. N. *Raspoznavanie vozdushnyh celej v passivnom kogerentnom lokatore: dis. kand. tekhn. nauk: 2.2.16*. [Recognition of air targets in a passive coherent radar: diss. cand. sciences: 2.2.16]. St. Petersburg. 2022. 120 p. (In Russian)
14. Lim H., Myung N. High Resolution Range Profile-Jet Engine Modulation Analysis of Aircraft Models. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2011. No 25 (8-9). Pp. 1092-1102.
15. Nadtochiy V. N. *Matematicheskaya model' otrazhennogo signala ot vozdushnoj celi s turboreaktivnym dvigatelem* [Mathematical Model of the Reflected Signal from an Air Target with a Turbojet Engine]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. Nauchnyj zhurnal* [Modeling, Optimization and Information Technology. Scientific Journal]. 2017. No. 4 (19) (In Russian)
16. Slyusar N. M. *CHastotnye spektry signalov, otrazhennyh ot samoletov s turboreaktivnymi dvigatelyami* [Frequency Spectra of Signals Reflected from Aircraft with Turbojet Engines]. *Informacionnye radiosistemy i radiotekhnologii* [Information Radio Systems and Radio Technologies]. 2020. Proc. Rep. scientific-practical. conf. Minsk. BSUIR, 2020. Pp. 257-261. (In Russian)
17. Malinovsky V. V., Korinenko A. E., Kudryavtsev V. N. *Empiricheskaya model' radiolokacionnogo rasseyaniya v diapazone dlin voln 3 sm na morskoy poverhnosti pri bol'shih uglah padeniya* [Empirical Model of Radar Scattering in the 3 cm Wavelength Range on the Sea Surface at Large Angles of Incident]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of Universities. Radiophysics]. 2018. No. 61 (2). Pp. 110-121. (In Russian)
18. Eremka V. D., Kabanov V. A., Logvinov Yu. F., Mytsenko I. M., Razskazovsky V. B., Roenko A. N. *Osobennosti rasprostraneniya radiovoln nad morskoy poverhnost'yu* [Features of radio wave propagation over the sea surface]. Sevastopol. Weber, 2013. 217 p. (In Russian)
19. Milashchenko E. A., Valeev V. G. *Prognozirovanie harakteristik obnaruzheniya melkih morskikh celej s uchetom negaussovskih morskikh otrazhenij primenitel'no k kogerentno-impul'snoj RLS* [Forecasting the detection characteristics of small sea targets taking into account non-Gaussian sea reflections as applied to a coherent pulse radar]. *ZHurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2014. No. 3 (In Russian)
20. Pirogov A. A., Zhurakovskiy V. N. *Modelirovanie signalov, otrazhennyh ot vzbolnovannoy morskoy poverhnosti* [Modeling signals reflected from a rough sea surface]. *Inzhenernyj Vestnik* [Engineering Bulletin]. 2017. No. 5. Pp. 26-41 (In Russian)
21. Shebalkova L. V. *Modelirovanie signala, otrazhennogo ot morskoy poverhnosti* [Modeling of a signal reflected from the sea surface]. *Interexpo GEO-Sibir' – 2017: 13 mezhdunar. nauch. kong. i vystavka «Nauka. Oborona. Bezopasnost' – 2017»: sb. materialov nacion. nauch. konf.* [Interexpo GEO-Siberia–2017. 13-th

international scientific congress and exhibition «Science. Defense. Security – 2017». Collection of materials of the national scientific conf]. Novosibirsk. April 17-21, 2017. Novosibirsk. SGUGiT, 2017. Pp. 81-84 (In Russian)

22. Tikhomirov A. V., Omelyanchuk E. V., Semenova A. Yu., Mikhailov V. Yu. *Prognozirovanie parametrov rasprostraneniya radiovoln v usloviyah gorodskoj zastrojki pri ispol'zovanii nizko raspolozhennykh antenn* [Forecasting the parameters of radio wave propagation in urban areas using low-lying antennas]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI]. 2017. No. 97 (In Russian)

23. Asotov D. V., Avdeev V. B., Sladkikh V. A., Matveev B. V. *Modelirovanie processov rasprostraneniya radiovoln v usloviyah gorodskoj zastrojki* [Modeling of radio wave propagation processes in urban development]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2013. No. 9 (4) (in Russian)

24. Zatuchny D. A., Slad Zh. V. *O vliyanii na rasprostranenie radiovoln v gorode profilya ego zastrojki* [On the influence of the development profile on radio wave propagation in the city]. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation]. 2015. No. 222. Pp. 37-43 (in Russian)

25. Kovregin V. N., Kovregina G. M. *Metod aktivnogo radiolokacionnogo nablyudeniya dronov pri meshayushchih otrazheniyah v usloviyah gorodskoj zastrojki* [Method of active radar surveillance of drones with interfering reflections in urban development]. *Sistemnyj analiz i logistika* [Systems analysis and logistics: journal]. 2023. Is. No. 2 (36). St-Petersburg. GUAP. Pp. 11-19. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-2-11-19 (in Russian)

26. Corre Y. Yves Lostanlen Three-Dimensional Urban EM Wave Propagation Model for Radio Network Planning and Optimization Over Large Areas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009. No. 58 (7). Pp. 3112-3123.

27. Dyatko A. A., Kostromitsky S. M., Shumsky P. N. *Matematicheskaya model' signala, otrazhennogo ot zemnoj poverhnosti, pri soprovozhdenii RLS nizkoletyashchej celi* [Mathematical model of a signal reflected from the earth's surface when tracking a low-flying target by radar]. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR]. 2015. No. 8 (94). Pp. 17-23 (in Russian)

28. Smirnov N. V. *Issledovanie raboty radiovysotomera s linejnoy chastotnoj modulyaciej nad lesnoj poverhnost'yu. Poyasnitel'naya zapiska magistra* [Study of the operation of a radio altimeter with linear frequency modulation over a forest surface. Explanatory note of the master's degree]. Ekaterinburg. UrFU. 2015. 143 p. (in Russian)

29. Yakuta K. I. *Matematicheskaya model' radiovysotomera* [Mathematical model of a radio altimeter]. Minsk. UO "Belarusian State Aviation Academy". 2021. 18 p. (in Russian)

30. Fomin A. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. [et al.]. *Teoreticheskie i fizicheskie osnovy radiolokacii i special'nogo monitoringa* [Theoretical and physical foundations of radar and special monitoring]. Krasnoyarsk. Sib. federal. un-t, 2016. 292 p. (in Russian)

31. Bokov A., Markov Y., Vazhenin V., Margilevsky S. Universal mathematical model of SAR signals for natural surfaces. ITM Web Conf. Volume 30, 2019 29-th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2019). 2019. Pp. 1-7.

Статья поступила 17 сентября 2024 г.

Информация об авторах

Буткевич Юрий Рудольфович – аспирант кафедры Электронных и квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ). Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов: полунатурное моделирование, динамических хаос. Тел.: 8-986-929-15-91. E-mail: bytkevic@mail.ru.

Логин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры ЭКСПИ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов: динамический хаос. Тел.: 8-905-023-67-99. E-mail: sslogin@mail.ru.

Смолин Андрей Юрьевич – ведущий инженер. АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко». Область научных интересов: теория вероятностей. Тел.: 8-939-397-97-25.

Яруллин Раушан Разапович – главный конструктор по системным вопросам. АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко». Область научных интересов: полунатурное моделирование, система вторичной радиолокации. Тел.: 8-904-763-79-48.

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

Modeling methods in the creation of secondary radar systems and facilities

Yu. R. Butkevich, S. S. Loginov, A. Yu. Smolin, R. R. Yarullin

Annotation. This article provides an analysis of the existing set of models that can significantly reduce the cost of developing radio-electronic systems and secondary radar facilities. **The task** of the presented article is to list the existing methods of modeling radioelectronic systems, classify them according to unifying features and bring the expected results that can be achieved with their help, in order to optimally design secondary radar systems and facilities. **Methods:** using the analytical research method, the main types of models, their properties and the results obtained are determined, and an appropriate classification is proposed. **The results** obtained represent a detailed and complete classification of models of various types that allow solving the problems of quasi-optimal design of individual circuits, devices, tools and the system as a whole. **Models:** a model of the situation, a model of electronic countermeasures, an intruder model, a model of the distribution of objects in zones, their movement and the order of application of system means, models of radio wave propagation conditions, models of countering system means, models of the functioning of devices that are part of secondary radar means, models of the functioning of means, a model for reproducing the conditions of functioning of means, installation of semi-natural modeling conditions of application of the system and facilities, a model for evaluating the characteristics of antenna systems, the complex of overflight and evaluation of technical solutions for the coupling of secondary radar receiving and transmitting facilities when placed on facilities and the information and recording complex for determining the conditions of operation and monitoring the use of secondary radar facilities are described in detail and divided into five levels of **practical significance:** the presented results can be used in the design of radio electronic systems and communications of secondary radar.

Keywords: classification of models, full-scale models, semi-natural models, types of models.

Information about the authors

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

Loginov Sergey Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic and Quantum Means of Information Transmission (EQMIT) of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: dynamic chaos. Tel.: 89050236799. E-mail: sslogin@mail.ru

Smolin Andrey Yuryevich – Leading Engineer of JSC NPO Radioelectronics named after V.I. Shimko. research interests: probability theory. Tel.: 89393979725

Yarullin Raushan Razapovich – Chief Designer for System Issues of JSC NPO Radioelectronics named after V.I. Shimko. research interests: semi-natural modeling, secondary radar system. Tel.: 89047637948. Address: 420029, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Zhurnalstov Street 50.

Библиографическая ссылка на статью:

Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Смолин А. Ю., Яруллин Р. Р. Методы моделирования в создании систем и средств вторичной радиолокации // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 69-76. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-69-76

Reference for citation:

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

Обобщенная методика исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций

Морозов А. Н.

Аннотация. Изложен подход к исследованию (оценке) эффективности одной из важнейших составляющих системы радиосвязи, а именно, – системы электроэнергетического обеспечения портативных и носимых радиостанций. Дано определение данной системы, указана ее основная задача, а также роль и значимость в обеспечении функционирования вышестоящей системы. Определено, что активное повсеместное обеспечение носимыми и портативными радиосредствами приводит к запредельной нагрузке на существующую систему электроэнергетического обеспечения. Кроме того, установлено, что в ранее проводимых исследованиях, производилась оценка эффективности средств энергообеспечения (аккумуляторные батареи, зарядные средства, средства доставки) по отдельности – без учета их работы в системе и влияния на вышестоящую систему – систему радиосвязи. Исходя из этого, система электроэнергетического обеспечения впервые рассмотрена как подсистема системы радиосвязи. Представлена структура методики и описаны ее основные этапы. Разработанная методика позволяет осуществлять количественную оценку вариантов построения системы по критерию технической эффективности для обеспечения непрерывности функционирования радиостанций с учетом финансовых затрат на реализацию системы электроэнергетического обеспечения. Исследована эффективность использования средств заряда в системе электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций в зависимости от различных параметров аккумуляторных батарей. Проведена оценка необходимого количества каналов заряда и требуемого количества зарядных средств. Проведено исследование различных вариантов построения системы электроэнергетического обеспечения по критерию технической эффективности, и определен наиболее эффективный из них, позволяющий обеспечить непрерывное электропитание радиостанций, с учетом минимальных финансовых затрат на комплектование системы электроэнергетического обеспечения.

Ключевые слова: система электроэнергетического обеспечения, пропускная способность, носимые и портативные радиостанции, техническая эффективность, система массового обслуживания, аккумуляторные батареи, зарядные средства, варианты построения, время работы, время заряда, емкость, обеспечение электроэнергией, каналы заряда.

Введение

Для выполнения ряда задач при организации связи широко применяются носимые и портативные радиостанции. Некоторая совокупность таких средств связи представляет собой систему радиосвязи (СРС). Стоит отметить, что, в настоящее время, обеспечение носимыми и портативными радиостанциями осуществляется весьма массово. Имеющееся положение дел существенно увеличивает нагрузку на электроэнергетическое обеспечение СРС, т. к. общее количество средств радиосвязи весьма возросло. При этом должное функционирование СРС обеспечивают средства заряда, аккумуляторные батареи (АКБ) и средства доставки АКБ к средствам заряда и обратно. Исходя из этого, предлагается разобщи́нные 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].

Необходимость разработки методики исследования и оценки эффективности системы электроэнергетического обеспечения (СЭО) носимых и портативных радиостанций определяется тем, что, несмотря на проведенные рядом авторов исследования по повышению

эффективности других систем [2 – 5], в частности, систем электроснабжения объектов связи и иных объектов, в них не нашли отражения вопросы оценки и повышения эффективности СЭО, являющейся составной частью СРС.

Вышеотмеченные методики не позволяют оценивать степень соответствия показателей СЭО условиям организации СРС. Они также не позволяют оптимизировать исполнение элементов СЭО по наиболее важным показателям, определяемым функционированием СРС. Существенным недостатком этих методик является представление целевых функций в виде суммы взвешенных частных показателей, что связано с утратой физического смысла и наглядности, а также со значительным субъективизмом.

В предлагаемой автором методике, указанные недостатки устраняются введением обобщенного показателя эффективности, характеризующего связь СЭО с СРС и учитывающие особенности организации СЭО. Разработанная методика пригодна для исследования и оценки эффективности различных вариантов организации СЭО с учётом вариативного подхода к размещению зарядных средств. Кроме того, представленная методика учитывает влияние СЭО на функционирование вышестоящей системы – СРС [6].

Основное содержание методики исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций

Разработанная методика (рис. 1) исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций включает 2 этапа.

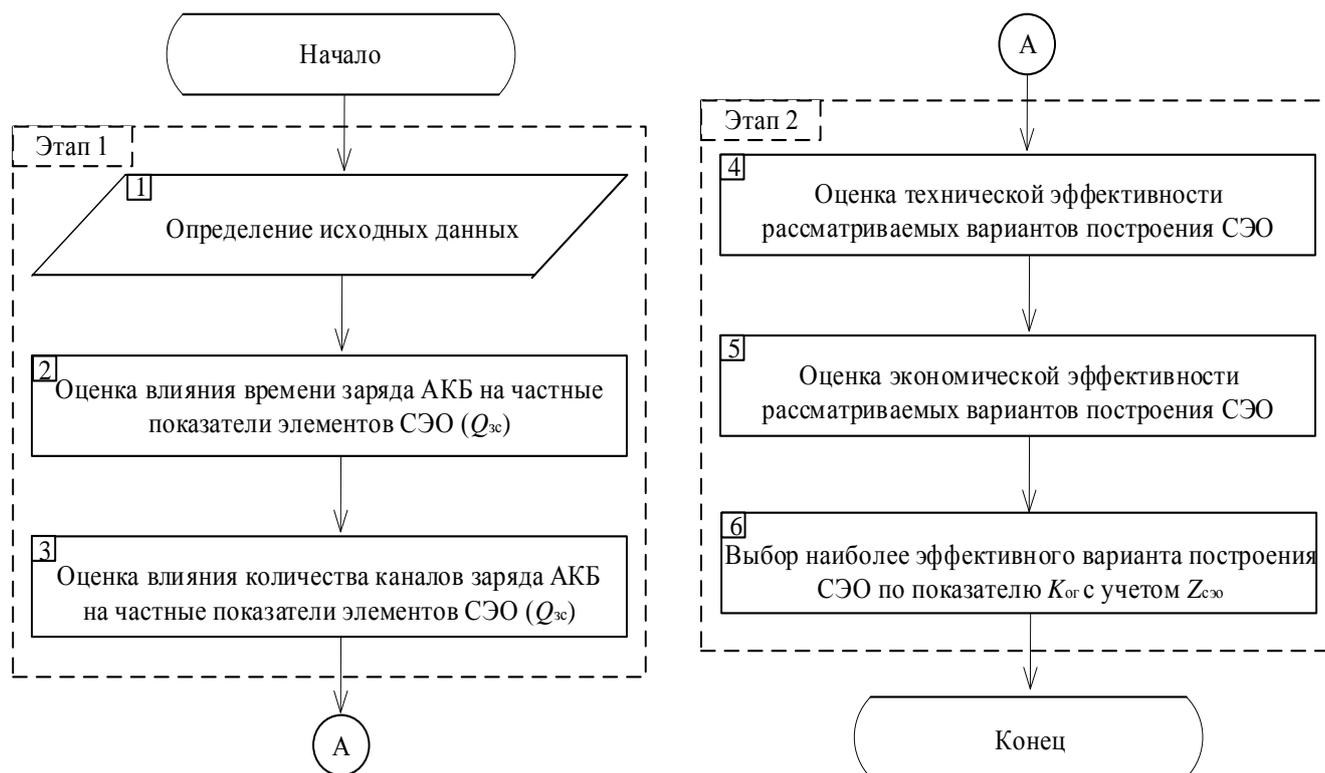


Рис. 1. Структура разработанной методики

Первый этап заключается в рассмотрении многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием, когда количество каналов заряда меньше, чем количество поступающих на заряд АКБ. В этом случае в средствах заряда образуется очередь с числом мест m , и они характеризуются интенсивностью заявок λ , обслуживания μ , а также следующими состояниями: S_0 – все каналы заряда свободны; S_1 – занят один канал заряда, остальные свободны; ..., S_k – заняты k каналов заряда, остальные свободны; S_n –

заняты все n каналов заряда; S_{n+1} – заняты все n каналов заряда и одна АКБ находится в очереди; ..., S_{n+r} – заняты все n каналов заряда и r АКБ находится в очереди; S_{n+m} – заняты все n каналов заряда и m АКБ находится в очереди (рис. 2).

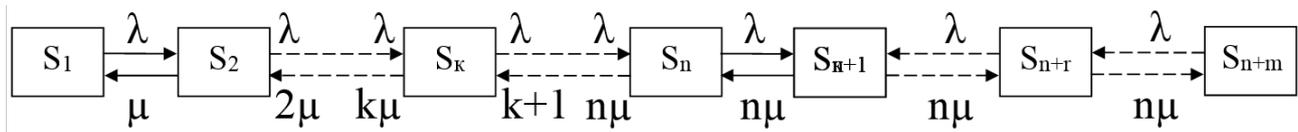


Рис. 2. Граф состояний в многоканальной СМО с ожиданием

Тогда для предельных вероятностей состояний в соответствии с графом и с учётом алгоритма образования очереди:

$$P_1 = \alpha p_0; P_2 = \frac{\alpha^2}{2!} p_0; \dots; P_n = \frac{\alpha^n}{n!} p_0; P_{n+1} = \frac{\alpha^{n+1}}{nn!} p_0; P_{n+2} = \frac{\alpha^{n+2}}{n^2 n!} p_0; \dots; P_{n+m} = \frac{\alpha^{n+m}}{n^m n!} p_0. \quad (1)$$

Приведённые вероятности состояний позволяют определить расчётные формулы для показателей средств заряда, характеризующие эффективность обслуживания АКБ. Среднее время ожидания с учётом вероятностей состояний можно представить в виде

$$\bar{t}_{ож} = \frac{p_0 t_3 \alpha^n}{nn!} \left[\frac{1 - (m+1)\chi^m + m\chi^{m+1}}{(1-\chi)^2} \right] \quad (2)$$

АКБ, находясь в системе заряда, затрачивает время не только на обслуживание ($t_{обс} = Q_{3y} t_3$) и пребывание в очереди, но и на подготовки к заряду ($t_{пдз}$), которое включает в себя время установки АКБ в зарядное устройство (ЗУ) в отведённое для неё место, выбор режима заряда, настройка органов управления и др. Кроме того, для отдельных типов АКБ требуется производить доразряд (за время $t_{дрз}$), чтобы сохранить их номинальную ёмкость. Тогда среднее время пребывания АКБ в ЗУ t_{3y} может быть определено из выражения

$$\bar{t}_{3y} = \bar{t}_{ож} + \bar{t}_{обс} = \bar{t}_{ож} + Q_{3y} t_3 + \bar{t}_{дрз} + \bar{t}_{пдз}. \quad (3)$$

Результаты исследования показателей ЗУ $Q_{3y} = f(t_3, \lambda_3, m)$ представлены на рис. 3.

Характер изменения функции $\bar{t}_{обс} = f(t_3, \lambda_3, m)$ представлен на рис. 4

Результаты исследования функции $\bar{t}_{ож} = f(t_3, \lambda_3, m)$ представлены на рис. 5

Исследования функции $\bar{t}_{3y} = f(t_3, t_{обс}, t_{ож})$ позволяют сделать вывод о том, что с целью уменьшения времени нахождения АКБ в процессе обслуживания, необходимо определить организационно-технические мероприятия, позволяющие сократить количество АКБ в очереди, использовать минимально возможное время заряда, более энергоёмкие АКБ с увеличенным $t_{рз}$.

Определение количества каналов заряда АКБ в СЭО представляет собой одну из задач, решение которой позволит эффективно обслуживать весь типаж АКБ. Используя СМО с ожиданием, в которой количество поступающих на заряд АКБ превышает количество каналов заряда в ЗУ, проведены исследования функции $Q_{3y} = f(t_3, \lambda_3, n, m)$, результаты которых представлены на рис. 6.

Результаты исследования функции с использованием в СЭО ЗУ с $n = 4$ (рис. 6) показывают, что все поступающие на заряд аккумуляторные батареи обслуживаются с максимальной пропускной способностью и заряжаются до номинальной ёмкости при всех рассматриваемых режимах заряда, следовательно, данное количество каналов заряда в ЗУ можно считать минимально достаточным для дальнейшего построения эффективной СЭО.

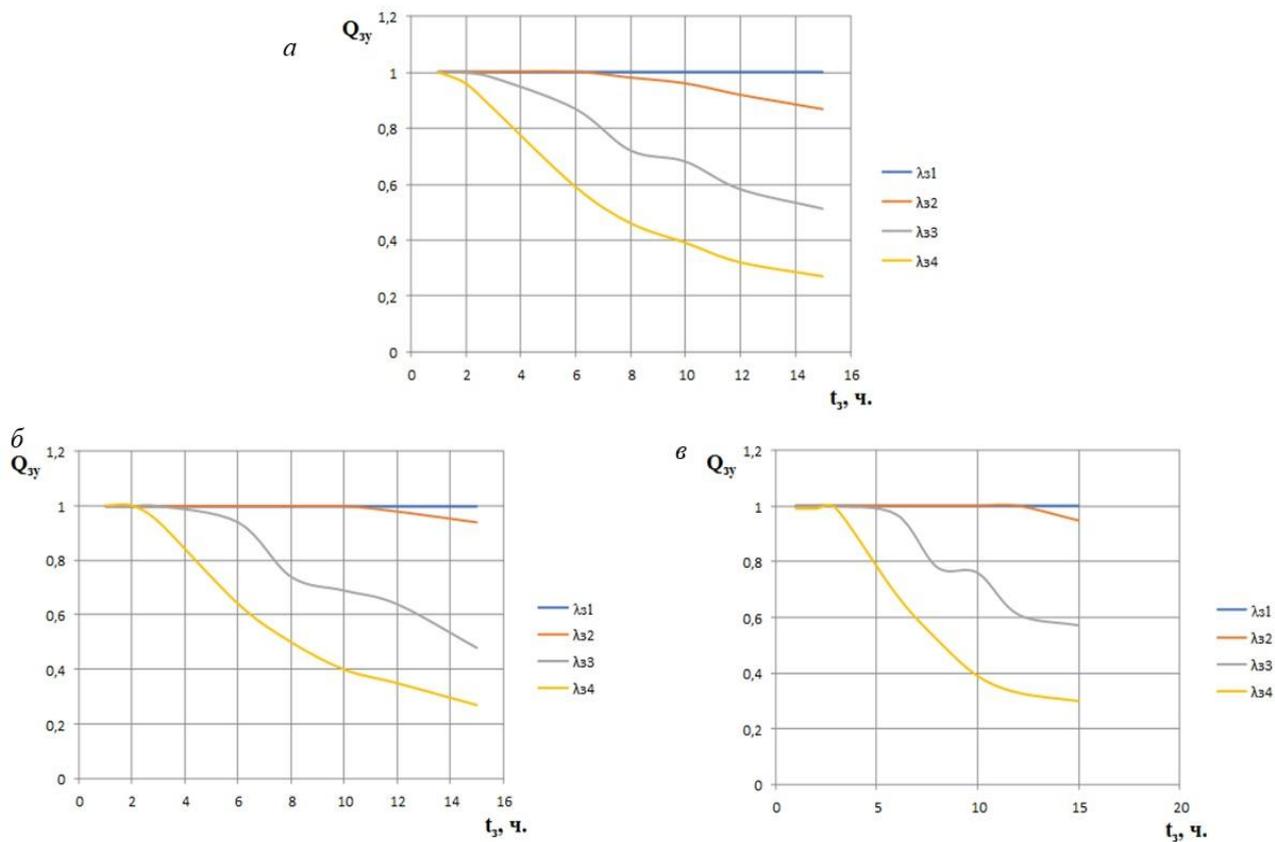


Рис. 3. Графики зависимости $\bar{t}_{ок} = f(t_3, \lambda_3, m)$ при: а – $m = 1$; б – $m = 3$; в – $m = 5$

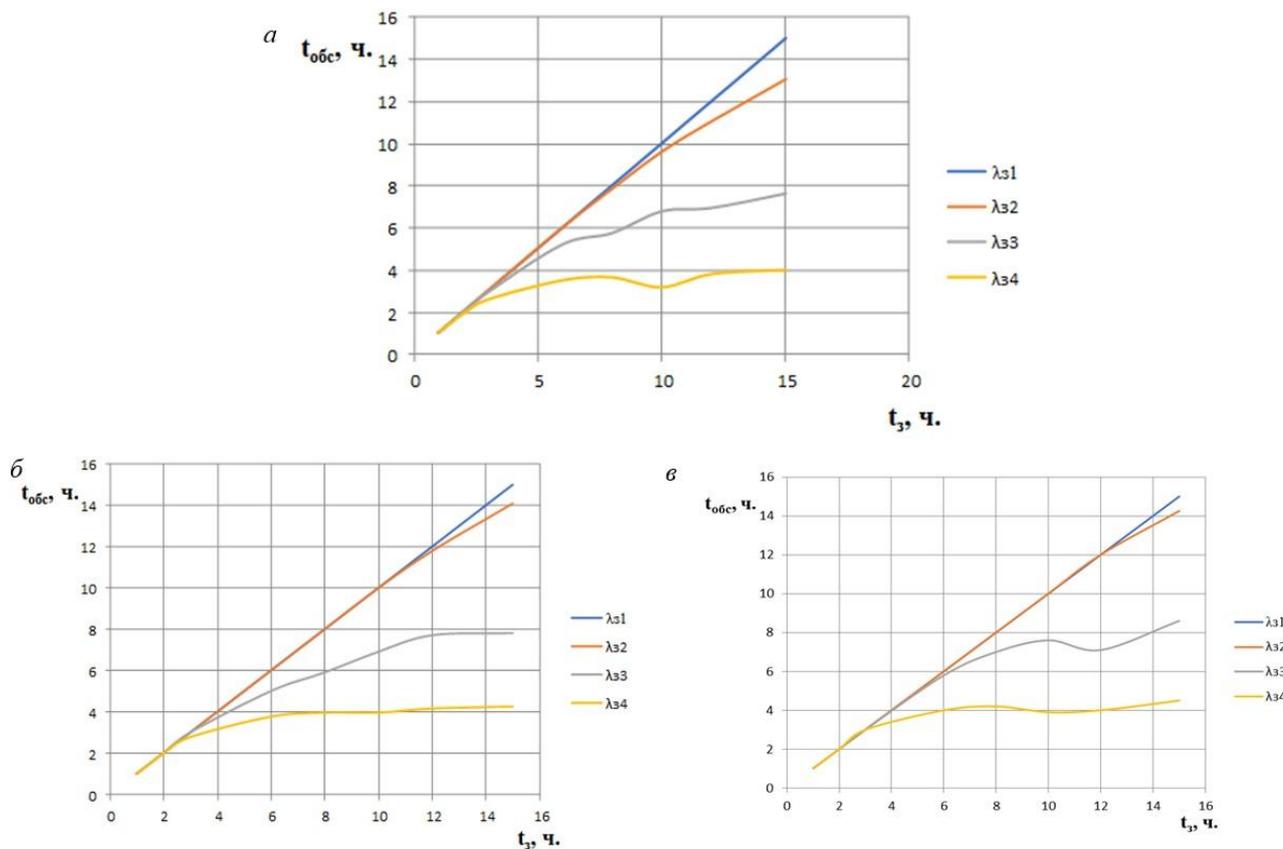


Рис. 4. Графики зависимости $\bar{t}_{обс} = f(t_3, \lambda_3, m)$ при: а – $m = 1$; б – $m = 3$; в – $m = 5$

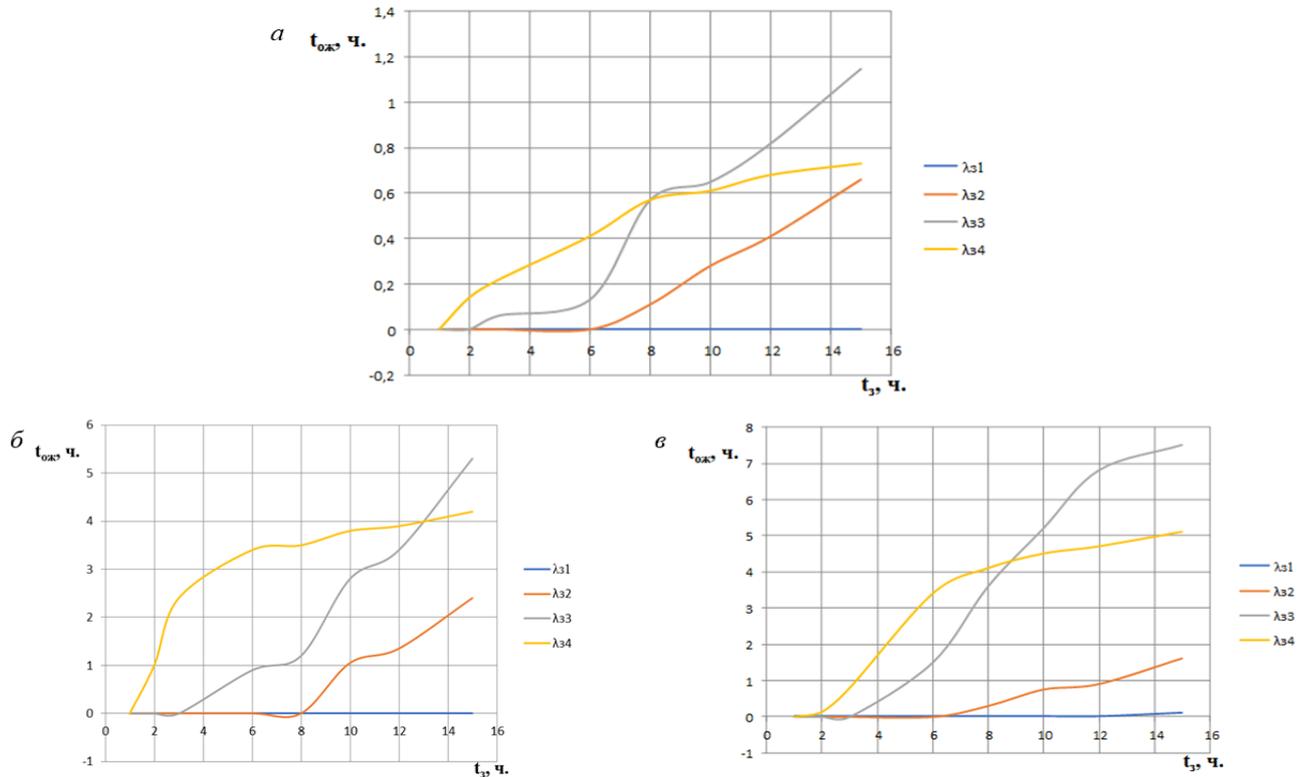


Рис. 5. Графики зависимости $\bar{t}_{ожк} = f(t_3, \lambda_3, m)$ при: а – $m = 1$; б – $m = 3$; в – $m = 5$

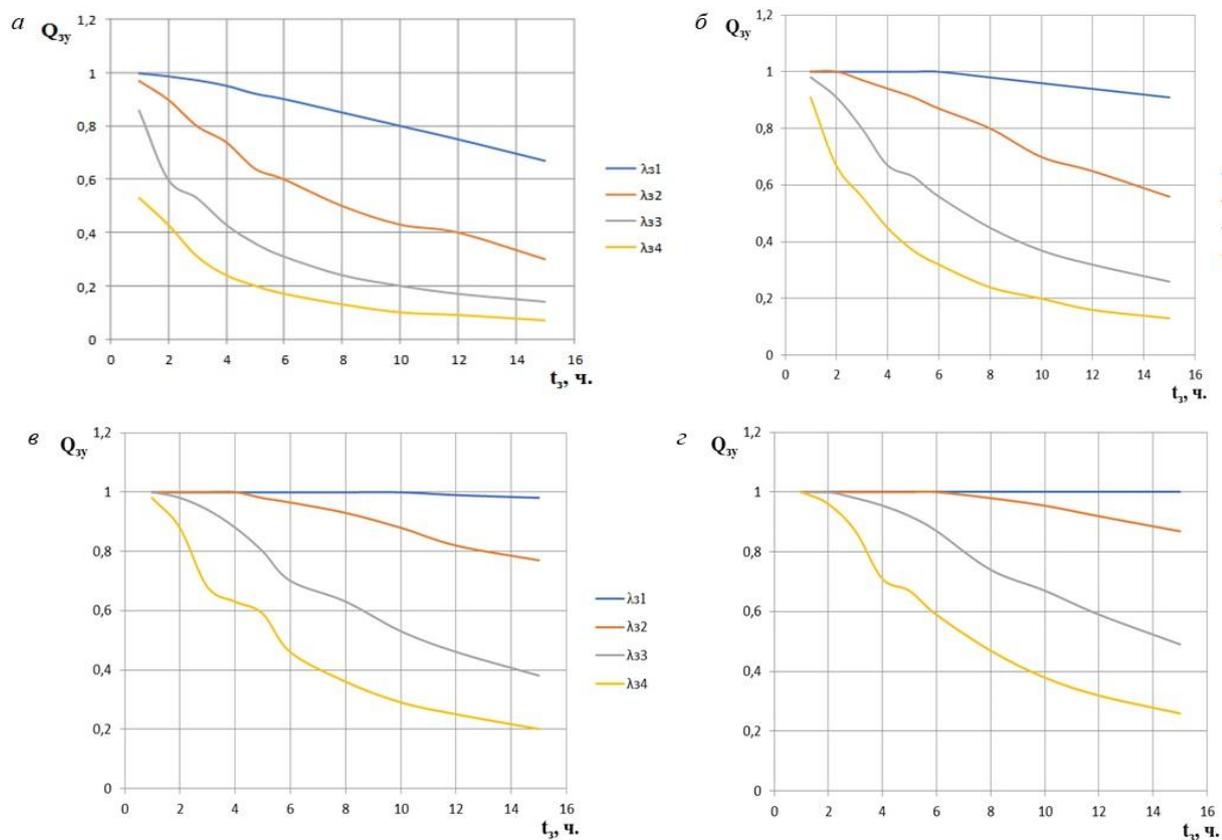


Рис. 6. Графики функции $\bar{t}_{ожк} = f(t_3, \lambda_3, m)$ при: а – $n = 1, m = 1$; б – $n = 2, m = 1$; в – $n = 3, m = 1$; г – $n = 4, m = 1$

Второй этап методики предполагает оценку технической эффективности рассматриваемых вариантов СЭО с учетом минимальных затрат на ее построение. Под технической эффективностью СЭО понимается степень соответствия системы заданным требованиям, обусловленным условиями ее использования. Выражение для определения технической эффективности СЭО имеет вид

$$K_{\text{от сэо}} = e^{-\frac{t}{t_{\text{доПС}}}} \frac{t_{\text{доПС}}}{t_{\text{доПС}} + t_{\text{прст}}} = e^{-\frac{t}{t_{\text{доПС}}}} \frac{t_{\text{доПС}}}{t_{\text{доПС}} + t_3 + t_{\text{ож}} + t_{\text{дрз}} + t_{\text{плз}} + t_d} . \quad (4)$$

Результаты исследования рассматриваемых вариантов построения СЭО показывают, что наиболее рациональным является вариант, в котором зарядные средства размещаются в непосредственной близости к местам эксплуатации носимых и портативных радиостанций. Кроме того, с финансовой точки зрения, данный вариант построения СЭО СРС является наиболее выгодным для реализации. Таким образом, разработанная методика позволяет исследовать различные варианты построения СЭО с учетом основных временных показателей ее функционирования, финансовых затрат и определять наиболее эффективные из них.

Заключение

В предлагаемой методике введен обобщенный показатель эффективности, характеризующий связь СЭО с СРС и учитывающий особенности организации СЭО. Разработанная методика пригодна для исследования эффективности различных вариантов организации СЭО с учётом вариативного размещения зарядных средств. Кроме того, представленная методика учитывает влияние СЭО на функционирование вышестоящей системы – СРС.

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. Лазарев И. А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1996. – 256 с.
3. Супрун Г. Ф. Синтез систем энергетики судов – Л.: Судостроение, 1982. – 325 с.
4. Тук Ю. Б. Теория и расчеты надежности систем электроснабжения – М.: Энергия, 1990 – 250 с.
5. Субетто А. И. Эффективность как мера качества систем и процессов – М.: МО СССР, 1985. – 46 с.
6. Морозов А. Н., Слепов С. Н. Повышение эффективности функционирования системы электроэнергетического обеспечения переносных комплексов связи // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. 2013. Вып. 4. С. 112–119.

Reference

1. Morozov A. N., Slepov S. N. Tasks and main directions of development of the system of military operation of batteries of portable communication devices of the tactical management link. Collection of works on problems of electric power industry. VA RVSН. 2009. pp. 71-75. (In Russian)
2. Lazarev I. A. Synthesis of the structure of aircraft power supply systems. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1996. 256 p. (In Russian)
3. Suprun G. F. Synthesis of ship energy systems. Leningrad. Shipbuilding 1982. 325 p. (In Russian)
4. Tuk Yu. B. Theory and calculations of reliability of power supply systems. Moscow. Energiya Publ., 1990. 250 p. (In Russian)
5. Subetto A. I. Efficiency as a measure of the quality of systems and processes. Moscow. Ministry of Defense of the USSR Publ., 1985. 46 p. (In Russian)
6. Morozov A. N., Slepov S. N. Improving the efficiency of the functioning of the electric power supply system for portable communication complexes. Radio electronics issues. Series FROM. 2013. Iss. 4. Pp. 112-119. (In Russian)

Статья поступила 05 ноября 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., д. 5.

Generalized methodology for the study (evaluation) of the efficiency of the electric power supply system for portable and portable radio stations

A. N. Morozov

Abstract: *An approach to the study (assessment) of the effectiveness of one of the most important components of a radio communication system, namely, the electric power supply system for portable and wearable radio stations, is described. The definition of this system is given, its main task is indicated, as well as the role and significance in ensuring the functioning of the higher-level system. It is determined that the active widespread provision of wearable and portable radio equipment leads to an exorbitant load on the existing power supply system. In addition, it was found that in previous studies, the effectiveness of energy supply facilities (batteries, chargers, delivery vehicles) was evaluated separately – without taking into account their operation in the system and their impact on the higher-level system - the radio communication system. Based on this, the electric power supply system was first considered as a subsystem of a radio communication system. The structure of the methodology is presented and its main stages are described. The developed methodology allows for a quantitative assessment of the options for building a system according to the criterion of technical efficiency to ensure the continuity of the operation of radio stations, taking into account the financial costs of implementing an electric power supply system. The efficiency of using charging means in the electric power supply system of wearable and portable radio stations, depending on various parameters of batteries, is investigated. An assessment of the required number of charge channels and the required number of chargers has been carried out. A study of various options for building an electric power supply system according to the criterion of technical efficiency has been conducted, and the most effective one has been determined, allowing for continuous power supply of radio stations, taking into account the minimum financial costs for completing the electric power supply system.*

Keywords: *power supply system, bandwidth, wearable and portable radios, technical efficiency, queuing system, batteries, chargers, construction options, operating time, charging time, capacity, power supply, charging channels.*

Information about Author

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 методика исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 77-83. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-77-83

Reference for citation:

Morozov A. N. Generalized methodology for the study (evaluation) of the efficiency of the electric power supply system for portable and portable radio stations. Means of Communication Equipment. 2024. № 4 (168). Pp. 77-83. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-77-83 (in Russian)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93

**Протоколы обмена данными между микроконтроллерами,
применяемые в радиоэлектронной аппаратуре**

Семенов С. С., Косырев А. В., Крачков А. А.

Аннотация. Особенностью современного развития системы технического обслуживания и ремонта средств связи и автоматизированных систем управления является тот факт, что появление новых, более сложных средств связи и систем требует новых подходов к диагностированию и ремонту, а именно внедрение средств автоматизированного диагностирования. **Цель работы** заключается в рассмотрении основных протоколов обмена данными между микроконтроллерами и определения их принципиальных особенностей, что в дальнейшем позволит выбрать необходимый протокол под конкретный тип решаемых задач диагностирования с учетом максимальной эффективности. **Новизна работы:** проведенный анализ протоколов обмена данными между микроконтроллерами в интересах развития автоматизированного диагностирования отказов средств связи и автоматизированных систем управления позволяет выявить новые возможности для смешанных подходов, комбинирующих преимущества различных протоколов, а также разработку более эффективных сетевых архитектур и систем устойчивых к ошибкам как в области проектирования радиоэлектронной аппаратуры, так и средств ее диагностики. **Полученные результаты:** проведен анализ применимости протоколов обмена данными, выявлены сильные и слабые стороны каждого протокола и выделены конкретные из них под решение определенных задач. При этом выбор протокола зависит от конкретных требований к системе, таких как скорость передачи, расстояние, количество устройств на шине и необходимая надежность передачи данных. **Практическая значимость** состоит в том, что данное сравнение может стать основой для новых исследований, направленных на улучшение существующих технологий связи и разработку новых подходов к взаимодействию между устройствами в зависимости от решаемой задачи при проектировании средств диагностирования радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: диагностирование, диагностика, протоколы обмена данными, микроконтроллеры, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, Controller Area Network.

Введение

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) реализована с применением различных микроконтроллеров [1-3] (МК), что значительно позволяет минимизировать массогабаритные показатели РЭА и снизить ее энергопотребление. В тоже время ремонт такой РЭА без средств внутреннего контроля и диагностирования значительно усложняется и занимает длительное время. Построение средств диагностирования с применением современных технологий и подходов значительно упростило бы эту задачу, соответственно данную функцию необходимо закладывать на стадии проектирования.

В научной школе Военной академии связи в данном направлении внесли значительный вклад такие ученые как: С. П. Ксёنز, А. А. Сикарев, П. А. Будко, А. Г. Головин, Е. В. Гречишников, Г. П. Дорошенко, А. И. Литвинов, А. В. Морозов, Б. Б. Ушаков, А. М. Винограденко и другие [4-7].

В соответствии с [8] микроконтроллер (*Micro Controller Unit, MCU*) – микросхема для программного управления электронными устройствами. По сути, это однокристалльный компьютер [8-10], рис. 1. Обычно изготавливается в виде единого кристалла с функциями ядра микропроцессора, шин команд и данных, периферийных устройств, оперативного (ОЗУ) и постоянного (ПЗУ) запоминающих устройств [9].

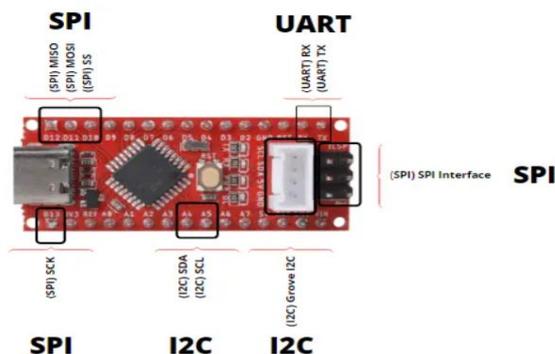


Рис. 1. Микроконтроллер *Arduino ATMEGA16U2*

В настоящее время, в сфере интернет вещей (IoT) широкое распространение получили МК *Arduino* и *STM32* [11-14].

Передача данных между МК – это важная задача в современных системах, где несколько МК работают совместно для выполнения различных функций. Существует несколько методов и протоколов передачи данных, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Протокол *UART*

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – это протокол, который используется для соединения цифровых устройств, преобразуя данные в последовательный цифровой формат и передавая их по одной физической цифровой линии.

UART [14] послужил основой для разработки и реализации различных компьютерных интерфейсов. Так на его основе был разработан стандарт физического уровня *RS-232*.

Принцип работы основан на приеме и передаче данных по двум физическим линиям: *TX* (передача) и *RX* (прием), рис. 2.

Передача осуществляется асинхронно, для синхронизации приема и передачи применяется стартовый бит, при этом скорости приемника и передатчика должны быть согласованы.

Передача осуществляется последовательно побитно. Инициализирует передачу стартовый бит, далее передается информации в виде битов данных, для проверки целостности данных передается бит четности (при его использовании), и завершает передачу стоповый бит. При этом скорость передачи измеряется в бодах (битах в секунду), а распространенные скорости передачи, реализованные в различных устройствах, составляют 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 бод и выше. В стандартном исполнении информация передается по 8 бит данных.

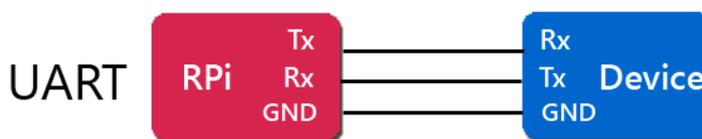


Рис. 2. Протокол *UART*

В данном протоколе реализован механизм обнаружения ошибки в переданном информационном сообщении, на основе проверки бита четности (в зависимости от конфигурации оборудования он может быть четным или нечетным). Механизм исправления ошибки отсутствует и при обнаружении ошибки осуществляется дублирование передачи. Данный протокол применяется для реализации устройств полудуплексной связи.

Для формирования временных интервалов приема и передачи применяется источник точного времени (тактирование). Многие *UART*-интерфейсы имеют встроенные буферы для передачи и приема.

- *скорость передачи данных*: от нескольких бит/с до 115200 бит/с и более;
- *топология*: точка-точка, один мастер и один слейв;
- *количество устройств*: обычно 2 (то есть передатчик и приемник);
- *проверка ошибок*: ограниченная, используется контрольная сумма;
- *использование*: сопряжение различных устройств с компьютером (модули *Bluetooth*, *GPS*).

Преимуществами *UART* является простота реализации, доступность, возможность работы на больших расстояниях.

Недостатками *UART* являются ограниченная скорость передачи и отсутствие поддержки многопользовательской среды.

В настоящее время активно используется в моделировании на базе *Arduino* с его помощью подключаются датчики, исполнительные устройства, дисплеи и специализированные модули. Так же по этому протоколу осуществляется загрузка программного обеспечения в *Arduino* и его проверка на стадии отладки.

Протокол *SPI*

Компания *Motorola* разработала и внедрила синхронный серийный интерфейс, обмена данными между МК и периферийными устройствами. Протокол *SPI* [15] (*Serial Peripheral Interface*) позволил эффективно решать задачи высокоскоростного обмена данными между *SD*-картами, модулями памяти и сенсорными экранами ещё в начале 80-х годов прошлого столетия. Данный протокол получил широкое распространение благодаря своей простоте.

Принцип функционирования основан на архитектуре мастер-слейв, в которой одно устройство выполняет роль мастера, осуществляя управление обменом данными между всеми устройствами и является ведущим, в то время как одно или несколько устройств подключенных к мастеру действуют в качестве ведомых, рис. 3.

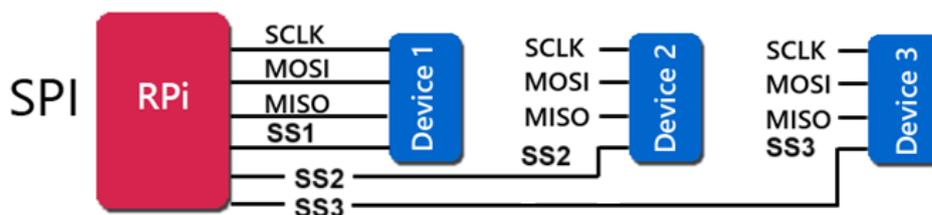


Рис. 3. Протокол *SPI*

Протокол *SPI* обеспечивает обмен данными по четырем основным линиям:

- *MOSI (Master Out Slave In)* — передача данных от мастера к слейву;
- *MISO (Master In Slave Out)* — передача данных от слейва к мастеру;
- *SCLK (Serial Clock)* — синхронизации;
- *SS (Slave Select)* — выбора слейва.

Реализация данного протокола осуществляется следующим образом.

Каждое устройство (слейв) подключено к определенной линии *SS* инициализация подключения осуществляется мастером, при этом он задает сигнал тактовой частоты на линии *SCLK*, определяя темп обмена данными. Далее мастер (ведущее устройство-микроконтроллер) инициализирует подключение с выбранным ведомым устройством, активируя его линию *SLAVE SELECT* (обычно с помощью логического нуля) и после этого

осуществляется двусторонняя передача данных по линиям *MOSI* и *MISO*. По окончании обмена данными мастер инициализирует подключение к следующему слейву и так далее.

Скорость передачи составляет от нескольких десятков килобит в секунду до нескольких мегабит. Она зависит от конкретных параметров пропускной способности МК и периферийных устройств. Длина проводки не превышает нескольких метров, с увеличением скорости передачи уменьшается длина соединительных линий и повышаются требования к проводникам, как по качеству материала, так и по их экранированию. К характеристикам *SPI* можно отнести:

- *топология*: точка-точка, один мастер и один или несколько слейвов;
- *скорость передачи данных*: до 10 Мбит/с и выше;
- *количество устройств*: определяется количеством линий выбора слейва;
- *проверка ошибок*: отсутствует (возможна при дополнительной реализации);
- *использование*: применяется для устройств, где требуется передача больших объемов информации и высокая скорость приема-передачи.

К преимуществам протокола *SPI* можно отнести высокую скорость, простоту в использовании, возможность полного дуплекса.

Недостатками протокола *SPI* является потребление большего количества проводов (необходимость в большом количестве линий управления).

Встраивание *SPI* в различные МК позволяет им легко обмениваться данными с несколькими устройствами без необходимости использования дополнительных линий, что используется для связи между интегральными схемами (IC), такими как центральный процессор и ПЗУ, или между несколькими процессорами. Широко применяется для подключения различных периферийных устройств, таких как датчики, *SD*-карты, *EEPROM*, дисплеев, радиомодулей и других устройств беспроводной связи. Так же может использоваться для загрузки данных и конфигураций в программируемые логические устройства (*FPGA*).

Протокол *I2C*

Компания *Philips* (сейчас *NXP Semiconductors*) разработала и внедрила последовательный протокол обмена данными между МК и периферийными устройствами. Протокол *I2C* [15] (*Inter-Integrated Circuit*) позволил эффективно решать задачи обмена данными между чипами внутри телевизоров ещё в начале 80-х годов прошлого столетия.

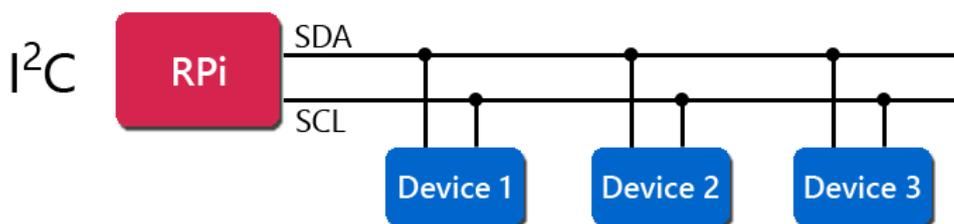


Рис. 4. Протокол *I2C*

I2C – это двухпроводной, синхронный серийный протокол. Каждому слейв-устройству присваивается уникальный адрес в виде 7 или 10 бит, который используется мастером для инициализации коммутации. Каждое слейв-устройство подключается к мастеру-устройству двумя линиями: *SDA* – линия для передачи данных, *SCL* – линия тактового сигнала, что в свою очередь обеспечивает двунаправленную передачу данных между ними.

Принцип работы основан на мастер-слейв архитектуре, рис. 3. Мастер-устройство отправляет стартовый бит, указывающий на начало передачи данных. Затем передает

адрес слейва с битом чтения/записи 7- или 10-битный адрес слэйв-устройства, с которым он хочет связаться, а также бит, указывающий направление передачи (чтение или запись). Если слейв, к которому был адресован запрос, готов к приему информации соответствующим адресом присутствует на шине, то он отправляет бит подтверждения (*ACK*). Теперь мастер и слэйв могут обмениваться данными. Мастер отправляет или принимает данные по линии *SDA* в синхронизации с линией *SCL* с подтверждением после каждого байта. После завершения обмена данными, мастер отправляет стоп-бит, обозначающий конец передачи.

I2C осуществляет передачу данных с различными скоростями: стандартная (100 кбит/с), быстрая (400 кбит/с), и быстрая+ (1 Мбит/с). В *I2C* используется техника подтягивания линий к питанию через резисторы.

В мульти-мастер конфигурации, реализован механизм арбитража, позволяющий определить приоритетность управления шиной тем или иным мастером при попытке одновременной передачи.

- *топология*: мульти-мастер;
- *скорость передачи данных*: до 3.4 Мбит/с;
- *количество устройств на шине*: до 127 устройств;
- *проверка ошибок*: контрольный бит;
- *использование*: часто применяется для связи между компонентами на одном плате (датчики, программно-логические интегральные схемы – ПЛИС и т. д.).

К преимуществам протокола *I2C* можно отнести простоту подключения и адресации, поддержку нескольких мастеров.

Недостатками протокола *I2C* являются: ограничения по длине и скорости передачи, меньше возможностей для больших расстояний.

I2C часто применяется для подключения МК к датчикам, дисплеям, АЦП и ЦАП, а также устройств памяти и других компонентов. Применяются в различных областях, таких как автомобилестроение, промышленная автоматизация, медицинское и климатическое оборудование, а также в системах управления. В бытовой электронике протокол *I2C* используется для связи между процессорами, дисплеями, датчиками и другими элементами.

Протокол CAN

Компания *Bosch* разработала и внедрила протокол *CAN* [16] (*Controller Area Network*) для обмена информацией между электронными блоками управления автомобиля ещё в начале 80-х годов прошлого столетия. Это была новинка в области передовых технологий автомобильной индустрии. *CAN* – это многоузловой децентрализованный протокол, по средствам которого множество различных устройств и блоков (нод) обмениваются данными без участия основного управляющего устройства.

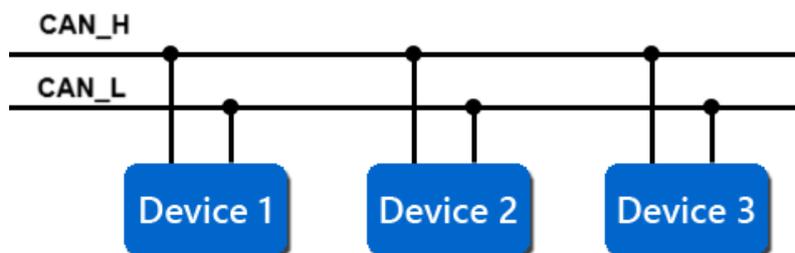


Рис. 5. Протокол CAN

Физическая реализация протокола основана на передаче данных по двум проводам *CAN_L* и *CAN_H*, рис. 5.

Для определения передачи логического 0 или логической 1 используется разностное значение между напряжением на линии *CAN_L* и *CAN_H*. Если разница напряжения менее 0,5 В, то передается логический 0 если более 0,5, то передается логическая 1. Данная реализация позволяет сохранять стабильную работоспособность системы в условиях электромагнитных наводок, в линии переада под воздействием электромагнитных помех.

Любая нода системы может осуществить инициализацию переада данных, в том случае если запрос поступает от нескольких нод одновременно, очередность переада решается при помощи механизма арбитража, и в зависимости от приоритетности переадаваемого сообщения. В протоколе *CAN* реализованы следующие типы кадра:

- *кадр данных*: переада данные от отправителя к получателю;
- *кадр запроса*: запрос на отправку данных;
- *кадр ошибки*: переадается при обнаружении ошибки любым устройством;
- *кадр перегрузки*: переадается при занятости шины в момент переада данных, если пропускная способность достигла предела.

Переада данных, реализованная в протоколе *CAN*, позволяет обеспечить скорость до 1 Мбит/с, в свою очередь имеется зависимость скорости от длины шины. С увеличением длины шины уменьшается скорость переада данных. Так для обеспечения скорости переада 1 Мбит/с длина шины не может превышать нескольких десятков метров, но при снижении скорости переада до нескольких сотен килобит в секунду, длина шины может доходить до 400 метров.

При переаде информационного сообщения, ему присваивается уникальный идентификатор *ID*, который используется для определения приоритетности сообщения. Эти идентификаторы имеют различную длину: стандартный – 11 бит и расширенный – 29 бит.

К характеристикам *CAN* можно отнести:

- *скорость переада данных*: до 1 Мбит/с;
- *топология*: мультимастер, используется шина;
- *количество устройств на шине*: до 127 устройств;
- *проверка ошибок*: имеет встроенные механизмы проверки ошибок и коррекции;
- *использование*: часто используется в автомобиле и промышленных приложениях, где надежность и устойчивость к помехам критичны.

К преимуществам протокола *CAN* можно отнести: высокую надежность, защиту от помех, поддержку большого количества устройств.

Недостатками протокола *CAN* являются: сложность реализации, требует дополнительных компонентов (например, трансиверов).

Протокол *CAN* применяемый в автомобиле строении зарекомендовал себя достаточно хорошо и это проверено временем. Обмен данными между различными электронными блоками автомобиля позволяет достаточно эффективно решать задачи, возложенные на электронные системы.

Сравнительная характеристика протоколов

Для лучшей наглядности сравнительная характеристика протоколов представлена в табл.

Предпочтения применимости по основным характеристикам рассмотренных протоколов можно представить следующим образом:

- *скорость переада данных*: $SPI > I2C > CAN > UART$;
- *количество поддерживаемых устройств*: *CAN* и *I2C* могут поддерживать большее количество устройств на шине, чем *UART* и *SPI*;
- *сложность реализации*: *UART* и *SPI* проще в реализации, в то время как *CAN* требует больше усилий для настройки;

Таблица – Виды протоколов

№ п/п	Характеристика	<i>UART</i>	<i>SPI</i>	<i>I2C</i>	<i>CAN</i>
1.	Назначение	Асинхронная передача	Периферия	Внутрисхемное подключение	Автомобили
2.	Сложность реализации	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
3.	Тип соединения	Асинхронное	Синхронное	Синхронное	Синхронное
4.	Топология	Точка-точка	Звезда	Древовидная	Шина
5.	Количество проводов для обмена	2	4 и более	2	2
6.	Обработка ошибок	Ограничена	Нет	Ограничена	Да
7.	Мульти-мастер	Не применимо	Нет (обычно один мастер)	Да	Да
8.	Скорость передачи	До 115200 бит/с	До 10 Мбит/с	100 кбит/с - 3.4 Мбит/с	До 1 Мбит/с
9.	Протяженность	До 1 км	Несколько метров	до 1м	До 1 км
10.	Адресация	Не требуется	По линиям SS	По адресу на шине	По идентификатору сообщения
11.	Устойчивость к помехам	Средняя	Низкая до средней (зависит от реализации)	Средняя	Высокая
12.	Поддержка арбитража	Не применимо	Нет	Да	Да (арбитраж без потерь)

- *дальность связи*: *UART* может обеспечивать большее расстояние, в то время как *SPI* и *I2C* имеют ограничения по длине кабеля;
- *ошибка и надежность*: *CAN* обеспечивает наивысшую надежность, тогда как остальные протоколы имеют более ограниченные возможности по обнаружению и исправлению ошибок.

Заключение

Таким образом, проанализировав протоколы обмена данными, необходимо отметить, что для разработки систем диагностирования протокол *UART* является безперспективным и устаревшим.

Остальные протоколы позволяют решать задачи построения систем диагностирования, а их применение зависит от конкретных особенностей радиоэлектронной аппаратуры, чувствительности к электромагнитным излучениям и типу применяемой элементной базы.

На данном этапе развития разработки и проектирования радиоэлектронной аппаратуры в целом так и построении систем диагностирования, в большинстве случаев в выборе того или иного протокола передачи данных основным фактором будет выступать тип поддерживаемого протокола конкретным микроконтроллером, на базе которого была или будет спроектирована РЭА. Такой подход позволяет значительно снизить финансовые затраты при проектировании и уменьшить время на испытания и отладку радиоэлектронной аппаратуры. При этом современные микроконтроллеры, применяемые в РЭА, при ее дополнении незначительным количеством радиоэлементов и внесении изменений в прошивку, позволяют реализовать диагностику на уже установленном микроконтроллере.

Литература

1. Майская В. Микроконтроллеры, микроконтроллеры, микроконтроллеры... Везде, где только можно вообразить // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2007. № 6 (80). С. 16-25.
2. Голубцов М. С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 288 с.
3. Белов А. В. Микроконтроллеры AVR от азов программирования до создания практических устройств. – СПб.: Наука и техника 2016. – 544 с.
4. Ксенз С. П. Техническая диагностика и ремонтпригодность средств и комплексов связи. – Л.: ВАС, 1982. 235 с.
5. Будко П. А., Винограденко А. М., Юров А. С. Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // *Датчики и системы*. 2014. № 9. С. 8-13.
6. Винограденко А. М., Будко Н. П. Адаптивный контроль технического состояния сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2020. Т.14. № 1. С. 25-36.
7. Литвинов А. И., Педан А. В, Ткачев Д. Ф. Устройство мониторинга технического состояния техники связи и автоматизированных систем управления // *Труды всероссийской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в Вооруженных Сил Российской Федерации»*. СПб.: ВАС, 2020. С. 179-184.
8. Иго Т. Arduino, датчики и сети для связи устройств: Пер. с англ. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 544 с.
9. Монк С., Шерц П. *Электроника. Теория и практика* – 4-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1168 с.
10. Куанышбек К., Тогжанова К., Кашаганова Г. [et al.] IoT технологиялар көмегімен тұрғын үйжайлардағы микроклиматты бақылау жүйесіне шолу және талдау // *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2024. No. 2 (131). Pp. 315-324.
11. Кутузов Д. В. Параллельная коммутация в высоконагруженных внутрочиповых маршрутизаторах // *Материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции «Наука и практика – 2019»* (Астрахань, 21-26 октября 2019 г.) / ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2019. – С. 91.
12. Ревич Ю. В. Программирование микроконтроллеров AVR: от Arduino к ассемблеру. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 448 с.
13. Noviello C. *Mastering STM32 / Carmine Noviello – Napoli.*: Ridero, 2017. –792 p.
14. Магда Ю. С. Программирование последовательных интерфейсов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2009. – 304 с.
15. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
16. Введение в протокол CAN // *Contract.marathon* [Электронный ресурс]. 10.11.2024. – URL: www.contract.marathon.ru (дата обращения 10.11.2024).

References

1. Majskaya V. *Mikrokontrollery`, mikrokontrollery`, mikrokontrollery`... Vезде, gde tol`ko mozhno voobrazit`* [Microcontrollers, microcontrollers, microcontrollers... Wherever you can imagine]. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2007. № 6 (80). Pp. 16-25. (In Russian).
2. Golubczov M. S. *Mikrokontrollery` AVR: ot prostogo k slozhnomu* [AVR Microcontrollers: from simple to complex]. Moscow. SOLON-Press Publ. 2003. 288 p. (In Russian).
3. Belov A. V. *Mikrokontrollery` AVR ot azov programmirovaniya do sozdaniya prakticheskix ustrojstv* [AVR microcontrollers from the basics of programming to the creation of practical devices]. St. Petersburg. Science and Technology Publ. 2016. 544 p. (In Russian).
4. Ksenz S. P. *Texnicheskaya diagnostika i remontoprignodnost` sredstv i kompleksov svyazi* [Technical diagnostics and maintainability of communication facilities and complexes]. Leningrad. Military Academy of Communications. 1982. 235 p. (In Russian).
5. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Yurov A. S. *Sposob monitoringa predavarijnogo sostoyaniya kontroliruemyy`x ob`ektov* [A method for monitoring the pre-emergency condition of controlled objects]. *Sensors and systems*. 2014. No. 9. Pp. 8-13. (In Russian).

6. Vinogradenko A. M., Budko N. P. *Adaptivnyj kontrol` texnicheskogo sostoyaniya slozhnyx texnicheskix ob`ektov na osnove intellektual`nyx texnologij* [Adaptive control of the technical condition of complex technical objects based on intelligent technologies]. T-Comm: Telecommunications and transport. 2020. V. 14. No. 1. Pp. 25-36. (In Russian).

7. Litvinov A. I., Pedan A. V., Tkachev D. F. *Ustrojstvo monitoringa texnicheskogo sostoyaniya texniki svyazi i avtomatizirovannyx sistem upravleniya* [Device for monitoring the technical condition of communication equipment and automated control systems]. Proceedings of the All-Army scientific and practical conference "Innovative activity in the Armed Forces of the Russian Federation". St. Petersburg, Military Academy of Communications. 2020. Pp. 179-184. (In Russian).

8. Igo T. *Arduino, datchiki i seti dlya svyazi ustrojstv* [Arduino, sensors and networks for device communication]. St. Petersburg. BHV-Petersburg Publ. 2015. 544 p. (In Russian).

9. Monk C., Shercz P. *E`lektronika. Teoriya i praktika* [Electronics. Theory and Practice]. St. Petersburg. BHV-Petersburg, 2018. 1168 p. (In Russian).

10. Қуаны`shbek Қ., Togzhanova К., Kashaganova G. [et al.] *IoT texnologiyalar komegimen тырғы`n yj-zhajlarday` mikroklimate baқы`lau zhyjesine sholu zhәне talдаu* [Review and analysis of the microclimate control system in residential premises using IoT technologies]. Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev. 2024. No. 2 (131). Pp. 315-324. (In Russian).

11. Kutuzov D. V. *Parallel`naya kommutatsiya v vy`sokonagruzhennyx vnutrichipovyx marshrutizatorax* [Parallel switching in high-load on-chip routers]. Science and Practice 2019: All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference: Materials (Astrakhan, October 21-26, 2019, Astrakhan State Technical University). Astrakhan. Astrakhan State Technical University, 2019. Pp. 91. (In Russian).

12. Revich Yu. V. *Programmirovaniye mikrokontrollerov AVR: ot Arduino k assembleru* [Programming of AVR microcontrollers: from Arduino to assembler]. St. Petersburg. BHV-Petersburg Publ. 2020. 448 p. (In Russian).

13. Noviello C. *Mastering STM32*. Carmine Noviello – Napoli. Ridero. 2017. – 792 p. (In Russian).

14. Magda Yu.S. *Programmirovaniye posledovatel`nyx interfejsov* [Programming of serial interfaces]. St. Petersburg. BHV – Petersburg Publ. 2009. 304 p. (In Russian).

15. Guk M. *Apparatny`e interfejsy` PK. E`nciklopediya* [PC hardware interfaces. Encyclopedia]. St. Petersburg. Peter Publ. 2002. 528 p. (In Russian).

16. *Vvedeniye v protokol CAN* [Logging into the CAN protocol]. Contract.marathon [Electronic resource]. 10.11.2024. URL: www.contract.marathon.ru (accessed 10.11.2024). (In Russian).

Статья поступила 28 ноября 2024 г.

Информация об авторах

Семенов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы контроля и диагностирования техники связи. Тел. +7(812)247–98–42. E-mail: semsem@yandex.ru.

Косырев Александр Вячеславович – адъюнкт кафедры. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы контроля и мониторинга состояния телекоммуникационных систем. Тел. +7 (812) 247–98–42. E-mail: sashka13rup@mail.ru.

Крачков Андрей Александрович – старший преподаватель кафедры. Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: методы контроля и мониторинга состояния телекоммуникационных систем. Тел. +7 (812) 247–98–42. E-mail: sckorpion73@yandex.ru.

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

Data exchange protocols between microcontrollers used in electronic equipment.

S. S. Semenov, A. V. Kosyrev, A. A. Krachkov

Annotation. A feature of the modern development of the system of maintenance and repair of communications and automated control systems is the fact that the emergence of new, more complex means of communication and automated control systems requires new approaches to diagnosis and repair, namely the introduction of automated diagnostic tools. **The purpose of the work** is to consider the main data exchange protocols between microcontrollers and determine their fundamental features, which in the future will allow you to choose the necessary protocol for a specific type of diagnostic tasks to be solved, taking into account maximum efficiency. **The novelty of the work** is the analysis of data exchange protocols between microcontrollers in the interests of developing automated diagnostics of failures of communication facilities and automated control systems allows us to identify new opportunities for mixed approaches combining the advantages of various protocols, as well as the development of more efficient network architectures and error-resistant systems both in the field of design of radio electronic equipment (REE) and means her diagnosis. **The following results** were obtained: each protocol has its own strengths and weaknesses and is better suited for certain tasks. The choice of protocol depends on the specific requirements of the system, such as transmission speed, distance, number of devices on the bus and the required reliability of data transmission. Thus, this comparison can become the basis for new research aimed at improving existing communication technologies and developing new approaches to interaction between devices. **The practical significance** lies in the fact that this comparison can become the basis for new research aimed at improving existing communication technologies and developing new approaches to interaction between devices, depending on the task being solved when designing REE diagnostic tools.

Keywords: diagnostics, diagnostics, data exchange protocols, microcontrollers, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, Controller Area Network.

Information about Autors

Sergey Sergeevich Semenov– Professor at the Department of the Military Academy of Communications. Research interests: methods of control and diagnostics of communication equipment. Tel: +7 (812) 247–98–42. E-mail: semsem@yandex.ru.

Alexander Vyacheslavovich Kosyrev– Postgraduate at the Department of the Military Academy of Communications. Research interests: methods of control and diagnostics of communication equipment. Tel: +7 (812) 247–98–42. E-mail: sashka13rup@mail.ru.

Andrey Alexandrovich Krachkov– Senior lecturer at the Department of the Military Academy of Communications. Research interests: methods of control and diagnostics of communication equipment. Tel: +7 (812) 247–98–42. E-mail: sckorpion73@yandex.ru.

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretskiy prospect, 3.

Библиографическая ссылка на статью:

Семенов С. С., Косырев А. В., Крачков А. А. Протоколы обмена данными между микроконтроллерами, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре // Техника средств связи. 2024. № 4 (168). С. 84-93. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93

Reference for citation:

Semenov S. S., Kosyrev A. V., Krachkov A. A. Data exchange protocols between microcontrollers used in electronic equipment. Means of Communication Equipment. 2024. No 4 (168). Pp. 84-93. DOI: 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Требования к предоставляемым материалам

Для публикации оригинальной статьи авторы представляют в редакцию следующие материалы:

1. Файл со статьей.
2. Файлы с рисунками (по отдельному запросу редакции). Предпочтительными вариантами являются векторные рисунки, выполненные в формате Visio (vsd) или в форматах метафайлов Windows (wmf или emf). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки представляются в растровых форматах png или jpg.
3. Сканированную копию экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию (в файле формата jpg, 300 dpi, в цвете).
4. Файл, содержащий сведения об авторском коллективе с указанием автора, который будет взаимодействовать с редакцией, с указанием его контактов.

Требования к оформлению статей, представляемых в редакцию:

1. Статья представляется в формате Word с расширением doc или docx.
2. Рекомендуемый объем статьи – до 10 страниц. Публикацию статей большего объема необходимо согласовать с редакцией в отдельном порядке, с пояснением причины, по которым увеличен рекомендуемый объем.
3. Размер страницы – А4. Все поля (верхнее, нижнее, правое и левое) по 2 см.
4. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размер 12 pt, междустрочный интервал – 1.0, абзацный отступ – 1,25 см, без отступов между абзацами. В основном тексте допускается курсив. Латинские буквы для обозначений набираются курсивом, греческие, русские буквы и цифровые индексы – прямым шрифтом.
5. В начале статьи индекс УДК, выровнен по левому краю. После УДК – пропуск строки.
6. Все аббревиатуры по тексту должны быть расшифрованы при первом использовании. Не использовать принудительный перенос строки (Shift+Enter), расстановку автоматических и ручных переносов.
7. Название статьи выполняется полужирным шрифтом и выравнивается по центру страницы без абзацного отступа. Название должно быть кратким (не более 10 слов) и точно отражать суть научной статьи. Не рекомендуется использовать в названии сокращения, кроме общепринятых в предметной области, аббревиатуры и формулы. Название предоставляется в редакцию на русском и английском языках. Точка после заглавия не ставится. После названия статьи следует пропуск строки.
8. Инициалы и Фамилии авторов указываются через запятую в соответствии с личным вкладом при написании статьи, выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. После фамилий авторов следует пропуск строки.
9. Аннотация выполняется на русском и английском языках, размер шрифта 11 pt, курсив, абзацный отступ 1,25 см. Заголовки элементов аннотации выделяются жирным шрифтом. Аннотация должна быть структурирована, без использования аббревиатур. За аннотацией следует пропуск строки.
10. Ключевые слова оформляются так же, как и аннотация, и должны содержать основные понятия и термины, употребляемые в статье. Ключевые слова формулируются так, чтобы при семантическом поиске по ним можно было найти данную статью заинтересованным ученым. После абзаца с ключевыми словами – пропуск строки. Число ключевых слов 5-6, очередность по алфавиту.
11. Для структуризации статьи рекомендуется основной текст разделить по частям с условными подзаголовками «Введение», «Постановка задачи», «Результаты моделирования» и пр., «Выводы», выполняемые полужирным шрифтом с выравниванием по центру без абзацного отступа. Перед подзаголовками – пропуск строки.
12. Таблицы должны занимать всю ширину текстового поля. В случае малого размера таблиц, допускаются таблицы шириной меньшей, чем ширина текстового поля. Таблицы выравниваются по центру листа без абзацного отступа. Текст внутри таблиц выполняется шрифтом от 10pt до 12pt, в зависимости от степени информационной загрузки. Таблицы нумеруются по порядку упоминания, а их названия оформляются в виде «Таблица 1 – Название таблицы» и выравниваются по центру листа без абзацного отступа. Если таблица выполняется на нескольких страницах, необходимо выставлять признак заголовка для первой строки с наименованиями столбцов, либо дублировать первую строку с наименованиями на следующей странице. По тексту статьи таблица обозначается, например, как табл. 1.

13. Рисунки выполняются в виде внедренных объектов векторной графики, выполненных в формате MS Visio (vsd) или в форматах метафайлов Windows (wmf или emf). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах jpg или png. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне, при этом рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами. По тексту статьи рисунки обозначаются, например, как рис. 1. Если рисунок или таблица единственные в статье, то их не нумеруют. В конце названий таблиц и рисунков точка не ставится. Ориентация рисунков и таблиц вертикальная, листа – книжная. Ширина рисунков и таблиц – до 17 см. Рисунки должны быть четкими, с хорошо проработанными деталями. Рисунок в тексте должен размещаться после абзаца с упоминанием о нем. При невозможности выполнить это требование, рисунок размещается на следующей странице.

14. Формулы выполняются в редакторе формул **MathType** либо **Microsoft Equation 3.0**. Формулы могут быть набраны в основном тексте со вставкой специальных математических символов через меню «вставка-символ». **Запрещается набирать формулы во встроенном редакторе формул Microsoft Office 2007 и выше.** Основной шрифт формул, набираемых в MathType и Microsoft Equation 3.0, 12 pt. Формулы выравниваются по центру без абзацного отступа. При необходимости переноса формул используют общепринятую математическую запись переноса. Формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи, должны быть пронумерованы. Номер формулы проставляют с правого края страницы. Не следует вставлять пропуски строки до и после формул. Нумерация формул, на которые нет ссылок по тексту, не допускается. Нельзя вставлять в текст отсканированные формулы! Греческие обозначения и кириллица, скобки и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются курсивом, как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (**max, min, cos, sin, tg, log, exp, det ...**).

15. Список используемых источников оформляется следующим образом – «Литература», который выполняется полужирным шрифтом, по центру страницы без абзацного отступа. Нумерация ссылок определяется порядком их упоминания в статье. Список литературы: от 15 до 40 наименований, из них самоцитирований должно быть не более 20 %. В числе источников желательно не менее 50 % иностранных (для статей на английском языке – 15 % российских). Состав источников должен быть актуальным (**не старше 5 лет**). Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. **В списках литературы не размещать:** ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты, справочники, энциклопедии, электронные ресурсы без указания автора, законы, и другую нормативную и неперiodическую документацию. Эти данные можно указывать в теле статьи в скобках или как **постраничные сноски**. Список литературы оформляется по ГОСТ 7.05-2008. Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор объекта DOI, его обязательно надо указывать в конце описания ссылки единой записью без пробелов, например: doi:10.1134/S1023193508080077. Допустимы ссылки только на публикации из открытых источников: Elibrary, CyberLeninka, сайты издательств.

16. После подзаголовка «References» литература дублируется на английском языке. После списка литературы и References следует пропуск строки. Основные правила при переводе литературы на английский язык, с использованием транслитерации: название русского издательства транслитерируется, если имеется зарегистрированное англоязычное название, то приводится оно. Город и издательство в английском варианте не сокращается. Транслитерация переводных книг не делается. В англоязычной версии статьи следует делать ссылку на оригинальное издание. При переводе книг на английский язык: указывается ФИО авторов на английском языке. Транслитерация названия [перевод названия на английском языке]. Название города на английском языке: Транслитерация названия издательства (либо зарегистрированное англоязычное название издательства). При переводе на английский язык статей из журналов: город и издательство не указываются. Если русскоязычный журнал имеет зарегистрированное англоязычное название или переводную англоязычную версию, то в выходных данных необходимо указывать англоязычную версию названия журнала и статьи (без ее транслитерации). При переводе на английский язык материалов конференций указывается название конференции на языке оригинала (в транслитерации, если нет ее английского названия), выделенное курсивом. В скобках дается перевод на английский язык. Выходные данные (место проведения, место издания, страницы) представляются на английском языке.

17. После списка References указывается дата первого представления статьи в редакцию. Данный абзац выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по правому краю страницы.

18. В конце статьи указывается информация о каждом соавторе: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, ученое звание, должность, полное наименование организации работы автора, область научных интересов, телефон и e-mail.

19. Статья завершается текстовым блоком, дублирующим название статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотацию статьи и ключевые слова на английском языке. Данный текстовый блок начинается с новой страницы, и его элементы оформляются так же, как соответствующие элементы на русском языке в начале статьи.

Требования к оформлению файла, содержащего сведения об авторах (по каждому автору):

1. Фамилия, Имя, Отчество на русском и английском языках.
2. Ученая степень и ученое звание (если есть) на русском и английском языках.
3. Место работы (официальное название) с указанием страны, города на рус. и англ. языках.
4. Должность на русском и на английском языке.
5. Область научных интересов – на русском и английском языках (Field of research:...).
6. Адрес электронной почты (существующий и действующий) для каждого соавтора.
7. Корреспондентский почтовый адрес с индексом, рабочий (домашний), контактный телефон.
8. SPIN – код автора, при наличии.

Рекомендации по написанию аннотации:

Аннотация должна быть: информативной (не иметь общих слов); содержательной (отражать основное содержание статьи); структурированной (следовать логике изложения материала); компактной (объемом 200-300 слов). В аннотации следует избегать сложных грамматических конструкций и лишних фраз (например, «автор рассматривает...», «автор полагает...» и т. д.). Следует применять конструкции констатирующего и обезличенного характера (доказано, проанализировано, изложено...) и оценочные стандартные словосочетания (уделено основное внимание, актуальный вопрос, важная проблема...). Аннотация не должна включать в себя цитаты из текста статьи.

Аннотация должна включать в себя:

- предмет и цель работы (если они не следуют из названия статьи);
- используемый метод или методы исследования;
- основные результаты исследования;
- отличия данной публикации от других, схожих по теме;
- область применения результатов;
- выводы, рекомендации, перспективы развития работы.

В аннотацию не следует включать иллюстрации, а также следует избегать формул, аббревиатур, специальных знаков, сокращений, условных обозначений и ссылок на номер публикации в списке литературы к статье и т. п. Рекомендуется в тексте аннотации выделять **Введение (Цели исследования, Постановка проблемы** и т. п.), **Результаты, Заключение (Новизна, Выводы, Практическая значимость)**. Большую часть аннотации должен составлять подраздел Результаты, в котором не следует использовать общие слова: «Проведены исследования...», «Разработана методика...», «Разработан модифицированный алгоритм...» и т. д., нужно описать суть исследования, методики, алгоритма. Текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, лишних вводных слов (например, «автор статьи рассматривает...», «в этой статье...»), общих и незначимых формулировок. Не использовать будущее и настоящее время, в аннотации описывается уже сделанная научная работа. Текст должен быть связным, с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), предложения должны логично вытекать одно из другого.

Пример: **Аннотация.** В статье ставится *задача* обосновать... *Целью* работы является создание модели системы, которая состоит ... В качестве примера используется ... При моделировании используются *методы* ... Это оборудование предназначено для каналов связи ... *Новизна* обсуждаемого решения состоит в ... *К результатам работы* следует отнести создание модели Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории. *Практическая значимость* работы заключается в предложенной структуре. В англоязычной версии приводится перевод аннотации с соблюдением ее структуры.

Проверка на плагиат

Порядок проверки на плагиат и выбор сервиса для проверки определяется редакцией самостоятельно. Для проверки на плагиат редакцией используются Интернет-сервисы: Антиплагиат, ТЕХТ. Публикация статьи в журнале требует уникальности не ниже 75 % от основного текста.

ВНИМАНИЕ! Редколлегия оставляет за собой право отклонить рукописи, оформленные не по указанным правилам и право потребовать от авторов предоставления оригиналов статей, распечатанных на бумаге и подписанных авторами, а также оригинала экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию.

Образец оформления литературы на русском и английском языках

Книга:

Колесников А. А., Веселов Г. Е., Попов А. Н., Колесников Ал. А., Топчиев Б. В., Мушенко А. С., Кобзев В. А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. М.: ЛИБРОКОМ, 2019. 300 с.

Kolesnikov A. A., Veselov G. E., Popov A. N., Kolesnikov Al. A., Topchiev B. V., Mushenko A. S., Kobzev V. A. *Sinergeticheskie metody upravlenija slozhnymi sistemami: mehanicheskie i jelektromehaniicheskie sistemy* [Synergetic methods of control of complex systems: mechanical and Electromechanical systems]. Moscow: LIBRO-KOM, 2019. 300 p. (in Rus).

Статья:

Межуев А. М., Савельев М. А. Алгоритм двухпараметрического адаптивного управления структурой радиосети декаметрового радиосвязи // Радиотехника. 2014. № 1. С. 9-14.

Mezhuev A. M., Saveliev M. A. Algorithm of a two-parameter adaptive technique by structure of a radio network of a decameter radio communication. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2014. No. 1. Pp. 9-14 (in Rus).

Конференция:

Вершенник А. В., Федоров В. Г., Попова А. В. Способ защиты информационных потоков в многооператорных информационно-телекоммуникационных сетях // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии. Теория и практика» (Череповец, 04 декабря 2017 г.). Череповец, 2018. С. 154-158.

Varsenik A. V., Fedorov V. G., Popova A. V. *Sposob zaschity informacionnyh potokov v mnogooperatornyh in-formacionno-telekommunikacionnyh setyah* [Method of protection of information flows in multi-statement information and telecommunication networks]. *Materialy IV Vserossijskoj nauchnoprakticheskoj konferencii "Sovremennye informacionnye tehnologii. Teoriya i praktika"* [Proceedings of the IV all-Russian scientific-practical conference "Modern information technologies. Theory and practice", Cherepovets, on December 04, 2017]. Cherepovets, 2018. Pp. 154-158 (in Rus).

Электронный ресурс:

Энеев Т. М., Ахметшин Р. З., Егоров В. А., Ефимов Г. Б. Межпланетные полеты космических аппаратов с электроракетными двигателями // Публичная Электронная Библиотека. URL: <http://www.plib.ru/li-brary/book/20466.html> (дата обращения 10.12.2018).

Jeneev T. M., Ahmetshin R. Z., Egorov V. A., Efimov G. B. *Mezhplanetnye polity kosmicheskikh apparatov s jel-ektroraketnymi dvigateljami* [Interplanetary flights of spacecraft with electric rocket engines]. *Publichnaja Jelektronnaja Biblioteka* [Public Electronic Library]. URL: <http://www.plib.ru/library/book/20466.html> (date of access 10.12.2018) (in Rus).

Переводная книга:

Уоррен Г. Алгоритмические трюки для программистов: пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 288 с.

Warren H. S. *Hacker's Delight*. Boston: Addison Wesley Publ. Company, 2002. 320 p.

Патент:

Патент РФ 2326500. Когерентная система передачи информации хаотическими сигналами / Баркетов С.В., Жук А.П., Сазонов В.В., Авдеенко С.И., Жук Е.П., Лохов В.И., Голубь Ю.С. Заявл. 16.08.2006. Оpubл. 10.06.2008. Бюл. № 16. 6 с.

Patent RF 2326500. *Kogerentnaja sistema peredachi informacii haoticheskimi signalami* [Coherent data transmission system using random signals]. Barketov S.V., Zhuk A.P., Sazonov V.V., Avdeenko S.I., Zhuk E.P., Lokhov V.I., Golub' J.S. Declared 16.08.2006. Published 10.06.2008. Bulletin No. 16. 6 p. (in Rus).

Таблица перевода ученых званий, ученых степеней, должностей, заголовков

Д.т.н.; к.т.н.	PhD	Ученое звание	Academic title
Профессор	Full Professor	Доцент	Docent
Должность	Position	Профессор	Professor
Профессор кафедры (конкретной)	Professor at the Department of	Доцент	Assistant professor
Доцент кафедры (конкретной)	Associate Professor at the Department of	старший преподаватель	Senior lecturer
Преподаватель	Lecturer	Преподаватель кафедры (конкретной)	Lecturer at the Department of
Адъюнкт / аспирант	Postgraduate student	Адъюнкт / аспирант кафедры	Postgraduate at the Department of
Докторант	Doctoral Candidate	Научный сотрудник	Research Officer
Старший научный сотрудник	Senior Research Officer	Младший научный сотрудник	Research Assistant
Декан	Dean	Соискатель кафедры	Applicant at the department of
Начальник кафедры	Head of Department (BrE) Department Chair (AmE)	Директор	Director
Зав. отделением (конкретного)	Head of the Division of Department Head	Начальник кафедры (конкретной)	Department Chair Head of the Department of Chair of the Department of
Факультет	Faculty	Место работы	Place of work
Отдел	Department	Кафедра	Department / SubDepartment
Введение	Intoduction	Отделение	Division / Department
Методы	Methods	Цель исследования	Purpose
Практическая значимость	Practical relevance	Результаты	Results
Обсуждение	Discussion		

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).

СПИСОК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ» В 2024 ГОДУ

	№№
<u>СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ</u>	
Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А., Помазунов С. А., Исламов А. И. Оценка электромагнитной совместимости корабельной станции спутниковой связи Ku диапазона в условиях взаимных помех от СВ-КВ радиопередающих устройств	1(165)
Акулов В. С., Угрик Л. Н., Петров А. Н. Глубина подводного радиоприема при неоптимальной ориентации приемной антенны	2(166)
Жебрун А. М. Анализ эффективности функционирования сети связи в направлении «берег-море» на уровне сверхдлинноволновой радиолинии	2(166)
Киселев А. А., Сударев А. П., Жебрун А. М. Эффективность функционирования сети военной связи	2(166)
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	3(167)
Путилин А. Н., Шаптала В. С. Пассивная синхронизация в сетях дециметрового радиосвязи с псевдослучайным переключением рабочих частот	4(168)
Иванов Д. В., Путилин А. Н., Сыроветник Д. С., Царик И. В. Программная реализация демодулятора сигналов импульсно-фазовой радионавигационной системы	4(168)
<u>ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</u>	
Закутаев А. А., Емельянов А. В., Ширококов В. В. Модифицированная методика оценивания эффективности функционирования квантово-оптических средств в составе распределенной наземной сетис учетом энергетических потерь сигнала на атмосферной трассе	4(168)
<u>ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ</u>	
Щукин А. Н., Винокур М. В., Кулешов И. А., Солозобов С. А. Многочастотные сигналы для помехозащищенных линий радиосвязи	1(165)
Баранов А. А., Егоров В. В. Оптимизация параметров информационного сигнала ключевого генератора СДВ диапазона	1(165)
Акулов В. С., Угрик Л. Н., Жебрун А. М. Влияния глубины буксировки выпускной приемной антенны на качество приема	1(165)
Щукин А. Н., Кулешов И. А., Солозобов С. А. Сигнал с быстрой ППРЧ в базисе вейвлет-функций	2(166)
<u>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</u>	
Елизаров В. В., Парашук И. Б., Салюк Д. В. Обоснование требований к программно-аппаратным комплексам специального назначения для сбора и обработки информации на основе методов интеллектуального анализа большого количества разнородных и неструктурированных данных	1(165)
Михайлов В. А., Баринов М. А. Алгоритм определения пороговых значений датчика кожно-гальванической реакции работников опасных производств	2(166)
<u>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ. СБОР, ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</u>	
Буралев А. С., Демидова Д. Е., Васильев Н. В. Подход к выявлению элементов моделей бизнес-процессов из текстов на естественном языке	3(167)
<u>АНАЛИЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ СРЕДСТВ СВЯЗИ</u>	
Яшин А. И., Абрамович А. В. Седьмое поколение беспроводной связи как инфраструктурная техническая основа будущих этапов эволюции цифрового мира	4(168)
<u>ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</u>	
Борисенко Е. В., Егоров М. В., Квашеников В. В., Шабанов А. К. Подходы к совершенствованию телекодовой аппаратуры связи для обмена данными с авиационными комплексами	1(165)
Туриков В. А. Пути обеспечения радиоэлектронной маскировки радиоэлектронных средств в тактическом звене	3(167)
Сивинцева О. А. Средства маскирования информации и снижения пик-фактора сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием на основе систем Спротта	4(168)
<u>СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</u>	
Шаблюк С. М. Алгоритм формирования значений параметров опорной сети передачи данных автоматизированной системы управления специального назначения	1(165)
Мегера Ю. А., Бурлаков А. А., Прищенко В. Н. Процесс управления несоответствиями в ходе организации рекламационной деятельности	1(165)
Чеботарев С. С., Коротченкова В. В. Основные пути модернизации корпоративного управления инновациями в Российской Федерации	1(165)
Винокур М. В., Курносов В. И., Лукин К. И. Актуальные вопросы комплексного обеспечения эксплуатации информационно-телекоммуникационных систем специального назначения	2(166)
Одоевский С. М., Симонова К. О., Зизевский В. А. Анализ влияния точности мониторинга параметров сетевого трафика на качество его обслуживания	4(168)
<u>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ</u>	
Семенов С. С., Косырев А. В., Крачков А. А. Протоколы обмена данными между микроконтроллерами, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре	4(168)
<u>МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</u>	
Иванов В. А., Иванов И. В., Акимов Э. М., Егоров М. В. Имитационная модель мультиплексированного цифрового потока в приемеопередающих трактах сетей подвижных средств многоканальной радиосвязи	1(165)
Маркин А. В., Иванов В. А., Овсянкин С. В., Иванов И. В. Аналитическая модель цифрового потока, поступающего с выхода источника сообщений на вход акселератора трафика	2(166)
Боговик А. В., Сафиулов Д. М., Шмидт А. А. Математические модели процесса мониторинга технического состояния радиосредств специального назначения	3(167)
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	3(167)
Катанович А. А., Пыков Е. В., Цыванюк В. А., Густов А. А. Имитационное моделирование помехозащищённых дециметровых каналов, функционирующих в режиме псевдослучайной перестройки радиочастоты	3(167)
Морозов А. Н. Обобщенная модель функционирования системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций	3(167)
Драгунов М. Ю. Модель линии спутниковой связи с парциальными каналами	4(168)
Буткевич Ю. Р., Логинов С. С., Смолин А. Ю., Яруллин Р. Р. Методы моделирования в создании систем и средств вторичной радиолокации	4(168)
Морозов А. Н. Обобщенная методика исследования (оценки) эффективности системы электроэнергетического обеспечения носимых и портативных радиостанций	4(168)
<u>РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</u>	
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	3(167)
<u>ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ</u>	
Будко Н. П., Груздев А. А., Шаталов А. Е. Постановка задачи на разработку метода синтеза системы сетевого мониторинга нового поколения	2(166)