

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

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

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

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

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

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

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

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

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

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS:

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:

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

**АДРЕС
РЕДАКЦИИ:**

197342. Россия. г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, дом 8,
Телефон: +7(812) 542-90-54; +7(812) 448-95-97; +7(812) 448-96-84
Факс: +7(812) 542-18-49. E-mail: mce-journal@inteltech.ru.
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 всеобщих журналов «Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи» и «Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия: Техника проводной связи». С 1975 года журнал издается под названием «Техника средств связи». Учредитель и издатель журнала: Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Адрес учредителя и издателя журнала: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д.8.

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

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

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

Выходит 4 раза в год.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Основное содержание издания представляет собой научные статьи и научные обзоры.

Возрастное ограничение 12 +

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

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

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

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

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

Свободная цена

Тираж: 40 экз.

Подписано в печать 19.09.2025. Дата выхода в свет 22.09.2025

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А. 2

Оценка дальности УКВ радиосвязи береговых служб с подвижными морскими объектами в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря

Бобровский В. И., Сусликов Н. В., Кукунин Д. С., Журавель Е. П. 15

Исследование дальности связи линии передачи цифровых сигналов на основе приемопередатчиков с модуляцией LoRa в условиях помех

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Сныткин И. И., Сныткин Т. И., Афонин И. Е., Афонин Л. И. 26

Моделирование и установление свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей «комбинированного» типа в интересах реализации «третьей решающей схемы»

Дорошенко В. И., Густов А. А., Вахрушева Ю. В., Гайворонская М. В. 46

Метеорная связь как статистически устойчивый компонент телекоммуникационного ресурса Северного морского пути

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ.

СБОР, ХРАНЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Гусеница Я. Н., Тимонов А. А., Чикирев А. А. 57

Методика выбора оптимального средства защиты информации для объекта вычислительной техники при ограничениях на вычислительные ресурсы

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Закутаев А. А., Емельянов А. В., Михайлов А. А., Широбоков В. В. 67

Исследование влияния параметров пространственной дискретизации при оценивании пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства

АНАЛИЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Малышев С. А., Годияк А. В. 75

Технология VDES: характеристики, перспективы развития в судоходстве России

ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Маркин А. В., Иванов В. А., Конышев М. Ю., Иванов И. В. 86

Классификация потоков, циркулирующих в сетях связи, по признакам распределения двоичных комбинаций для решения задач оптимизации и портретизации трафика

Поздравления 97

CONTENTS

COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Plotnikov M. Yu., Islamov A. I., Ilmer D. V., Shapovalov F. A. 2

Estimation of the VHF radio communication range of coastal services with mobile marine objects depending on the length of antenna-feeder paths and the height of antenna installation above sea level

Bobrovsky V.I., Suslikov N.V., Kukunin D.S., Zhuravel E.P. 15

Testing the communication range of the LoRa signal modulation method under high interference conditions

INFORMATION SECURITY ISSUES

Snytkin I. I., Snytkin T. I., Afonin I. E., Afonin L. I. 26

Modeling and determination of determinacy properties of partial autocorrelation functions of two-fold derivatives of nonlinear recurrent sequences of the "combined" type in the interests of the implementation of the "third decisive scheme"

Doroshenko V. I., Gustov A. A., Vakhrusheva Yu. V., Gayvoronskaya M. V. 46

Meteor Connection as a Statistically Stable Component of the telecommunication resource of the Northern Sea Route

INFORMATION PROCESSES AND TECHNOLOGIES.

COLLECTION, STORAGE AND PROCESSING OF INFORMATION

Gusenitsa Ya. N., Timonov A. A., Chikirev A. A. 57

Methodology for selecting the optimal information protection means for a computing equipment object under constraints on computing resources

ELECTRONIC AND RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Mikhailov A. A., Shirobokov V. V. 67

Research of the influence of spatial sampling parameters when estimating the direction finding characteristic of a matrix photodetector

ANALYSIS OF NEW TECHNOLOGIES AND PROSPECTS OF COMMUNICATION TECHNOLOGY DEVELOPMENT

Malyshev S. A., Godiyak A.V. 75

VDES technology: characteristics, development prospects in Russian shipping

TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING OF SIGNALS

Markin A. V., Ivanov V. A., Konyshev M. Y., Ivanov I. V. 86

Classification of streams circulating in communication networks according to the distribution of binary combinations for solving traffic optimization and portraiture problems.

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

СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-2-14

Оценка дальности УКВ радиосвязи береговых служб с подвижными морскими объектами в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря

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

Аннотация: *Введение:* Современная геополитическая обстановка требует не только поддержания, но и наращивания сил охраны от проникновения нарушителей с различными целями в прибрежные морские зоны Российской Федерации. Охрана биологических морских ресурсов также является одной из актуальных задач. Выполнение этих задач в море силами охраны должно быть обеспечено устойчивой телекоммуникационной радиосвязью в ультракоротковолновом диапазоне частот с береговыми пунктами управления. При этом в целях прогнозирования зон покрытия ультракоротковолновой радиосвязью проектируемых для модернизации и строительства береговых объектов телекоммуникаций проводятся теоретические исследования с количественной оценкой и анализом полученных результатов. **Целью работы** является количественный анализ дальностей радиосвязи береговой телекоммуникационной системы с подвижными морскими объектами в ультракоротковолновом диапазоне в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря. **Результат** заключается в определении предельных дальностей ультракоротковолновой радиосвязи для конкретных береговых проектируемых объектов в зависимости от их удалённости от береговой черты, высоты расположения над морской поверхностью, в том числе, с учётом размещения антенн на мачтах с разной высотой и соответственно, от различной длины антенно-фидерных трактов, что является одним из критических факторов в ультракоротковолновом диапазоне из-за значительных потерь мощности сигнала в фидере. **Практическая значимость:** выполненные результаты расчётов позволяют оценить возможность обеспечения требуемых дальностей ультракоротковолновой радиосвязи для проектируемых береговых объектов с различной геодезической и топографической расположенностью у берега моря, с разной архитектурой антенно-мачтовых сооружений и необходимость размещения радиостанций в специально оборудованных выносных уличных шкафах для сокращения длины антенно-фидерных трактов.

Ключевые слова: антенна, антенно-фидерный тракт, дальность связи, излучаемая мощность, коэффициент затухания кабеля, коэффициент стоячей волны по напряжению, коэффициент усиления, напряжённость электромагнитного поля, параметры подстилающей поверхности, ультракоротковолновая радиосвязь, чувствительность приёмника.

Введение

Российская Федерация имеет морские границы большой протяжённости, при этом современная геополитическая обстановка требует не только поддержания, но и наращивания сил охраны от проникновения нарушителей с различными целями в прибрежные морские зоны нашей страны. Охрана биологических морских ресурсов также является одной из приоритетов. Выполнение этих задач в море силами охраны должно быть обеспечено устойчивой телекоммуникационной радиосвязью в ультракоротковолновом (УКВ) диапазоне частот с береговыми пунктами управления. Что требует периодической модернизации и развертывания новых береговых объектов телекоммуникационных систем охраны в различных регионах России. Прибрежная полоса в этих регионах может иметь значительное разнообразие по геодезическим и топографическим особенностям, в том числе, и в пределах одного региона. Оснащённость существующих объектов мачтовыми конструкциями также разнообразна. Где-то есть мачты высотой 70 м, а где-то антенны устанавливаются на крыши зданий. Довольно часто техническое сооружение, где расположены радиостанции, находится на значительном удалении от мачты с антеннами. Такие условия приводят к удлинению антенно-фидерных трактов (АФТ)

иногда до 130 м, что критично для УКВ диапазона по затуханию сигнала в кабеле. В такой ситуации встаёт вопрос о размещении радиостанции под мачтой для сокращения длины АФТ в специальном выносном шкафу (контейнере) с отоплением и охлаждением, в зависимости от региона. Это влечёт за собой не только повышение стоимости проектирования и размещения оборудования, но и усложнение его эксплуатации и технического обслуживания, что, прежде всего, имеет отрицательные отзывы от эксплуатантов этого оборудования.

Таким образом, актуальность расчётов, позволяющих оценить возможность обеспечения требуемой дальности УКВ радиосвязи для проектируемых береговых объектов при их модернизации и строительстве с разной геодезической и топографической расположенностью на берегу и различной архитектурой антенно-мачтовых сооружений не вызывает сомнений.

Метод оценки предельной дальности радиосвязи в УКВ диапазоне

Расчёту дальностей и зон радиосвязи в УКВ диапазоне посвящены ряд работ [1-4]. На основе рекомендации МСЭ-R P.1546-6 [5] и ряда других, например [6], можно разработать методику расчета дальности УКВ радиосвязи между береговыми пунктами управления и морскими подвижными объектами. Анализ теоретических исследований и методик, представленных в [1-6] показывает, что результаты вычислений, зависящие от множества исходных данных и разнообразных факторов в большей части сложны и трудоёмки и не всегда могут быть использованы для конкретных условий. Поэтому для проведения расчётов в данном исследовании за основу выбрана наиболее универсальная и простая методика, изложенная в [7].

В диапазоне метровых волн дальность и устойчивость связи слабо зависят от времени суток и года, а также от метеорологических условий. Бесперебойная связь на метровых радиоволнах устойчива, как правило, лишь в зоне прямой видимости. Это расстояние с учетом кривизны Земли зависит от высот передающей (h_1) и приемной (h_2) антенн. Известна формула для дальности прямой видимости с учетом среднего радиуса земли 6370 км [7]:

$$r[\text{км}] = 3,55 \cdot (\sqrt{h_1[\text{м}]} + \sqrt{h_2[\text{м}]}). \quad (1)$$

Однако вследствие атмосферной рефракции радиолучи распространяются по криволинейным траекториям, в результате чего максимальная дальность действия возрастает примерно на 8 % при нормальных условиях изменения атмосферного давления, температуры и влажности с высотой. Академик А. Н. Шукин предложил рассматривать это увеличение видимости как некоторое увеличение так называемого эквивалентного радиуса Земли до 8500 км. В результате была выведена следующая формула дальности связи с учетом рефракции:

$$r[\text{км}] = 4,12 \cdot (\sqrt{h_1[\text{м}]} + \sqrt{h_2[\text{м}]}). \quad (2)$$

Выражением (2) обычно и пользуются при приближенных расчетах. Нам необходимо оценить, будет ли уменьшать дальность связи, рассчитанная для проектируемых береговых объектов по формуле (2) с учетом затухания и потерь в АФТ. Ниже приведена методика расчёта дальности связи из [7], учитывающая практически все факторы, влияющие на дальность связи в метровом и дециметровом диапазонах волн, кроме взаимных или преднамеренных помех.

Математическая запись для расчета напряженности поля в данной методике имеет вид

$$E_p = \frac{E_n}{K_{h1} K_{h2} K_E \sqrt{P_\Sigma}}, \quad (3)$$

где: E_n – величина напряженности поля, требуемая на входе радиоприемного устройства (РПУ) для радиолинии с учетом чувствительности РПУ и режима работы с потерями в АФТ; K_{h1} и K_{h2} – высотные коэффициенты передающей и приемной антенн, соответственно; K_E – коэффициент, учитывающий влияние трассы на распространение метровых волн; P_Σ – излучаемая мощность.

По расчетной напряженности E_p вычисляют дальность связи в УКВ диапазоне в зависимости от частоты. На рис. 1 [7] представлен характер убывания напряженности поля,

создаваемого на поверхности Земли вертикальной антенной, в зависимости от расстояния и частоты (длины волны).

Ориентировочные данные коэффициента K_E , учитывающего влияние трассы на распространение метровых волн, приведены на рис. 2 [7].

Высотные коэффициенты для передающей и приёмной антенн K_{h1} и K_{h2} вычисляются из графиков, приведённых на рис. 3.

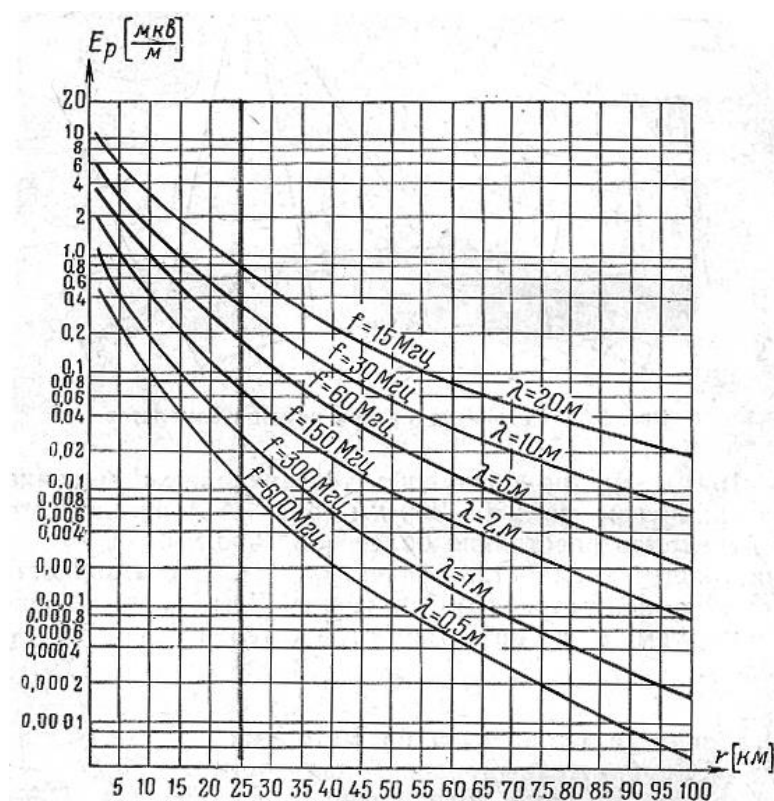


Рис. 1. Зависимость напряженности поля УКВ диапазона от расстояния и частоты

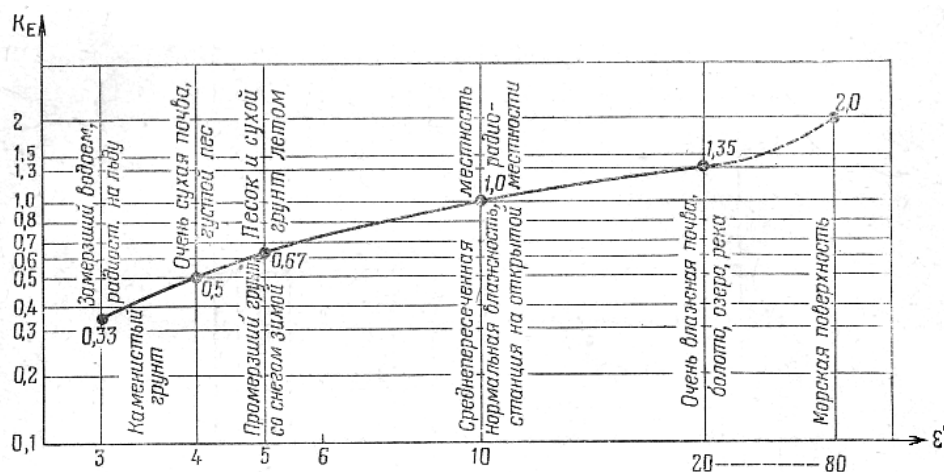


Рис. 2. Значение коэффициента K_E для различных трасс в УКВ диапазоне

Далее необходимо учесть факторы, влияющие на излучённую мощность P_{Σ} . К ним относится коэффициент полезного действия (КПД) антенны η_A . В [7] приводится КПД для УКВ антенн равный 100 %. Примем для наших расчётов КПД = 95 % с учётом 5 % потерь на климатические или другие неблагоприятные факторы (плохое заземление, снежный покров на антенне или обледенение, старение и т. п.).

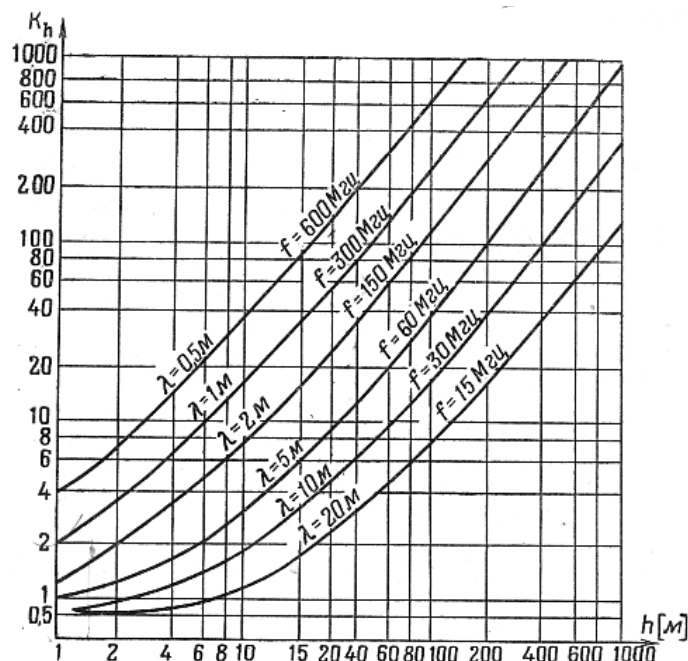


Рис. 3. Значения высотных коэффициентов K_h для различных высот антенн и частот связи

Коэффициент усиления используемых на проектируемых объектах УКВ антенн в полосе рабочих частот (от 30 до 512 МГц) может составлять от 1 до 7, в том числе с учётом неравномерности диаграммы направленности антенн в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для наших расчётов примем наиболее типичный коэффициент усиления $G_A = 2$.

На излучающую способность антенны оказывает влияние коэффициент стоячей волны (КСВ) или обратная его величина – коэффициент бегущей волны (КБВ): $КСВ = 1/КБВ$. Влияние этих характеристик на излучающую способность антенны, т. е. на мощность излучённую антенной P_A , зависящую от КБВ описано в [7] формулой:

$$P_A = P_{\text{пад}} \cdot (1 - p^2), \quad (4)$$

где p – коэффициент отражения; $P_{\text{пад}}$ – мощность падающей волны на входе антенны.

При этом коэффициент отражения определяется формулой:

$$p = (1 - КБВ)/(1 + КБВ). \quad (5)$$

Обозначим величину $(1 - p^2)$ для наших расчётов, как коэффициент потерь на КСВ – $L_{КСВ}$.

Последняя величина, влияющая на излучаемую мощность P_{Σ} – это потери в кабельной трассе A , выраженные в дБ и конвертированные в отношении мощностей на входе в кабель и на его выходе. Обозначим эту величину как коэффициент потерь в кабеле – L_K .

Приведём формулу для излучаемой мощности P_{Σ} с учётом вышеизложенных факторов:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{РС}} \cdot \eta_A \cdot G_A \cdot L_{КСВ} / L_K, \quad (6)$$

где $P_{\text{РС}}$ – мощность на выходе блока узкополосных каналов связи (УКС) радиостанции (РС) Р-620 в классе излучения G3E [8], равная 50 Вт в режиме излучения 100 %.

Выполняемые расчёты не учитывают помеховую обстановку в районе антенн в режиме приёма и в случае наличия значительных взаимных помех, особенно в корабельных условиях, полученные результаты дальностей связи могут сильно варьироваться.

Метод расчёта затухания в антенно-фидерном тракте УКВ радиостанции

Для расчёта затухания в кабельных трассах УКВ радиостанций необходимо определить типы используемых радиочастотных (РЧ) кабелей. В соответствии с техническими условиями на антенну К-674-11Б ПБИН.464651.001 ТУ [9] в зависимости от длины трассы определяется тип радиочастотного кабеля, при этом максимальная длина трассы предполагается до 80 м:

- при длине трассы до 20 м могут использоваться кабель РК 50-7-11 (ГОСТ 11326.4-79), кабель РК 50-9-12 (ГОСТ 11326.20-79) или кабель РК 50-13-17 (ГОСТ 11326.48-79) с переходом на кабель РК 50-9-12 перед коммутатором или радиостанцией через муфту СРКР1-50-9-13;
- при длине трассы до 50 м могут использоваться кабель РК 50-13-17 или кабель РК 50-13-17 с переходом на кабель РК 50-9-12 перед коммутатором или радиостанцией через муфту СРКР1-50-9-13;
- при длине трассы до 80 м должен использоваться кабель РК 50-24-17 (ГОСТ 11326.52-79) с переходом на кабель РК 50-9-12 перед коммутатором или радиостанцией через муфту СРКР1-50-9-24.

Где трасса будет более 80 м, будем производить расчёт для кабеля РК 50-24-17.

На передачу потери A рассчитываются умножением коэффициента затухания α на длину трассы в м. Полученную величину потерь A в дБ преобразуем с помощью известного конвертера [10] перевода дБ в отношения мощности на входе в кабель к мощности на выходе и получим коэффициент потерь по мощности в кабеле L_k в раз, используемый для расчётов в формуле (6).

На приём потери рассчитываются снижением чувствительности РПУ за счёт потерь в кабеле в дБ. В соответствии с руководством по эксплуатации на РС Р-620 [8] чувствительность приёмного устройства блока УКС в классе излучения G3E при входном ВЧ сигнале, модулированном по частоте тоном 1000 Гц, с девиацией частоты 3 кГц составляет не более 1,5 мкВ (измеренная по методу СИНАД при отношении сигнал/шум 12 дБ). С помощью известных конвертеров [11] мы можем представить эту величину чувствительности в 50-Омном кабеле в дБм. Она равна минус 103 дБм. Снижение чувствительности за счёт потерь в кабеле рассчитывается прибавлением потерь в кабеле A в дБ к чувствительности РПУ блока УКС РС Р-620. Далее с помощью того же конвертера [11] величина чувствительности переводится в мкВ/м в зависимости от частоты. Полученная величина в мкВ/м используется в формуле (3) для расчётов, как требуемая пороговая величина напряжённости поля E_n на входе антенны.

Исходные данные для расчёта

Расчёты проводились в целях проектирования модернизации объектов береговой охраны Калининградской области и республики Дагестан. В данных материалах представим лишь результаты вычислений для некоторых наиболее критичных объектов, не указывая названия и место дислокации. Расчёт производился для отдельных частот из рабочего диапазона радиостанции Р-620, указанных в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики затухания различных кабелей в зависимости от частоты

Тип кабеля	Коэффициент затухания α при температуре 20 °С, дБ/м на частоте, МГц						
	50	100	150	250	300	400	500
РК 50-7-11	0,047	0,068	0,089	0,12	0,13	0,15	0,17
РК 50-9-12	0,036	0,05	0,065	0,086	0,094	0,117	0,138
РК 50-13-17	0,029	0,041	0,06	0,068	0,071	0,081	0,09
РК 50-24-17	0,019	0,029	0,038	0,051	0,058	0,067	0,076

Основной антенной для службы береговой охраны является антенна К-674-11Б (рабочий диапазон частот 100 – 400 МГц). Для частот ниже 100 МГц используется антенна «Нептун-АФУ» (рабочий диапазон частот 30 – 220 МГц, КСВ не более 3,3, в отдельных точках до 5,6). Для частот выше 400 МГц может использоваться антенна «Нептун-УКВ» (рабочий диапазон частот 100 – 600 МГц, КСВ не более 3, в отдельных точках до 3,7).

В соответствии с [9] КСВ антенны К-674-11Б должен быть не более 2,5, допускается ухудшение на отдельных частотах до 4. Примем для наших расчётов среднюю величину КСВ

равной 3. Отсюда коэффициент отражения по формуле (5) $p = 0,5$, а коэффициент, влияющий на излучаемую мощность P_{Σ} из-за КСВ антенны равного 3 (КБВ = 0,33) рассчитаем по формуле (4)

$$L_{КСВ} = (1 - p^2) = 0,75.$$

Большую часть трассы для всех проектируемых объектов составляет морская поверхность, где как видно из графика на рис. 2 для моря коэффициент $K_{ЕМ} = 2$. Над сушей до моря для всех исследуемых береговых объектов трасса проходит на расстояние не более 5 % от всей трассы. Для республики Дагестан возьмём коэффициент K_E из рис. 2 для очень сухой почвы и каменистого грунта, т. е. $K_{ЕСД} = 0,45$. Для Калининградской области возьмём коэффициент K_E из рис. 2 для сухого песка или промёрзшего грунта, т. е. $K_{ЕСК} = 0,67$.

Рассчитаем коэффициент K_E для республики Дагестан для всей протяжённости трассы:

$$K_{ЕД} = K_{ЕМ} \cdot 95 \% + K_{ЕСД} \cdot 5 \% = 2 \cdot 0,95 + 0,45 \cdot 0,05 = 1,9.$$

Рассчитаем коэффициент K_E для Калининградской обл. для всей протяжённости трассы:

$$K_{ЕК} = K_{ЕМ} \cdot 95 \% + K_{ЕСК} \cdot 5 \% = 2 \cdot 0,95 + 0,67 \cdot 0,05 = 1,93.$$

Исходные данные для расчёта затухания A взяты из соответствующих ГОСТов на приведённые выше типы кабелей по величинам затухания на разных частотах и представлены в табл. 1.

Расчёты будем проводить из условия использования на корабле блоков УКС радиостанции Р-620, высоты размещения антенны на корабле над морской поверхностью – 15 м, длины кабельной трассы – 15 м, параметры для антенн УКВ приведённые выше.

В расчётах следует учитывать, что уровень Каспийского моря в 2025 году находится в среднем на 29,3 метра ниже уровня Мирового океана, т. е. высоты антенн необходимо рассчитывать не от нулевого уровня, а минус 29,3 м.

Результаты расчётов предельной дальности радиосвязи в УКВ диапазоне между береговыми пунктами управления и морскими подвижными объектами

Ниже, в табл. 2 приведены рассчитанные промежуточные параметры для корабельных условий, которые будут использоваться в дальнейших расчётах.

Таблица 2 – Параметры для расчётов в условиях корабля

Параметры	Величины параметров						
Частота, МГц	50	100	150	250	300	400	500
Коэффициент затухания α РК 50-9-12, дБ/м	0,036	0,05	0,065	0,086	0,094	0,117	0,138
Затухание A при длине кабеля 15 м, дБ	0,54	0,75	0,975	1,29	1,41	1,755	2,07
Чувствительность РПУ от потерь в кабеле, дБм	-102,46	-102,25	-102,03	-101,71	-101,59	-101,25	-100,93
Чувствительность РПУ от потерь в кабеле, мкВ	1,68	1,73	1,77	1,84	1,86	1,94	2,01
Пороговая напряжённость поля в антенне E_n , мкВ/м	2,73	5,59	8,6	14,9	18,1	25,1	32,5
Потери по мощности в кабеле L_k , в раз	1,13	1,19	1,25	1,35	1,38	1,5	1,61
Излучаемая мощность P_{Σ} , Вт	63,1	59,9	57,0	52,8	51,6	47,5	44,3
Высота антенны h_A , м	15	15	15	15	15	15	15
Высотный коэффициент K_{h2}	5,3	8,9	16,6	28	36	47	65

Объект № 1

Данный объект интересен тем, что высота антенн на нём оказалась ниже, чем на других объектах. Но при этом длина кабельной трассы (АФТ) довольно большая.

Высота объекта над уровнем моря составляет минус 27 м (Каспийское море). Высота установки антенн 27,4 и 24,1 м. Высота антенн с учётом высоты объекта над морем составит 29,7 и 26,4 м. Произведём расчёт дальности прямой видимости по формуле (2) с учётом высоты антенны на корабле над уровнем моря 15 м. Дальность связи с кораблём по выражению (2) составит 38,4 и 37,1 км соответственно.

На данном объекте длина кабельных трасс от блоков УКС РС Р-620 до УКВ антенн составляет 124 м. Для трасс такой длины должен использоваться кабель РК 50-24-17 с переходом на кабель РК 50-9-12 перед радиостанцией за 2 м через муфту СРКР1-50-9-24. Результаты расчётов затухания в кабельных трассах и дальностей связи по выражению (3) представлены в табл. 3 для разных частот.

Таблица 3 – Результаты расчётов затухания в кабельных трассах и дальностей связи в зависимости от частоты в направлении берег – корабль (Б–К) и корабль – берег (К–Б)

Параметры	Величины параметров						
Частота, МГц	50	100	150	250	300	400	500
РК 50-24-17 122 м, А, дБ	2,318	3,538	4,636	6,222	7,076	8,174	9,272
РК 50-9-12 2 м, А, дБ	0,072	0,1	0,13	0,172	0,188	0,234	0,276
Затухание 124 м, А, дБ	2,39	3,64	4,77	6,39	7,26	8,41	9,55
Чувствительность приемника от потерь в кабеле, дБм	-100,61	-99,36	-98,23	-96,61	-95,74	-94,59	-93,45
Чувствительность приемника от потерь в кабеле, мкВ	2,08	2,41	2,74	3,3	3,65	4,17	4,75
Пороговая напряжённость поля в антенне E_n , мкВ/м	3,38	7,8	13,3	26,8	35,5	54,0	77
Потери по мощности в кабеле L_k , в раз	1,73	2,31	3,0	4,36	5,32	6,93	9,02
Высота антенны № 1 h_A , м	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
Высотный коэффициент K_{h1}	7,9	13,9	28,6	47,5	60,3	82	114,4
Излучаемая мощность P_{Σ} Б–К, Вт	41,2	30,8	23,8	16,3	13,4	10,3	7,9
Расчётная напряженность Б–К E_p , мкВ/м	0,00535	0,00428	0,00196	0,00146	0,00120	0,00107	0,00082
Дальность связи в направлении Б–К для антенны № 1, км	87	73	80	69	63	59	58
Расчётная напряженность К–Б E_p , мкВ/м	0,00535	0,00429	0,00195	0,00146	0,00120	0,00107	0,00082
Дальность связи в направлении К–Б для антенны № 1, км	87	73	80	69	63	59	58
Высота антенны № 2 h_A , м	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
Высотный коэффициент K_{h1}	9,1	17,8	31,4	52,5	68,0	88	136
Расчётная напряженность Б–К E_p , мкВ/м	0,00464	0,00334	0,00178	0,00132	0,00106	0,00100	0,00069
Дальность связи в направлении Б–К для антенны № 2, км	90	81	84	72	65	60	60
Расчётная напряженность К–Б E_p , мкВ/м	0,00465	0,00335	0,00178	0,00132	0,00106	0,00100	0,00069
Дальность связи в направлении К–Б для антенны № 2, км	90	81	84	72	65	60	60

Полученные результаты расчётов дальностей связи между объектом № 1 и кораблём в море, приведённые в табл. 3 превышают дальность прямой видимости, рассчитанную по формуле (2) для указанных высот антенн. Таким образом, затухание в кабельных трассах объекта № 1, а также другие факторы при мощности РС Р-620 50 Вт на дальность связи

прямой видимости не влияют. Поэтому переносить радиостанции из технического здания под мачту для расположения их в контейнере или шкафу с дистанционным управлением не требуется. Максимально возможная дальность связи для установки антенн на мачте на высоте 27,4 и 24,1 м составит 38,4 и 37,1 км соответственно без учёта помех.

Объект № 2

Рассмотрим другую тактическую ситуацию, когда связь потребуется не с кораблём, где установлена РС Р-620, а другим надводным объектом, на котором РС имеет другую мощность передатчика, иную чувствительность приемника и менее эффективную антенну, расположенную на более низкой высоте над поверхностью моря. Поэтому выполним дополнительные расчёты для радиосвязи с подвижным объектом со следующими характеристиками:

- мощность передатчика РС – 10 Вт;
- чувствительность приёмника РС – 2 мкВ или минус 101 дБм;
- высота антенны над морской поверхностью – 3 м;
- коэффициент усиления антенны – 1;
- длина кабельной трассы до антенны – 5 м.

Ниже, в табл. 4, приведём исходные данные и параметры для расчётов на различных частотах, полученные из условий для радиосвязи на подвижном объекте, приведённых выше.

Таблица 4 – Параметры для расчётов в условиях подвижного объекта с высотой антенны 3 м

Параметры	Величины параметров						
Частота, МГц	50	100	150	250	300	400	500
Коэффициент затухания α РК 50-9-12, дБ/м	0,036	0,05	0,065	0,086	0,094	0,117	0,138
Затухание A при длине кабеля 5 м, дБ	0,18	0,25	0,325	0,43	0,47	0,585	0,69
Чувствительность приемника от потерь в кабеле, дБм	-100,82	-100,75	-100,68	-100,57	-100,53	-100,42	-100,31
Чувствительность приемника от потерь в кабеле, мкВ	2,03	2,05	2,07	2,09	2,1	2,13	2,16
Пороговая напряжённость поля в антенне E_n , мкВ/м	3,3	6,65	10,0	17,0	20,4	27,6	35,0
Потери по мощности в кабеле L_k , в раз	1,04	1,06	1,08	1,1	1,11	1,14	1,17
Излучаемая мощность P_Σ , Вт	6,9	6,7	6,6	6,5	6,4	6,3	6,1
Высота антенны h_A , м	3	3	3	3	3	3	3
Высотный коэффициент K_{h2}	1,33	1,86	2,72	3,9	4,75	6,03	7,96

Объект № 3

Произведём расчёт дальности прямой видимости с подвижным объектом при высоте подъёма антенны над уровнем воды 3 м по формуле (2).

Дальность связи с кораблём при высоте подъёма антенны над уровнем моря 3 м по формуле (2) составит 29,5 и 28,3 км соответственно, что на 9 км меньше, чем при высоте антенны на корабле 15 м.

Результаты расчётов дальностей радиосвязи по формуле (3) для объекта № 1 с параметрами для подвижного объекта из табл. 4 представлены в табл. 5 для разных частот. Промежуточные расчётные параметры не приводятся, поскольку они имеются в табл. 3.

Полученные результаты расчётов позволяют сделать выводы:

Снижение чувствительности приёмного устройства с 1,5 мкВ до 2 мкВ, уменьшение мощности радиопередатчика в 5 раз и уменьшение коэффициента усиления антенны в два раза на подвижном морском объекте позволяют:

- обеспечить дальность связи в направлении Б–К на дальностях не меньше прямой видимости (наименьшая дальность 32 км на частоте 500 МГц при дальности прямой видимости 28,3 км);
- обеспечить в направлении К–Б дальность связи на частотах 50-250 МГц не меньше дальности прямой видимости, а на более высоких частотах с ростом частоты постепенно дальность незначительно снижается (максимум на 6 км по отношению к дальности прямой видимости на 500 МГц).

Таблица 5 – Результаты расчётов дальностей связи для мощности РС 10 Вт на подвижном объекте в зависимости от частоты в направлении Б–К и К–Б

Параметры	Величины параметров						
Частота, МГц	50	100	150	250	300	400	500
Расчётная напряженность Б–К E_p , мкВ/м	0,02536	0,02400	0,01367	0,01176	0,01008	0,00902	0,00709
Дальность связи в направлении Б–К для антенны № 1, км	56	43	45	38	35	33	32
Расчётная напряженность К–Б E_p , мкВ/м	0,06368	0,06029	0,03449	0,02945	0,02535	0,02263	0,01775
Дальность связи в направлении К–Б для антенны № 1, км	39	32	32	29	25	24	23
Расчётная напряженность Б–К E_p , мкВ/м	0,02201	0,01874	0,01245	0,01064	0,00894	0,00840	0,00596
Дальность связи в направлении Б–К для антенны № 2, км	57	47	45	38	36	33	33
Расчётная напряженность К–Б E_p , мкВ/м	0,05528	0,04708	0,03141	0,02665	0,02248	0,02109	0,01493
Дальность связи в направлении К–Б для антенны № 2, км	42	34	34	29	27	24	25

Здесь следует отметить, что если используется не радиостанция Р-620, то другие радиостанции имеют рабочий диапазон частот обычно в пределах 100 – 150 МГц.

Таким образом, даже при значительном снижении мощности радиостанции и коэффициента усиления антенны в 2 раза на подвижном объекте, УКВ радиосвязь будет обеспечена с береговыми объектами на предельных дальностях прямой видимости при условиях использования на них радиостанций Р-620, их расположения в непосредственной близости от моря (до 1 км) и отсутствия препятствий на трассе распространения. Данные условия будут обеспечены на всех проектируемых к модернизации береговых объектах.

Приведём дальность связи прямой видимости для объекта, у которого антенны расположены ниже, чем на всех проектируемых объектах.

Высота этого объекта над уровнем моря в Калининградской области составляет 1 м. Высота установки антенн 21,4 и 18,4 м. Высота антенн с учётом высоты объекта над морем составит 22,4 и 19,4 м. Произведём расчёт дальности прямой видимости по формуле (2) с учётом высоты антенны на корабле над уровнем моря 15 м.

Дальность связи с кораблём по выражению (2) составит 35,4 и 34,1 км соответственно.

Приведём дальность связи прямой видимости для объекта, у которого антенны расположены выше, чем на всех других проектируемых объектах. Высота объекта над уровнем моря в Калининградской области составляет 32 м. Высота установки антенн 31,6 и 25,6 м. Высота антенн с учётом высоты объекта над морем составит 63,6 и 57,6 м.

Произведём расчёт дальности прямой видимости по формуле (2) с учётом высоты антенны на корабле над уровнем моря 15 м.

Дальность связи с кораблём по (2) составит 48,8 и 47,2 км соответственно.

Наибольшая длина кабельной трассы на одном из объектов составила 128 м. Даже в таких условиях при большом затухании сигнала в АФТ дальность радиосвязи обеспечивается не менее дальности прямой видимости во всём рабочем диапазоне частот РС Р-620 при работе на полную мощность.

Представляет интерес для дополнительных расчётов ещё одна нестандартная ситуация, которая имеет место на двух объектах. В зоне действия этих объектов находится остров. Рассмотрим ситуацию, где прохождение трассы над островом максимально и составляет 18,5 км или 50 % от протяжённости трассы. Высота острова над уровнем Каспийского моря менее 10 м. Произведём расчёт коэффициента K_E для этого случая

$$K_{ED} = K_{EM} \cdot 50 \% + K_{ESD} \cdot 50 \% = 2 \cdot 0,5 + 0,45 \cdot 0,5 = 1,0 + 0,225 = 1,225.$$

Высота объекта над уровнем моря составляет минус 25 м. Высота установки антенн 19,7 м. Высота антенн с учётом высоты объекта над морем составит 24,0 м. Произведём расчёт дальности прямой видимости по формуле (2) с учётом высоты антенны на корабле над уровнем моря 15 м. Дальность связи с кораблём по (2) составит 36,1 км.

Результаты расчётов для $K_{ED} = 1,225$ по выражению (3) с учётом высоты антенны на корабле над уровнем моря 15 м представлены в табл. 6 для разных частот.

Таблица 6 – Результаты расчётов затухания в кабельных трассах и дальностей связи в зависимости от частоты в направлении Б–К и К–Б через остров

Параметры	Величины параметров						
Частота, МГц	50	100	150	250	300	400	500
РК 50-24-17 55 м, А, дБ	1,045	1,595	2,09	2,805	3,19	3,685	4,18
РК 50-9-12 2 м, А, дБ	0,072	0,1	0,13	0,172	0,188	0,234	0,276
Затухание 57 м, А, дБ	1,12	1,70	2,22	2,98	3,38	3,92	4,46
Чувствительность радиоприемника от потерь в кабеле, дБм	-101,88	-101,31	-100,78	-100,02	-99,62	-99,08	-98,54
Чувствительность радиоприемника от потерь в кабеле, мкВ	1,8	1,92	2,04	2,23	2,34	2,49	2,65
Пороговая напряжённость поля в антенне E_n , мкВ/м	2,92	6,23	9,93	18,1	22,7	32,2	42,9
Потери по мощности в кабеле L_k , в раз	1,29	1,48	1,67	1,99	2,18	2,47	2,79
Излучаемая мощность P_{Σ} К–Б, Вт	55,2	48,1	42,7	35,8	32,7	28,8	25,5
Высота антенны h_A , м	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
Высотный коэффициент K_{hl}	8,0	16,4	28,6	46,7	60,2	80,3	116,3
Расчётная напряжённость Б–К E_p , мкВ/м	0,00707	0,00451	0,00226	0,00155	0,00119	0,00101	0,00069
Дальность связи в направлении Б–К, км	81	71	73	69	62	60	62
Расчётная напряжённость К–Б E_p , мкВ/м	0,00708	0,00450	0,00226	0,00156	0,00119	0,00101	0,00070
Дальность связи в направлении К–Б, км	81	71	73	69	62	60	62

Результаты расчётов показывают, что при прохождении трассы через сушу острова (50 % трассы) дальность связи уменьшается на 4-11 км в зависимости от частоты, но она всё равно больше дальности прямой видимости. Таким образом, при нахождении кораблей с высотой антенны над водной поверхностью 15 м за островом, где его окончание находится от мачты объекта № 2 на расстоянии менее прямой видимости, радиосвязь будет обеспечиваться.

Выводы

Длины кабельных трасс на проектируемых береговых объектах связи (максимальная длина 128 м) при использовании РС Р-620 с полной мощностью радиопередатчика и номинальной чувствительностью радиоприёмника не ограничивают дальность радиосвязи

с кораблями, на которых также используются радиостанции Р-620 (без учёта взаимных и преднамеренных помех), поскольку расчётные дальности распространения электромагнитных волн УКВ диапазона по формуле (3) между двумя корреспондентами в обоих направлениях при таких условиях значительно превышают дальности прямой видимости по формуле (2).

Основное влияние на максимальную дальность радиосвязи оказывают высоты установки антенн над уровнем морской поверхности у взаимных корреспондентов. Поэтому наименьшая максимальная дальность связи с кораблями в море будет у объекта с наиболее низко установленными антеннами над уровнем моря. В представленных расчётах предельные дальности радиосвязи (на прямой видимости) для разных объектов составляют от 34,1 до 48,8 км при условии высоты антенны 15 м над уровнем моря на подвижном объекте.

Расчёты показали, что уменьшение высоты подъёма антенны на подвижном морском объекте с 15 до 3 м сократило максимальную дальность прямой видимости в рассмотренном примере с 38 км почти на 10 км. При этом снижение мощности радиопередатчика в 5 раз и уменьшение коэффициента усиления антенны в два раза на подвижном морском объекте уменьшают дальность распространения электромагнитного поля с требуемыми для радиосвязи параметрами приблизительно на 1/3, что на частотах выше 250 МГц приводит к постепенному снижению дальности радиосвязи по сравнению с дальностью прямой видимости на несколько км (максимум на 6 км на частоте 500 МГц).

В случае радиосвязи береговых объектов с малоразмерными плавсредствами (катерами, яхтами, шлюпками и т. п.), где применяются радиостанции с малой мощностью и антенны имеют низкую высоту над уровнем моря, дальность радиосвязи незначительно снижается в направлении К–Б по сравнению с дальностью прямой видимости, поэтому на предельных дальностях предпочтительнее работать в нижнем диапазоне УКВ частот (30–150 МГц), где дальность распространения электромагнитного поля больше, чем на частотах 220–512 МГц.

Литература

1. Радиоканал системы передачи извещений. URL: https://center-proton.ru/files/misc/antennofidernyjtrakt_rekomendacii.pdf (дата обращения 07.07.2025).
2. Шишаков К. В., Бояршинов М. А., Караваев П. В., Батулин А. С., Савельев А. В. Методика расчета радиолиний между двумя антеннами // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 14 (3). С. 64–67. URL: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2016-3-64-67> (дата обращения: 07.07.2025).
3. Ковалгин Ю. А., Соколов С. А. Сравнительная оценка энергетической эффективности систем аналогового ЧМ – и цифрового DRM–радиовещания // Информация и Космос. 2022. № 2. С. 16–26. URL: <https://infokosmo.ru/file/article/17032.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).
4. Ковалгин Ю. А. О применении программы Radio Mobile для расчета зон покрытия передатчиков, работающих в диапазоне ОВЧ // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 24–36. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-24-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-programmy-radio-mobile-dlya-rascheta-zon-pokrytiya-peredatchikov-rabotayuschih-v-diapazone-ovch> (дата обращения: 10.07.2025).
5. Рекомендация МСЭ-R P.1546-6. Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 08.07.2025).
6. Винниченко А. И., Воронин А. Л. Теория распространения радиоволн и антенно-фидерные системы. Часть I. – СПб.: Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, 1993. С. 276–348.
7. Верещагин Е. М. Антенны и распространение радиоволн. – М.: Воениздат МО СССР, 1964. С. 217–221.
8. Радиостанция Р-620. Руководство по эксплуатации ЯРИТ464514001 РЭ. / АО «Ярославский радиозавод», 2013.
9. Изделие К-674-11Б. Антенна приёмо-передающая МВ-ДМВ диапазона. Технические условия ПБИН.464651.001 ТУ / АО «НТИ «Радиосвязь», 2003.
10. URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/dbm/2-4/децибел-ватт-децибел-вольт/> (дата обращения: 10.07.2025).
11. URL: <https://r1ban.ru/calc/EMC.htm> (дата обращения: 10.07.2025).

References

1. Radiokanal sistemy peredachi izveshchenij [Radio channel of the notification transmission system] URL: https://center-proton.ru/files/misc/antenna-fidernyjtrakt_rekomendacii.pdf (date of access 07.07.2025) (in Russian).
2. Shishakov K. V., Boyarshinov M. A., Karavaev P. V., Baturin A. S., Savelyev A. V. Metodika rascheta radiolinij mezhdvumy antenami [Methodology for calculating radio links between two antennas] / Intelligent systems in production, 14 (3), 2016. Pp. 64–67. URL: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2016-3-64-67> (date of access: 07.07.2025) (in Russian).
3. Kovalgin Yu. A., Sokolov S. A. Sravnitel'naya ocenka ehnergeticheskoy ehffektivnosti sistem analogovogo CHM [Comparative assessment of the energy efficiency of analog FM and digital DRM broadcasting systems] / Information and Space, № 2, 2022. Pp. 16–26. URL: <https://infokosmo.ru/file/article/17032.pdf> (date of access: 07.08.2025) (in Russian).
4. Kovalgin Yu. A. O primenении programmy Radio Mobile dlya rascheta zon pokrytiya peredatchikov, rabotayushchikh v diapazone OVCH [On the use of the Radio Mobile program for calculating the coverage areas of transmitters operating in the VHF range] // Proceedings of educational institutions of communication, 2021. Vol. 7, № 2. Pp. 24–36. DOI: 10.31854/1813-324X-2021-7-2-24-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenении-programmy-radio-mobile-dlya-rascheta-zon-pokrytiya-peredatchikov-rabotayushchikh-v-diapazone-ovch> (date of access: 10.07.2025) (in Russian).
5. Rekomendatsiya MSEH-R P.1546-6. Metod prognozirovaniya dlya trass svyazi punkta S zonoj dlya nazemnykh sluzhb v diapazone chastot ot 30 MGc do 4000 MGc. [Recommendation ITU-R P.1546-6. Prediction method for point-to-area paths for terrestrial services in the frequency range from 30 MHz to 4000 MHz]. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-I!!PDF-R.pdf (date of access: 08.07.2025) (in Russian).
6. Vinnichenko A. I., Voronin A. L. Teoriya rasprostraneniya radiovoln i antenno-fidernye sistemy [Theory of Radio Wave Propagation and Antenna-Feeder Systems. Part I.] / N. G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, 1993. Pp. 276–348 (in Russian).
7. Vereshchagin E. M. Antenny i rasprostranenie radiovoln [Antennas and Radio Wave Propagation]. – Moscow, Voenizdat MO USSR, 1964. Pp. 217–221 (in Russian).
8. Radiostanciya R-620. Rukovodstvo po ehkspluatatsii YARIT464514001 REH [Radio Station R-620. Operation Manual YARIT464514001 RE] / JSC Yaroslavl Radio Plant, 2013 (in Russian).
9. Izdelie K-674-11B. Antenna priyomo-peredayushchaya MV-DMV diapazona. Tekhnicheskie usloviya PBIN.464651.001 TU [Product K-674-11B. MW-UHF Reception and Transmission Antenna. Technical conditions PBIN.464651.001 TU] / AO «NTI «Radiosvyaz», 2003 (in Russian).
10. URL: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/dbm/2-4/децибел-ватт-децибел-вольт/> (date of access: 10.07.2025) (in Russian).
11. URL: <https://r1ban.ru/calc/EMC.htm> (date of access: 10.07.2025) (in Russian).

Статья поступила 1 августа 2025 г.

Информация об авторах

Плотников Михаил Юрьевич – Генеральный директор АО «НИИ «Нептун». Соискатель ученой степени кандидата технических наук. Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: pmy@niineptun.ru

Исламов Альберт Ильдарович – Заместитель генерального директора – главный конструктор АО «НИИ «Нептун». Соискатель ученой степени кандидата технических наук. Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: iai@niineptun.ru.

Ильмер Дмитрий Валерьевич – Ведущий инженер АО «НИИ «Нептун». Кандидат технических наук. Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96, доб. 224. E-mail: ilm@niineptun.ru.

Шаповалов Фёдор Александрович – Инженер 2 категории АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-49-96, доб. 180. E-mail: shapovalovf99@yandex.ru.

Адрес: 199178. г. Санкт-Петербург, линия 7-я Васильевского Острова, д. 80, к. 1, лит. А.

**Estimation of the VHF radio communication range of coastal services
with mobile marine objects depending on the length of antenna-feeder paths
and the height of antenna installation above sea level**

M. Yu. Plotnikov, A. I. Islamov, D. V. Ilmer, F. A. Shapovalov

Annotation: *The current geopolitical situation requires not only maintaining, but also building up the forces of protection against the penetration of violators with various purposes into the coastal sea zones of the Russian Federation. The protection of biological marine resources is also one of the urgent tasks. The execution of these tasks at sea by security forces should be ensured by stable telecommunication radio communication in the ultra-short-wave frequency range with coastal control points. At the same time, in order to predict the coverage areas of ultra-short-wave radio communications designed for modernization and construction of onshore telecommunications facilities, theoretical studies are carried out with a quantitative assessment and analysis of the results obtained. The purpose of the work is to quantitatively analyze the radio ranges of the coastal telecommunications system with mobile sea objects in the ultra-short-wave range depending on the length of the antenna-feeder paths and the height of the antennas above sea level. Result determination of extreme ranges of ultra-short-wave radio communication for specific onshore designed facilities depending on their distance from the coastline, height above the sea surface, including, taking into account the placement of antennas on masts with different heights and, accordingly, from different lengths of antenna-feeder paths, which is one of the critical factors in the ultra-short-wave range due to significant signal power losses in the feeder. Practical significance: the results of the calculations make it possible to assess the possibility of providing the required ranges of ultra-short-wave radio communications for the designed coastal facilities with different geodetic and topographic locations near the seashore, with different architecture of antenna-mast structures and the need to place radio stations in specially equipped outdoor cabinets to reduce the length of antenna-feeder paths.*

Keywords: *antenna, antenna-feeder path, communication range, radiated power, cable attenuation coefficient, voltage standing wave coefficient, gain coefficient, electromagnetic field strength, underlying surface parameters, ultrashortwave radio communication, receiver sensitivity.*

Information about Authors

Mikhail Yuryevich Plotnikov – General Director of JSC «Research Institute «Neptune». Applicant of the academic degree of Candidate of Technical Sciences. Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: pmy@niineptun.ru.

Albert Ildarovich Islamov – Deputy General Director – chief designer of JSC «Research Institute «Neptune». Applicant of the academic degree of Candidate of Technical Sciences. Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: psa@niineptun.ru.

Dmitry Valerievich Ilmer – Candidate of Technical Sciences. Lead Engineer of JSC «Research Institute «Neptune». Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)327-49-96 ext. 224. E-mail: ilm@niineptun.ru.

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

Address: 199178, Russia, Saint-Petersburg, 7th line of Vasilyevsky Island, house 80, bild. 1, let. A.

Для цитирования:

Плотников М. Ю., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А. Оценка дальности УКВ радиосвязи береговых служб с подвижными морскими объектами в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 2-14. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-2-14.

For citation:

Plotnikov M. Yu., Islamov A. I., Ilmer D. V., Shapovalov F. A. Estimation of the VHF radio communication range of coastal services with mobile marine objects depending on the length of antenna-feeder paths and the height of antenna installation above sea level. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 2-14 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-2-14.

Исследование дальности связи линии передачи цифровых сигналов на основе приемопередатчиков с модуляцией LoRa в условиях помех

Бобровский В. И., Сусликов Н. В., Кукунин Д. С., Журавель Е. П.

Аннотация. В работе исследуется предельная дальность связи сети с использованием метода модуляции «Long Range» в неблагоприятных условиях, с высоким уровнем помех. Исследования базируются на результатах испытаний функционирования сети «Long Range Wide Area Network». В качестве центрального элемента сети выбрана базовая станция RAK 7289, работающая под управлением операционной системы WisGateOS. Описываются особенности программного обеспечения сети радиосвязи. В статье приводятся состав сети «Long Range Wide Area Network», ее конфигурация и настройка. Для оценки результатов функционирования данной сети в работе представлена методика проведения испытаний и обработки полученных результатов. Приводятся результаты испытаний, проведенных в лесистой местности (полигон связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича «Воейково») и в условиях городской застройки (Невский район г. Санкт-Петербурга). В работе представлены графики зависимости показателей Signal-To-Noise Ratio – отношение полезного сигнала к шуму и Received Signal Strength Indicator – индикатор уровня принимаемой мощности радиосигнала от расстояния между модулями «Long Range» и базовой станцией. Приводится сравнительный анализ показателей радиосвязи в лесистой местности и городской застройке. В работе также представлены табличные значения конфигурации параметров и результатов измерения дальности связи. Даны рекомендации практического использования представленного в статье оборудования.

Ключевые слова: большой радиус передачи сигнала, испытание дальности связи, LoRa, LoRaWAN, энергоэффективная передача данных.

Введение

Стремительный рост популярности использования устройств интернета вещей вызывает потребность в методах модуляции, которые могли бы обеспечить связь на дальних расстояниях в условиях низкого энергопотребления. Один из таких методов модуляции заложен в основу стандартов протокола LoRa.

Название метода расшифровывается как «Long Range», что указывает на его назначение – дальнюю передачу данных. Помимо дальности передачи, приёмопередатчику свойственна довольно высокая энергоэффективность, что делает его практичным для решения широкого круга задач, в том числе, для организации работы сети устройств интернета вещей.

Целью настоящей работы является оценка дальности связи метода беспроводной модуляции LoRa, а также выработка рекомендаций для проведения подобного рода испытаний.

Состав испытательной сети

Для проведения испытаний была сформирована сеть на базе открытых протоколов LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). Данная спецификация определяет протокол связи и архитектуру системы.

Следует отметить, что LoRaWAN относится к типу сетей LPWAN (Low-Power Wide-area Network), то есть к энергоэффективным сетям дальнего радиуса действия. С 2021 года LoRaWAN официально признана в качестве международного стандарта МСЭ для глобальных сетей с низким энергопотреблением, номер рекомендации МСЭ-T Y.4480 [1].

Типовая архитектура сети LoRaWAN содержит конечные узлы, шлюзы (базовые станции), сервер сети и сервер приложений.

Конечные узлы – это устройства, получающие или формирующие некоторую информацию, предназначенную для дальнейшей передачи в сеть, а также осуществляющие управленческую деятельность. Такими устройствами могут быть не только датчики мониторинга контроля окружающей среды (температура, влажность, газоанализ), но и модули, интегрированные в бытовое оборудование (стиральные машины, дверные замки и пр.).

В качестве конечных узлов могут выступать также микроконтроллеры, такие как, например, *ESP32*, *Arduino*, *nRF52* и другие. В данном случае требуется лишь обеспечить их подключение к приемопередатчикам *LoRa*, производством которых занимается владелец патента на данную технологию, компания *Semtech Corp*.

Шлюзы или базовые станции (БС) – это устройства, получающие сообщения от конечных узлов и перенаправляющие их к серверу сети (в англоязычной литературе «*uplink*»), а также получающие сообщения от сервера сети и отправляющие их на конечные узлы («*downlink*»). Обмен данными между конечными узлами и шлюзами происходит с использованием прямого соединения *LoRa*. Информационное сообщение между шлюзами и сервером сети осуществляется через стек протоколов *TCP/IP*.

Шлюзы и конечные узлы должны общаться по согласованному плану частот. Таким образом, ассоциацией *LoRa Alliance* для Российской Федерации определён набор частот под общим названием *RU864*, задействующий частоты с 864 по 870 МГц [2].

Указание верного плана частот важно для учёта требований местных регуляторов. Для полосы радиочастот 866-868 МГц Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) установлено ограничение максимальной эффективной излучаемой мощности (ЭИМ) 25 мВт, максимальной спектральной плотности ЭИМ 1000 мВт/МГц, рабочего цикла 1 % или режим *LBT* (*Listen Before Talk* – «прослушивание перед вещанием»), при этом указав запрет на использование данных частот в пределах аэропортов (аэродромов). Для диапазона 868,7-869,2 МГц ГКРЧ не ограничила максимальную спектральную плотность ЭИМ, но допустила не более 100 мВт максимальной ЭИМ, 10 % рабочего цикла или режим *LBT*.

Сервер сети обеспечивает управление всей сетью *LoRaWAN*. В его задачи, среди прочего, входит: проверка подлинности и целостности устройств, устранение повторяющихся *uplink*, определение целевых шлюзов для полученных *downlink*.

Сервер приложений является ключевым элементом, взаимодействующим с сервером сети, он выполняет обработку и анализ собранных данных, предоставляет их оператору через пользовательский интерфейс, позволяет формировать *downlink* к определённому конечному узлу.

В качестве конечного узла в данной работе был использован модуль от производителя *LILYGO* модели *LoRa32 V2.1_1.6*. Данный модуль построен на базе микропроцессора с малым энергопотреблением *ESP32* компании *Espressif Systems*. В качестве модуля связи был использован приёмопередатчик *Semtech SX1276*, позволяющий работать с российскими частотами *LoRa RU864*.

В качестве базовой станции была выбрана станция *RAK 7289*. Данная базовая станция работает под управлением операционной системы *WisGateOS 2* и поддерживает до 16 каналов *LoRa*, соединение по *Wi-Fi* и *Ethernet*, а также сотовое подключение. Последнее удобно для обеспечения резервного канала связи. Заявлена поддержка следующих диапазонов частот: *EU868*, *IN865*, *US915*, *AU915*, *KR920*, *AS923-1-2-3-4*, *EU433*, *CN470* [3]. Несмотря на отсутствие в официальной документации упоминания поддержки диапазона частот *RU864*, данный набор частот поддерживается без дополнительных модификаций прошивки.

Для выполнения функций сетевого сервера и сервера приложений будет использован сервис *The Things Network (TTN)*.

Схема подключения указанных компонентов в составе испытательной сети представлена на рис. 1.

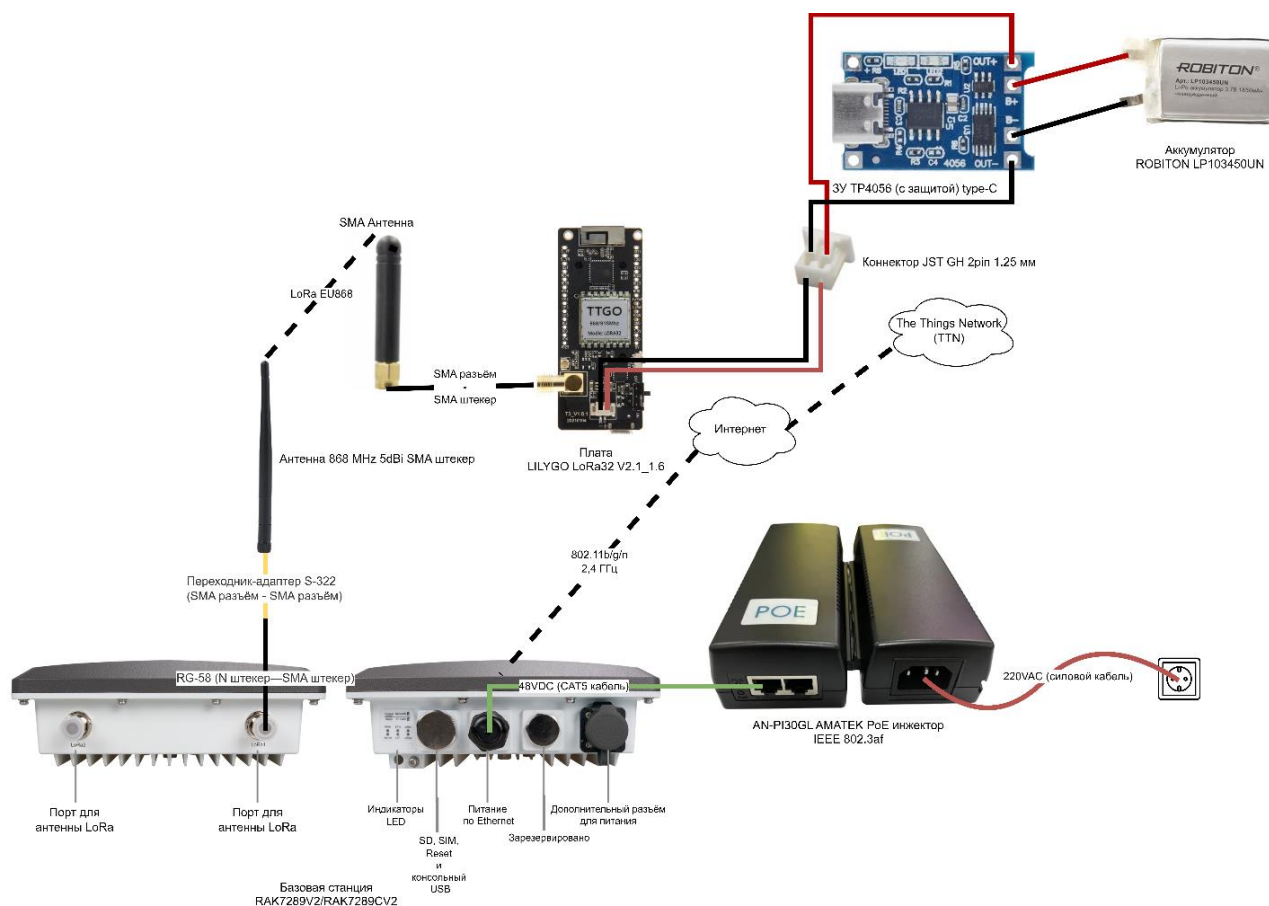


Рис. 1. Схема подключения испытательной сети

Примечание: RAK 7289 включает переходник *N-male* на *SMA-female*, то есть, без необходимости удалённого расположения антенны от БС, возможно развёртывание сети без кабельной сборки RG-58 и переходника-адаптера S-322.

Настройка испытательной сети

Базовая станция была подключена к *The Things Network* в рекомендуемый для Российской Федерации кластер *eu1.cloud.thethings.network*. Для подключения требовалось значение расширенного уникального идентификатора шлюза (*Gateway EUI*). Для вещания через метод *LoRa* использовался частотный план под общим названием *EU868*.

Существует два способа активации конечного узла, *ABP* и *OTAA*. *ABP* (*Activation By Personalization*) – это более простой, но не рекомендуемый способ активации. При данном способе в памяти конечного узла фиксируется значение *DevAddr* и значения ключей сессии. Это упрощает процесс активации, но вводит несколько ограничений. Второй способ, *OTAA* (*Over-The-Air Activation*), позволяет формировать *DevAddr* динамически, меняя его от сессии к сессии. Это позволяет устройству без внесения изменений в прошивку продолжать функционирование при смене сети и изменять сессионные ключи в случае их утечки, следовательно, предпочтительнее использовать этот метод. Для активации через *OTAA* требуется задать в памяти конечного узла три значения: *DevEUI*, *JoinEUI* (до спецификации *LoRaWAN* 1.1 назывался *AppEUI*) и *AppKey*. *DevEUI* может быть сформирован на основе *MAC*-адреса по методу *IEEE* «*Mapping an EUI-48 to an EUI-64*», но он признан устаревшим и не рекомендуется к использованию из-за потенциальной возможности дублирования идентификаторов *EUI-64* [4]. *JoinEUI* – это глобальный уникальный идентификатор

приложения, состоит из 64 бит. *AppKey* – это секретный ключ AES-128, также называемый как корневой ключ. Значение данного ключа должно совпадать с заданным в целевой сети. При этом значение этого ключа никогда не передаётся через сеть. Для успешного завершения процесса активации серверу сети должны быть известны все три значения, заданные на конечном узле. В случае если серверу сети не известны *DevEUI* или *JoinEUI* узла, инициирующего активацию, то он не станет ему отвечать. Если оба эти значения имеются в базе данных сетевого сервера, то ответ конечному узлу поступит, но если *AppKey* конечного узла отличен от *AppKey* сетевого сервера, то он не сможет корректно расшифровать полученные сессионные ключи. Если же ответное сообщение было успешно расшифровано и получены требуемые ключи, то процесс активации завершён успешно и конечный узел может отправлять восходящие сообщения (*uplink*) серверу приложений.

Модуль *LoRa* (конечный узел) был настроен посредством модификации базовой прошивки. Методом активацией был выбран OTAA. *DevEUI* был сформирован из MAC-адреса, так как полученный адрес использовался только в рамках локальной сети. *JoinEUI* и *AppKey* вписаны в прошивку. Вещание по методу *LoRa* было настроено с использованием частотного плана под общим названием EU868.

Методика испытаний и обработки результатов

На определённой местности устанавливалась базовая станция, при этом точка установки по возможности располагалась на большей высоте. В месте установки базовой станции и сопутствующего оборудования оставался ответственный, контролирующий сохранность и работоспособность устройств. Двум исследователям выдавался конечный узел (в данном случае модуль *LoRa*). Первый отвечал за его сохранность при перемещении, отслеживание показателей устройства и фиксацию координат (оператор модуля *LoRa*), второй за взаимодействие с сетью *The Things Network*, отслеживание состояния сети. Так как в используемом конечном узле отсутствует модуль *GPS*, то оператор модуля *LoRa* фиксировал координаты с помощью переносимого мобильного устройства с поддержкой требуемого функционала. При достижении ими определённой точки отдалённости от базовой станции, производилась фиксация координат и проверка наличия стабильного соединения. С использованием сервиса «Яндекс. Карты» определялось предварительное примерное расстояние между базовой станцией и конечным узлом. Таким образом, эмпирическим методом определялось граничное расстояние, на котором сигнал был нестабилен. После этого уточнялась крайняя точка, где возможна установка стабильного соединения.

Для подтверждения работоспособности сети на определённом расстоянии, по мере отдаления конечного узла от базовой станции, отслеживалась сеть *The Things Network*. При отсутствии проблем с соединением по каналу *LoRa* между конечным узлом и базовой станцией, в сеть *The Things Network* поступали сообщения от конечного узла. Помимо этого, в сеть *The Things Network* поступали служебные сообщения от базовой станции. Это позволяло отследить, что соединение между базовой станцией и сервером приложений присутствует, таким образом, исключая сценарий, при котором будет сделан неверный вывод об отсутствии соединения между конечным узлом и базовой станцией из-за проблем на уровне *TCP/IP*, то есть в канале связи между базовой станцией и сервером приложений.

Определение неработоспособной дальности связи между базовой станцией и конечным узлом определялось следующим образом. Если в сеть *The Things Network* на протяжении нескольких минут не поступают сообщения от модуля *LoRa*, но при этом наблюдаются служебные сообщения от базовой станции, то в таком случае делался предварительный вывод, что связь разорвана и на текущем расстоянии в условиях местных помех связь невозможна или затруднена. Для окончательного подтверждения невозможности обеспечения стабильного канала связи отслеживались показатели самого конечного узла,

который отображал на собственном экране информацию о текущем статусе соединения. Если отображалось, что отправлен *Join-request*, но в течение более чем 5 минут не был получен *Join-accept*, то это означало, что сигнал конечного узла либо не доходит до базовой станции, либо ответный сигнал от базовой станции не доходит до конечного узла. Определить работоспособность соединения от модуля *LoRa* до базовой станции можно было с помощью журналов протоколирования используемой базовой станции. Если данная станция принимала сообщения *Join-request* и отправляла *Join-accept*, при этом конечный узел не принимал отправленный *Join-accept*, то это означало, что соединение работоспособно только в одну сторону, от конечного узла к базовой станции.

Для определения параметров сигнала принималось во внимание два показателя – *RSSI* и *SNR*.

RSSI (*Received Signal Strength Indicator* – показатель уровня принимаемого сигнала) – относительный показатель, позволяющий определить мощность принимаемого сигнала. Измеряется в дБм и его значение имеет отрицательную форму. Чем ближе значение *RSSI* к нулю, тем сильнее принимаемый сигнал.

SNR (*Signal-to-Noise Ratio* – соотношение сигнала к шуму) – показатель, определяющий отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. Измеряется в децибелах (дБ) и используется для определения качества полученного сигнала. Рассчитывается по формуле (1).

$$SNR = P_{\text{сигнал}}/P_{\text{шум}}, \quad (1)$$

где P – средняя мощность.

Так как данные по расстоянию между базовой станцией и модулем *LoRa*, полученные с использованием сервиса «Яндекс. Карты», носят предварительный характер, то в процессе обработки результатов было получено более точное значение расстояния с помощью формулы Винсенти. Данная формула рассчитывает расстояние между двумя точками исходя из того, что Земля имеет форму типа сфероид. Решение по данной формуле является итеративным [5].

Испытание дальности связи методом модуляции *Lora*

Общая информация

Исследования предельной дальности связи проводились в двух местах. Первое место расположено в Ленинградской области на полигоне связи «Воейково», принадлежащего Санкт-Петербургскому государственному университету телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Условия связи – преобладание лесистой местности и естественные помехи. Второе место было выбрано в Невском районе г. Санкт-Петербурга, рядом с расположением СПбГУТ, на проспекте Большевиков. Условия связи – быстрые замирания сигналов и преобладание промышленных помех.

Измерения производились поздней осенью, территории были покрыты обильным количеством снега.

Испытание в лесной местности

Данные измерения производились рядом с базой отдыха СПбГУТ, 22 ноября 2023 года. Ориентировочно в промежутке 14-17 часов дня.

БС была расположена в здании базы отдыха (координаты БС согласно её же сведениям в момент исследования: широта 59,95705, долгота 30,69645, высота над уровнем моря 51 м), в дверном проёме, выходящем на уличную лестницу. Второй этаж базы отдыха был недостаточно высок, так что крыша соседнего здания частично мешала сигналу.

Оператор с модулем *LoRa* отдалялся от БС, периодически проводя измерения расстояния и качества сигнала. Для замера расстояния был выбран маршрут с наименьшим количеством препятствий между БС и модулем.

По результатам замера удалось установить, что стабильность сигнала нарушается при отдалении более чем на 400 метров. Максимальную дальность удалось установить на отметке 552 метра, но это были удачные обстоятельства, при которых соотношение сигнала к шуму было крайне высоким. В дальнейшем повторить этот результат не удалось.

На расстоянии 633 метров в *TTN* приходил *Uplink*, пытавшийся инициировать активацию модуля *LoRa*. Сам модуль *LoRa* при этом *Downlink* от БС не получал, так что закончить активацию не получалось. Приближение к БС не исправляло ситуацию до достижения того же рубежа в 400 метров.

Таблица 1 содержит некоторые из результатов замеров в лесной местности с указанием номера, информации о наличии сигнала, его параметрах, местоположении модуля *LoRa* и расстоянии между БС и модулем *LoRa*.

Таблица 1 – Результаты замеров в лесной местности

№ п/п	Сообщения доходят до TTN	Параметры сигнала		Местоположение		Расстояние	
		SNR, дБ	RSSI, дБм	Широта	Долгота	Яндекс. Карты, м	Формула Винсенти, м
1	Да	11	-83	59,95788	30,6978	-	119,33
2	Да	5,8	-106	59,95994	30,70034	-	388,46
3	Да	1,3	-110	59,959846	30,699967	-	368,30
4	Да	1,5	-110	59,959889	30,700257	-	381,16
5	Да	6,8	-104	59,960984	30,702458	563	552,06
6	Нет на протяжении 10 минут	-	-	59,96334	30,701132	760	748,00
7	Да, но только Uplink	-	-	59,962468	30,699879	662	633,30

Получить соединение на расстоянии замера номер 5 (552 м) удалось только один раз из множества попыток. Это указывает на сильную нестабильность сигнала на расстояниях свыше 400 м.

Ниже представлены графики зависимости показателей *SNR* и *RSSI* от изменения расстояния между конечным узлом и базовой станцией (рис. 2 – 3).

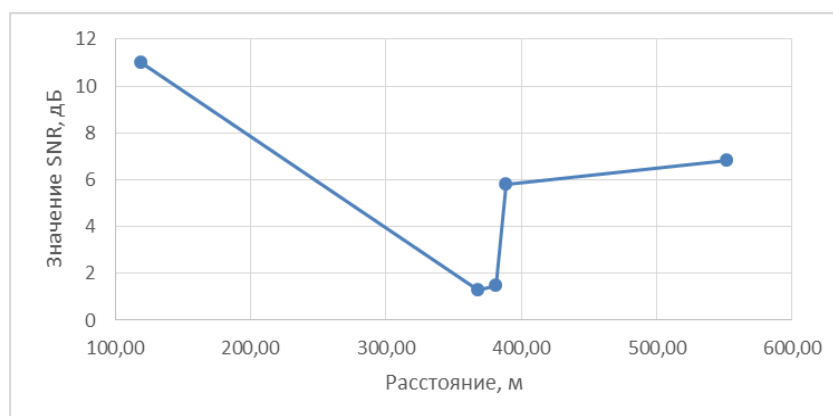
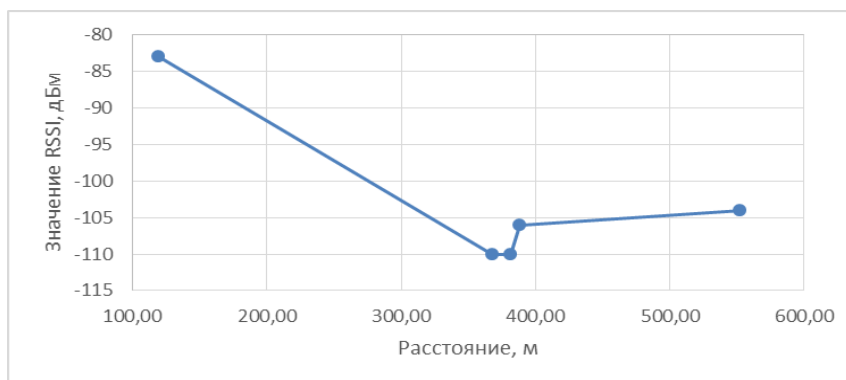


Рис. 2. График зависимости показателя *SNR* от расстояния между модулем *LoRa* и БС

В результате были получены низкие показатели дальности связи. Это связано с большим количеством препятствий между БС и модулем *LoRa*, которые включали в себя как деревья, так и перепады высот (на замеряемой местности было множество холмов, которые на определённых промежутках маршрута оператора препятствовали сигналу).

Рис. 3. График зависимости показателя *RSSI* от расстояния между модулем *LoRa* и БС**Испытание в городской местности**

Данные измерения производились поблизости с главным корпусом СПбГУТ, расположенным на проспекте Большевиков, 29 ноября 2023 года, ориентировочно в промежутке 18-21 часов вечера.

БС была расположена изначально в багажнике автомобиля, а в дальнейшем перемещена на крышу транспортного средства. Координаты БС по собственным данным: широта 59,89641, долгота 30,49286, высота над уровнем моря 11 метров.

Оператор с модулем *LoRa* в коробке перемещался по проспекту Большевиков таким образом, чтобы между БС и модулем было как можно меньше препятствий.

Таблица 2 содержит часть сведений по некоторым замерам, проведённым в городской местности. Заголовки табл. 2 те же, за исключением второго, который был изменён в связи с внесением корректировок на поздних этапах исследования, о чём будет описано ниже.

Таблица 2 – Результаты замеров в городской местности

№ п/п	Сообщения получены (условное обозначение)	Параметры сигнала		Местоположение		Расстояние	
		SNR, дБ	RSSI, дБм	Широта	Долгота	Яндекс Карты, м	Формула Винсенти, м
1	Да (in4)	6,3	-99	59,896803	30,491379	190 м	93,75
2	Да (in3)	12,3	-91	59,897626	30,490586	208 м	185,89
3	Да (in2)	5	-105	59,899551	30,488613	436 м	423,04
4	Нет (in1) в течение ~5 мин.	-	-	59,899551	30,488613	528 м	423,04
5	Да	10,8	-89	59,899551	30,488613	528 м	423,04
6	Да	6,8	-96	59,900325	30,487933	538 м	516,04
7	Да	-1,5	-101	59,901889	30,486134	724 м	717,17
8	Да	-5,8	-98	59,904537	30,483859	1,1 км	1036,14
9	Нет	-	-	59,906453	30,482612	1,3 км	1257,33
10	Да	-7,3	-104	59,905993	30,48279	1,2 км	1207,27
11	Да (out1)	7	-88	59,900541	30,489128	517 м	505,42
12	Да (out2)	5,5	-96	59,899499	30,488708	426 м	415,26
13	Да (out3)	9	-91	59,897561	30,490268	201 м	193,63
14	Да (out4)	-6,5	-104	59,89523	30,49076	185 м	176,35

Изначально БС находилась внутри автомобиля. Четвёртый замер на расстоянии 423 метров выявил отсутствие стабильности связи между модулем *LoRa* и БС. В связи с этим было принято решение перенести БС на крышу транспортного средства, что стабилизировало сигнал и сильно улучшило его показатели, что видно по пятому замеру. В дальнейшем БС оставалась на крыше. Помимо этого, были проведены дополнительные замеры примерно в тех же точках, что и те, что были зафиксированы при расположении БС в багажнике. Для удобства интерпретации результатов были введены условные обозначения, указывающие расположение БС в багажнике или на крыше (в багажнике – *in*, на крыше – *out*) и идентификатор места. Таким образом, при замере в точке 3 и расположении БС в багажнике используется обозначение «*in3*», а при замере в той же точке и расположении БС на крыше – «*out3*».

В процессе исследования была установлена нестабильность и аномальность работы *TTN*, в связи, с чем при отсутствии сигнала на расстоянии 1257 м (9-ый замер) было принято решение отказаться от *TTN* и продолжить измерения с переводом БС в режим сервера приложений. Это не отменяло и не фальсифицировало результаты предыдущих замеров, но давало возможность быстрее и надёжнее получать подтверждения наличия сигнала. Так как ранее приходилось ждать вплоть до 10-ти минут, так как *TTN* мог временно переставать принимать сигналы даже при условии, что БС и модуль *LoRa* ими успешно обмениваются. Это удалось установить по панели сводки БС, которая отображала количество принятых *Uplink* и отправленных *Downlink*.

Ниже представлены графики зависимости показателей *SNR* и *RSSI* от изменения расстояния между конечным узлом и базовой станцией (рис. 4 – 5). В графики не включены значения, полученные до выноса БС на крышу транспортного средства.

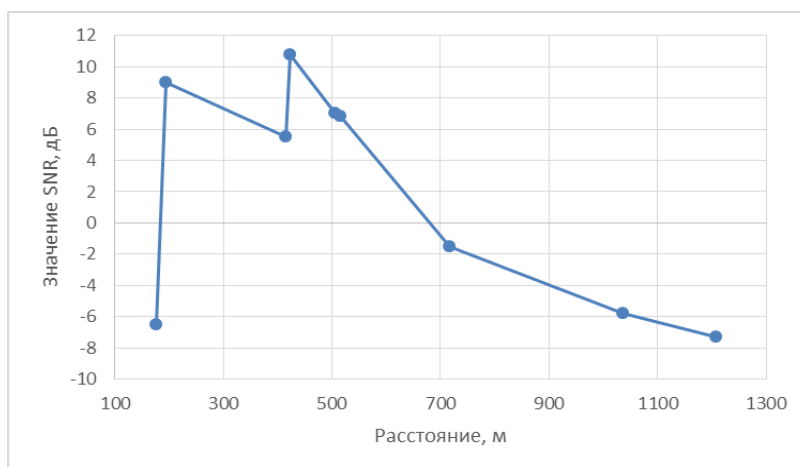


Рис. 4. График зависимости показателя *SNR* от расстояния между модулем *LoRa* и БС

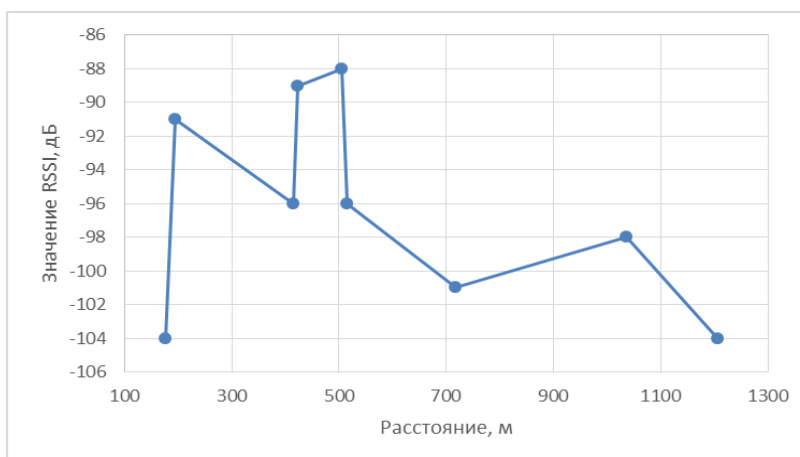


Рис. 5. График зависимости показателя *SNR* от расстояния между модулем *LoRa* и БС

Измерения в условиях города показали значительно лучшие показатели дальности связи. Удалось достичь стабильной связи на расстоянии 1 207 метров (10-ый замер), при этом модуль находился поблизости со ст. метро «Проспект Большевиков», где наблюдалось большое количество помех. Это заметно по показателю *SNR*, который достиг отрицательного рекорда, то есть количество шума значительно преобладало над уровнем сигнала.

Заключение

В работе приведены результаты серии испытаний, проведённых с целью установления предельной дальности связи сети с использованием беспроводного метода модуляции *LoRa* в условиях, приближенных к реальным. Исследования проведены в двух разных типах местности, первой локацией была лесистая местность, второй городская. В условиях с преобладанием искусственных помех лесной местности организовать стабильный канал связи удалось только на расстоянии до 400 метров. Исследования в городской местности показали значительно лучший результат, позволив организацию стабильного канала связи на расстоянии до 1 200 метров, с учётом того, что на первой местности базовая станция была расположена значительно выше.

Для упрощения подобных исследований следует подключить к конечному узлу модуль *GPS* или ГЛОНАСС для автоматизации фиксации координат, исключить лишние каналы связи в составе сети.

Особенностью работы является указание времени проведения испытаний, перечня используемого оборудования и точного значения координат ключевых элементов сети. Это позволяет провести по указанным в данной статье сведениям похожие исследования для сравнения результатов исследования линий радиосвязи при использовании другого оборудования.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1024032900105-1-2.2.4;2.2.5;2.2.6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Литература

1. Низкоэнергетический протокол для территориально распределенных беспроводных сетей: у.4480 / МСЭ-Т. Женева. 2021. 57 с.
2. LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4: rp002-1.0.4. LoRa Alliance. Fremont. 2022. 101 p.
3. RAK7289 WisGate Edge Pro Datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisgate/rak7289/datasheet/> (Дата обращения: 12.11.2024).
4. Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID) [Электронный ресурс]. URL: <https://standards-support.ieee.org/hc/en-us/articles/4888705676564-Guidelines-for-Use-of-Extended-Unique-Identifier-EUI-Organizationally-Unique-Identifier-OUI-and-Company-ID-CID> (Дата обращения: 15.11.2024).
5. Винсенти Т. Прямые и обратные задачи геодезии на эллипсоиде с применением вложенных уравнений // Обзор геодезии. 1975. Т. 23, № 176. С. 88-93. doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88.

References

1. Low-energy protocol for wireless wide area networks: у.4480. ITU-T. Geneva, 2021. 57 p. (in Russian).
2. LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4: rp002-1.0.4 / LoRa Alliance. Fremont. 2022. 101 p.
3. RAK7289 WisGate Edge Pro Datasheet [Electronic resource]. URL: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisgate/rak7289/datasheet/> (Accessed: 12.11.2024).
4. Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID) [Electronic resource]. URL: <https://standards-support.ieee.org/hc/en-us/articles/4888705676564-Guidelines-for-Use-of-Extended-Unique-Identifier-EUI-Organizationally-Unique-Identifier-OUI-and-Company-ID-CID> (Accessed: 15.11.2024).

5. Vincenty T. Direct and inverse problems of geodesy on an ellipsoid using nested equations. Review of Geodesy. 1975. V. 23, no. 176. Pp. 88-93. Doi: 10.1179/sre.1975.23.176.88 (in Russian).

Статья поступила 24 июня 2025

Информация об авторах

Бобровский Вадим Игоревич – Доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». Профессор кафедры программной инженерии и вычислительной техники. Область научных интересов: программирование интернет вещей; робототехника; разработка портативных средств радиосвязи; защита от преднамеренных помех; разработка систем с многопользовательским детектированием. SPIN-код: 8342-9156. РИНЦ AuthorID: 707198. E-mail: bobrovskii.vi@sut.ru. Тел.: +7(962)681-10-21.

Адрес: Россия, 197341, г. Санкт-Петербург, ш. Фермское, д. 15, корп. 1, кв. 29.

Сусликов Никита Викторович – Магистрант. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». Студент кафедры программной инженерии и вычислительной техники. Область научных интересов: сети и системы связи, программирование, искусственный интеллект. E-mail: nikita---3@mail.ru. Тел.: +7(921)971-40-26.

Адрес: Россия, 195276, Санкт-Петербург, ул. Демьяна Бедного, д. 30, корп. 4, кв. 35.

Кукунин Дмитрий Сергеевич – Кандидат технических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». Доцент кафедры сетей связи и передачи данных. Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование, дискретное логарифмирование в полях Галуа, широкополосные сигналы. SPIN-код: 5276-1211. РИНЦ AuthorID: 533768. E-mail: kukunin.ds@sut.ru. Тел.: +7(921)408-50-86.

Адрес: Россия, 193318, г. Санкт-Петербург, Дальневосточный пр. 46/28, кв. 323.

Журавель Евгений Павлович – Кандидат технических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». Доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники. Область научных интересов: программное, математическое и информационное обеспечение телекоммуникационного оборудования мультисервисных сетей связи. SPIN-код: 1928-1614. РИНЦ AuthorID: 832550. E-mail: zhuravel.ep@sut.ru. Тел.: +7(812)305-12-56, доб. 2107

Адрес: Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

Testing the communication range of the LoRa signal modulation method under high interference conditions

V. I. Bobrovsky, N. V. Suslikov, D. S. Kukunin, E. P. Zhuravel

Annotation: The paper examines the maximum communication range of a network using the LoRa modulation method in adverse conditions with a high level of interference. The research is based on the results of tests of the functioning of the LoRaWAN network. The RAK 7289 base station running the WisGateOS operating system has been selected as the central element of the network. The features of the radio network software are described. The article describes the composition of the LoRaWAN network, its configuration and configuration. To evaluate the results of the functioning of this network, the paper presents a methodology for testing and

processing the results obtained. The results of tests conducted in a wooded area (the communications range of the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruevich (SPbGUT) "Voeikovo") and in urban conditions (Nevsky district of St. Petersburg) are presented. The paper presents graphs of the dependence of SNR indicators (Signal-To-Noise Ratio – the ratio of the useful signal to noise) and RSSI (Received Signal Strength Indicator – an indicator of the level of received radio signal power) from the distance between the LoRa modules and the base station. A comparative analysis of radio communication indicators in wooded areas and urban areas is given. The paper also presents tabular values of the configuration of the parameters and the results of measuring the communication range. Recommendations for the practical use of the equipment presented in the article are given.

Keywords: large signal transmission radius, communication range test, LoRa, LoRaWAN, energy efficient data transmission.

Information about authors

Vadim Igorevich Bobrovskiy – PhD (Tech.). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich". Professor of the Department of Software Engineering and Computer Engineering. Field of research: programming of the Internet of Things; robotics; development of portable radio communications; protection against intentional interference; development of systems with multi-user detection. SPIN-cod: 8342-9156. RINTS AuthorID: 707198. E-mail: bobrovskii.vi@sut.ru. Tel.: +7(962)681-10-21.

Address: Russia, 197341, St. Petersburg, Fermiskoe Highway, 15, bldg. 1, apt. 29.

Nikita Viktorovich Suslikov – Master's degree student. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich". Student of the Department of Software Engineering and Computer Engineering. Research interests: networks and communication systems, programming, AI. E-mail: nikita---3@mail.ru. Tel.: +7(921)971-40-26.

Address: Russia, 195276, Saint Petersburg, Demyan Bedny st., bldg. 30, building 4, apt. 35.

Dmitry Sergeevich Kukunin – PhD (Tech.). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich". Associate Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission. Field of research: noise-resistant coding, discrete logarithm in Galois fields, broadband signals. SPIN-cod: 5276-1211. RINTS AuthorID: 533768. E-mail: kukunin.ds@sut.ru. Tel.: +7(921)408-50-86.

Address: Russia, 193318, Saint-Petersburg, Far Eastern Avenue 46/28, apt. 323.

Evgeniy Pavlovich Zhuravel – PhD (Tech.). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich". Associate Professor at the Department of Software Engineering and Computer Engineering. Field of research: software, mathematical and information provision for telecommunications equipment of multiservice communication networks. SPIN-cod: 1928-1614. RINTS AuthorID: 832550. E-mail: zhuravel.ep@sut.ru. Tel.: +7(812)305-12-56, add. 2107

Address: Russia, 193232, Saint-Petersburg, Bolshevnikov Ave. 22, bldg. 1.

Для цитирования:

Бобровский В.И., Сусликов Н. В., Кукунин Д. С., Журавель Е. П. Исследование дальности связи линии передачи цифровых сигналов на основе приемопередатчиков с модуляцией LoRa в условиях помех // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 15-25. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-15-25.

For citation:

Bobrovsky V.I., Suslikov N.V., Kukunin D.S., Zhuravel E.P. Testing the communication range of the LoRa signal modulation method under high interference conditions. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 15-25 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-15-25.

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.391.8

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-26-45

Моделирование и установление свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей «комбинированного» типа в интересах реализации «третьей решающей схемы»

Сныткин И. И., Сныткин Т. И., Афонин И. Е., Афонин Л. И.

Актуальность. В работах, посвященных разработке теории и практики применения «третьей решающей схемы», указывается, что её эффективность в значительной степени определяется тем, какие и как используются свойства и закономерности детерминированности частных автокорреляционных функций конкретных видов и типов двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей, используемых в третьей решающей схеме. Поэтому установление, исследование этих свойств и закономерностей является важной задачей, связанной с практическим их применением в интересах повышения эффективности процедур «приёма-обработки» сложных шумоподобных сигналов, к которым относятся в целом двукратные производные нелинейные рекуррентные последовательности. Свойства и закономерности их частных автокорреляционных функций определяются видами, типами двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей и их порождающих элементов – простых нелинейных рекуррентных последовательностей, существующих в простых $GF(p)$ и расширенных полях $GF(p^n)$ Галуа, где p – простое число. На настоящий момент в рамках развития данных направлений исследований с учетом уже известных результатов необходимо установить и исследовать свойства и закономерности двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей «комбинированного» типа четной длительности L . **Цель работы:** установить, исследовать, математически формализовать, систематизировать свойства и закономерности указанного типа двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей. **Используемые методы:** моделирование, в том числе машинное, с использованием методики, изложенной в предыдущих работах авторов, математическая формализация в виде утверждений – закономерностей, систематизированных для любых L . **Результаты.** Представлены результаты моделирования свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей данного «комбинированного» типа в рамках реализации третьей решающей схемы, в виде установленных, исследованных, систематизированных и математически формализованных в виде утверждений свойств и закономерностей частных автокорреляционных функций, что позволяет в обобщенном виде их использовать для организации эффективных процедур (в объеме соответствующих разрабатываемых способов и технических решений) идентификации типов, видов, классов, подклассов, поиска, захвата и синхронизации двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей данного «комбинированного» типа. **Практическая значимость.** Полученные свойства и закономерности непосредственно используются при разработке технических решений и программных алгоритмов по реализации третьей решающей схемы ускоренного поиска и эффективного приема сложных шумоподобных сигналов и раскрытия их структуры при построении телекоммуникационных радиосистем, в том числе пакетных радиосетей специального назначения со сложными сигналами.

Ключевые слова: А-синхронизация, В-синхронизация, двукратная производная нелинейной рекуррентной последовательности, дискретная частная автокорреляционная функция, канальная тактовая последовательность чисел совпадений, простая нелинейная рекуррентная последовательность, последовательность чисел совпадений, частная автокорреляционная функция.

1. Актуальность

К началу второй половины XX века ученые и практики в области систем передачи информации (СПИ) решили задачу «систематизации» процессов анализа и синтеза СПИ, систем связи (СС) в целом с точки зрения ее унификации на основе формировавшихся и развивавшихся на протяжении предыдущих десятилетий единых *категорий* и *понятий*, например, таких как: «сигнал», «оптимальный» и «неоптимальный» прием сигнала, «первичное кодирование», как «1-я формирующая схема» (ПФС), вторичное или «помехоустойчивое» кодирование (ПМУК) и декодирование (ПМУД), «модуляция» как «2-я формирующая схема» (ВФС), «демодуляция» как «1-я решающая схема» (ПРС), «первичное декодирование» как «2-я решающая схема» (ВРС) и многие другие, – которые получили системные признаки, например, в работах [1-3], а последние две (ПРС и ВРС) – и важное фундаментальное значение в теории и практике СПИ, СС.

Обобщенный принцип использования ПФС, ВФС, ПРС, ВРС, ПМУК (ПМУД) в структурных схемах дискретных (а впоследствии – цифровых) СПИ демонстрируются на рис. 1. Применение ПФС, ВРС связано с реализацией первой теоремы К. Шеннона по решению задачи повышения информационной эффективности в каналах связи без помех (приближения скорости передачи информации I к пропускной способности C канала связи без помех: $I \rightarrow C$) [1]. Применение ПМУК (ПМУД) связано с реализацией второй теоремы К. Шеннона по решению задачи повышения достоверности передачи информации в каналах связи с помехами [1]. Применение ВФС, ПРС связано с решением задачи передачи информации на расстояния (повышение дальности и, в том числе, за счет повышения помехоустойчивости (помехоустойчивые, в том числе цифровые, методы модуляции)) [1, 2]. Эти положения развернуто, изложены в большом количестве работ в области теории передачи информации, теории помехоустойчивого кодирования, список которых приводить не имеет смысла для специалистов в области теории и практики связи и передачи информации.

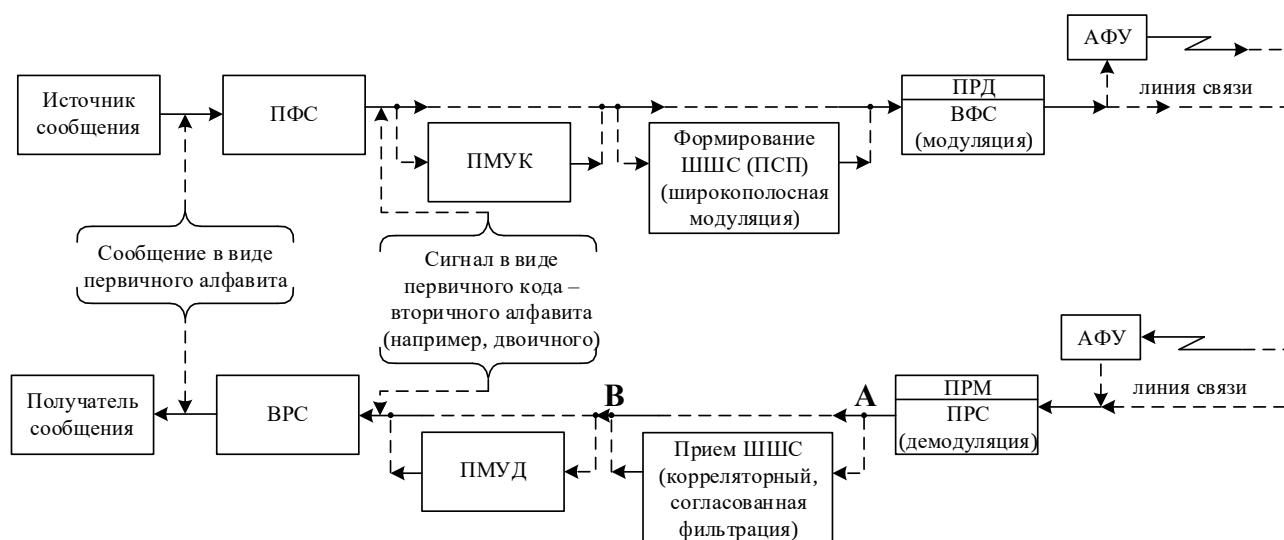


Рис. 1. Обобщенный принцип использования ПФС, ВФС, ПРС, ВРС, ПМУК (ПМУД), ШШС в СПИ

В середине XX века в интересах повышения: эффективности борьбы с замираниями и многолучевостью в дальней (коротковолновой) радиосвязи, в том числе – помехоустойчивости, скрытности, имитостойкости радиосвязи специального назначения – стали широко применяться шумоподобные широкополосные сигналы (ШШС) – или системы сложных сигналов (ССС) – в виде, например, рекуррентных псевдослучайных сигналов (последовательностей) (ПСП), обеспечивающих увеличение базы сигнала ($B = \Delta F \cdot T$)↑ (где ΔF – полоса частот, а T – длительность сигнала) за счет расширения ΔF . Использование

ШШС в СПИ также обобщенно демонстрируется на рис. 1. Применение ПМУК, ШШС в СПИ не является обязательным в целом, а только в тех СПИ, к которым предъявляются повышенные требования по показателям качества, таким как: помехоустойчивость, скрытность (различного типа), имитостойкость и др.

В 80-х годах XX века после принятия международным объединением *ISO* протокола *X.25*, вводящим 7-ми уровневую модель логической структуры открытых СПИ, некоторые из указанных категорий (особенно ПФС, ВФС, ПРС, ВРС) как бы «ушли в тень» [4]. Но с развитием актуального процесса повышения защиты информации, нормативная форма и сущность которого в виде «базовой» модели защиты информации открытых информационных систем сформулирована была в 1999 году в ГОСТ [5], эти категории получили признаки «возрождения». Причиной этому стало широкое применение в интересах защиты информации практически на всех уровнях транспортной системы (первые четыре уровня) 7-ми уровневой модели *ISO* таких ПСП, как – нелинейных рекуррентных последовательностей (НЛРП) (основы, теории которых изложены в [7]) и особенно производных НЛРП (ПНЛРП) (некоторые элементы теории которых изложены в [9, 10]), поскольку НЛРП и особенно ПНЛРП, принципиально отличаются от любых других рекуррентных ПСП (линейных и нелинейных) своими скрытностными, имитостойкими свойствами. Но ПНЛРП, как показали исследования [9-13], обладают еще и особыми – детерминированными – свойствами корреляционных функций (КФ). А, как известно из [2, 6, 8], КФ используются при реализации задач, процедур, методов поиска, обнаружения, приема, синхронизации систем сложных сигналов (ССС), к которым и относятся НЛРП и ПНЛРП.

При этом принципиальным классическим положением использования КФ является то, что КФ – автокорреляционные (АКФ) и взаимокорреляционные (ВКФ) – трактуются в теории ССС как случайные функции времени на том основании, что сами ССС для наблюдателя-получателя трактуются случайными, а для источника – псевдослучайными. Поэтому все указанные методы и процедуры приема ССС основаны на использовании детерминированных оценок (математическом ожидании, дисперсии и т. д.) значений случайных боковых выбросов (СБВ) КФ и основного автокорреляционного пика (ОАКП) АКФ, получаемого при полном совпадении «форм» сложного сигнала, принимаемого и его копии на приемной стороне. В этой связи используемые при приеме ССС различные критерии, методы и процедуры оптимального или неоптимального приема ССС и основываются как раз на этом факторе, а именно: наличие или отсутствие в какой-либо момент времени (поиска, вхождения в синхронизм, приема-обработки) ОАКП, значение которого сравнимо с базой сигнала $VOAKП \ V_{OAKП} \approx B_{ССС}$ [2, 6], при незначительных случайных значениях боковых выбросов (БВ), составляющих для оптимальных ССС $\approx (0,1...0,3)/\sqrt{B_{ССС}}$ АКФ [2, 6]. Такая позиция вполне приемлема и справедлива, если считать, что информация о совпадении «формы» принимаемого сигнала и его копии на приемной стороне заложена только в факте наличия и появления ОАКП.

Справедливость такой позиции основана, в том числе и на том, что в качестве ССС выступали (до определенного времени) в основном простые ССС, имеющие «линейную» структуру, например, *M*-последовательности (и их разновидности), и «нелинейную» структуру – НЛРП – и другие сигналы [2, 7], структура КФ которых с большой долей достоверности признается случайной (псевдослучайной).

С другой стороны, установленная и опубликованная авторами, например, в [9, 10, 11], как раз детерминированность структуры КФ ПНЛРП позволяет:

- 1) трактовать и использовать КФ (АКФ и ВКФ) как информационный сигнал, несущий информацию о структуре, т. е. форме, именно ПНЛРП, а, следовательно, использовать такую детерминированную КФ для принятия решения – об информационном «бите» («1» или «0»);

- 2) использовать свойства детерминированности АКФ – при приеме ПНЛРП – для реализации нового вида «разнесенного» приема – «разнесения по форме» [11] для повышения достоверности приема и принятия решения (по образу и подобию используемых классических видов разнесенного приема: по пространству, частоте, времени, – впервые системно теоретически изложенных в [3]).

Указанные возможности использования детерминированности АКФ ПНЛРП для процесса приема, обработки ПНЛРП (в виде функциональной категории) в теории приема ССС получили название «третья решающая схема» (ТРС), оригинальная теория и практика которой развивается более 20 лет (в том числе авторами данной статьи) в объеме большого числа теоретических трудов, изобретений, практического внедрения в СПИ с ССС, в том числе в приводимом ниже списке литературы [9-17].

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема места и принципа использования ТРС в процессе приема-обработки ПНЛРП, как функционального блока приема ШШС, указанного на рис. 1. Основная сущность ТРС заключается в том, что она или заменяет, или дополняет классический блок приема ПСП (участок т. А-В на рис. 1, 2), образуя или два, или три канала приема-обработки ПСП вместо одного. Тем самым образуется два или три независимых канала приема-обработки ПСП, «разнесенных по форме» обрабатываемых ПСП: форма 1 – структура ПНЛРП, формы 2, 3 – структуры соответственно НЛРП-1, НЛРП-2 (образующих ПНЛРП). Такой новый вид разнесенного приема «по форме» [11], дополняющего классические методы разнесенного приема [3] (в пространстве, по частоте, по времени), также (как и классические методы разнесения) повышает достоверность приема и скорость принятия решения «свой-чужой» сигнал за счет как увеличения итогового отношения «сигнал-помеха» в решающей схеме, так и реализации «разнесения по каналам приема», эффективность которого оценивается по теореме Пуассона [3]. Функционирование ТРС и ее сущность основывается на использовании свойств детерминированности КФ ПНЛРП [11, 12, 13].

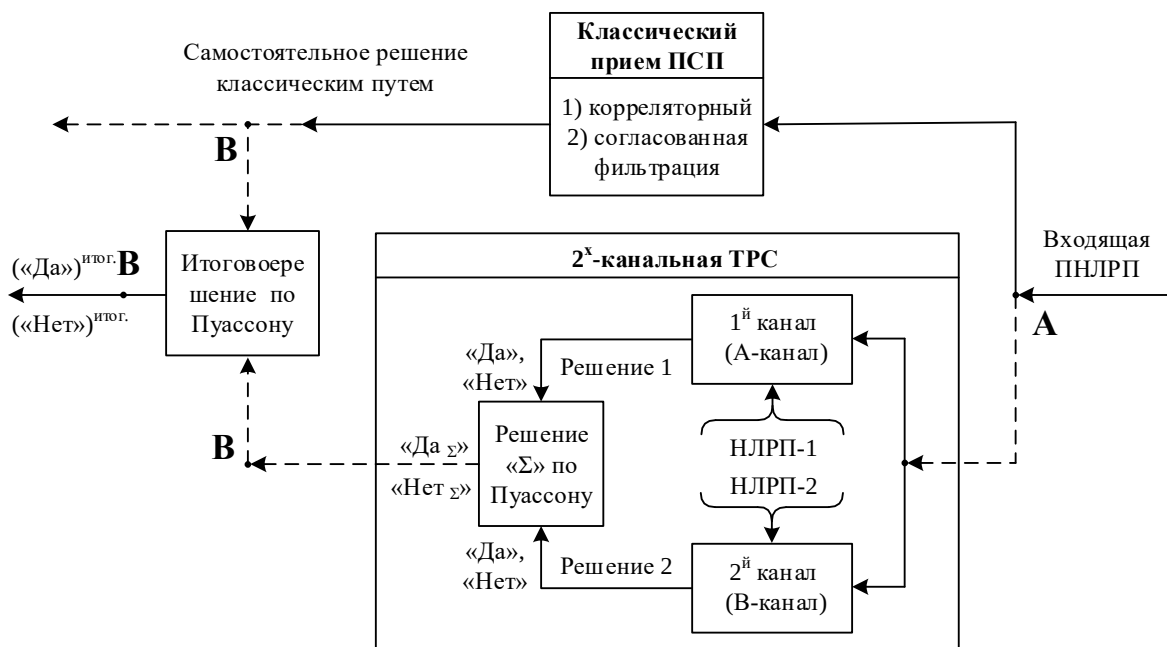


Рис. 2. Обобщенная структурная схема места и состава ТРС

В табл. 1 демонстрируется, а в [11] подробно рассматривается, в рамках 7-уровневой модели логической структуры открытых СПИ, место известных категорий – ПРС и ВРС, и новой категории – ТРС в объеме функций и задач транспортной системы – первых 4-х уровней 7-уровневой модели ISO.

Таблица 1 – Место «известных» и «новых» понятий и категорий в 7-уровневой базовой модели логической структуры пакетных радиосетей (ПРС)

Уровни и форма представления информации	Применение известных категорий информации*	Использование новых категорий (возможно дополнительно)*
Уровень 7. Управление процессами (элементарное сообщение)	Представление информации	Услуги и механизмы защиты информации согласно ГОСТ [5] (3)
Уровень 6. Управление представлениями (сложные сообщения)	Представление информации в виде сложных сообщений (2)	Услуги и механизмы защиты информации согласно ГОСТ [5] (3)
Уровень 5. Управление сеансом (кодовая последовательность символов)	Кодирование, декодирование сообщений (2)	Услуги и механизмы защиты информации согласно ГОСТ [5] (3)
Уровень 4. (Транспортный): Сквозная транспортировка данных между ПРУ; установление и разъединение соединения; обнаружение ошибок доставки и восстановление работы после ошибок. («ИЧ»+ «АЧ» +»СЧ»)	Кодирование «служебной части» (СлЧ), декодирование «СлЧ» (2)	Услуги и механизмы защиты информации согласно ГОСТ [5] (3)
Уровень 3. (Сетевой): Организация логического соединения посредством оформления пакетов, адресация и маршрутизация пакетов. («ИЧ» + «адресация кодовая» + «маршрутизация кодовая»)	Кодирование «адресной части» (АЧ), декодирование «АЧ» (2)	Услуги и механизмы защиты информации согласно ГОСТ [5] (3)
Уровень 2. (Канальный): Пересылка блоков данных; инициация, идентификация сегментирования; тактовая и кадровая синхронизация; контроль и исправление ошибок; управление передачей; доступ к физическому каналу (уровню); обнаружение, предотвращение и разрешение конфликтов. (Последовательность кодовых посылок (2-ичных, n-ичных)) и др. «ИЧ»+ «АЧ» +»СЧ»)	Помехоустойчивое кодирование, синхронизация цикловая, поиск, захват сигнала, корреляционная функция (2)	Разнесенный прием «по форме» (3)
Уровень 1. (Физический): Установление, поддержание, разрыв физического соединения между канальными уровнями; захват передача и приём битового информационного потока по физической среде посредством ШПС. (ЭМВ, ВЧ-колебания, модулированные (АМ, ЧМ, ФМ) ВЧ-колебания.)	Сигнал, модуляция (демодуляция), оптимальный (неоптимальный) прием, синхронизация тактовая, когерентный (некогерентный) прием, поиск, обнаружение, захват и др., корреляционная функция (1)	Разнесенный прием «по форме» для поиска, обнаружения, захвата, тактовой синхронизации, цикловой синхронизации и структурирования пакета (3)

Примечание: * – в скобках дан номер решающей схемы для перехода с предыдущего уровня: ПРС – (1), ВРС – (2), ТРС – (3); ИЧ, АЧ, СЧ – соответственно, информационная, адресная, служебная часть пакета

Детерминированность структуры АКФ ПНЛРП (как показали исследования авторов, например, в [9, 10, 11]) проявляется в следующем:

- 1) боковые выбросы (БВ) АКФ имеют детерминированные значения и детерминированное число этих значений: $BB_i = \det$, $N_{BB_i} = \det$;
- 2) моменты появления конкретных по значению БВ АКФ строго детерминированы на временной оси: $t_{i, BB_i} = \det$;
- 3) значения (уровни) БВ, число их различных значений и моменты их появления на временной оси строго соответствуют структуре ПНЛРП: числу порождающих

ПНЛРП элементов (простых НЛРП), называемым «кратностью», и их длительностям l_i , и видом каждой порождающей НЛРП: НЛРП₁, НЛРП₂.

Поэтому конкретная, т. е. детерминированная структура АКФ ПНЛРП строго соответствует структуре ПНЛРП, т. е. ее конкретной «форме». Следовательно:

- 1) структуру АКФ ПНЛРП как детерминированную функцию времени, $f_{\text{АКФ ПНЛРП}}(t) = \det$, формирующуюся на приемной стороне при реализации известных (классических) процедур приема СС можно и нужно использовать как «информационный сигнал» для повышения качества (эффективности) приема СС в виде создаваемого или «самостоятельного», или «дополнительного» – третьего «канала-схемы» принятия решения «свой-чужой», именуемого как ТРС [11], помимо ПРС и ВРС. При этом ТРС представляет собой «новый» вид – метод разнесенного приема (как путь повышения достоверности приема – принятия решения), а именно – «метод разнесения по форме», где «форма» – это структура ПНЛРП и ее АКФ. В работе [11] дается подробный анализ признаков, сущности и основных категорий, понятий ТРС;
- 2) детерминированность структуры АКФ ПНЛРП имеет (естественно) свойства и закономерности, которые можно и нужно использовать для реализации и повышения эффективности самой ТРС на всех этапах приема ПНЛРП как ССС: поиска, обнаружения, захвата, синхронизации, достоверного принятия «итогового» решения «свой-чужой»;
- 3) так как структура АКФ ПНЛРП (как было указано выше) определяется «кратностью», длительностями l_i составляющих (порождающих) элементов (простых НЛРП) и их видами (согласно [7]), то естественно свойства и закономерности детерминированной АКФ ПНЛРП необходимо исследовать именно с позиций этих признаков-факторов: «кратности», различия l_i и видов порождающих ПНЛРП сигналов – НЛРП, что и определяет виды, типы, группы ПНЛРП в том числе [12].

В работе [12] приводятся, анализируются, классифицируются виды, типы, группы *двукратных* (ДК) ПНЛРП, порождаемых двумя НЛРП: НЛРП₁ с l_1 и НЛРП₂ с l_2 , (в качестве которых выступают, согласно [7], – коды квадратичных вычетов, характеристические коды и др., существующие в полях Галуа – простых и расширенных – $GF(p)$, $GP(p^n)$, p – простое число). Там же [11, 12] в том числе указывается, что реализация ТРС для приема ДК ПНЛРП основывается на использовании – как сигнала – не классической АКФ (как это делается при классических ПРС и ВРС), а – частных АКФ (ЧАКФ), что позволяет рассматривать алгоритмическую 2-х канальную схему реализации ТРС в виде на рис. 3 (работа [11], рис. 6), где КР – коррелятор, СФ – согласованный фильтр, h_0^2 – отношение «сигнал-помеха» (с/п) на входе ТРС, $B_{k1}^* = l_2^3 / [(3...2)НОД_{l_1, l_2}]$, $B_{k2}^* = l_1^3 / [(3...2)НОД_{l_1, l_2}]$ – «базы» приема в каналах k_1 , k_2 разнесения, $B_{\text{рез}}^* = B_{k1}^* + B_{k2}^*$; $h_{k_1, i}^2$, $h_{k_2, j}^2$ – отношение с/п в ветвях i, j , НОД – наибольший общий делитель (l_1 , l_2).

Если для классического приема ШШС выигрыш в отношении «с/п» на выходе блока приема ШШС составляет $\approx B_{\text{ПСП}}$, в нашем случае $\approx B_{\text{ПСП}} = B_{\text{ПНЛРП}} = (l_1 \cdot l_2) / \text{НОД}_{l_1, l_2}$, то ТРС позволяет увеличить отношение «с/п» на выходе блока приема ШШС в $[B_{\text{рез}}^* / B]_{\text{рез}}$, т. е. в $B_{\text{рез}}^* = \left\{ l_2^3 / [(3...2)НОД_{l_1, l_2}] + l_1^3 / [(3...2)НОД_{l_1, l_2}] \right\} / (l_1 \cdot l_2) \text{НОД}_{l_1, l_2} = \dots = (l_1 + l_2) / (3...2)$ раз. И этот выигрыш, как видно, значительно растет с ростом длительностей l_1 , l_2 , составляя в целом неравенство $[B_{\text{рез}}^* / B]_{\text{рез}} \gg B$.

ЧАКФ – есть АКФ, формируемая при корреляционной процедуре приема ПНЛРП по отношению копии не всей ПНЛРП, а – ее порождающего элемента – НЛРП₁ (ЧАКФ₁)

и НЛРП₂ (ЧАКФ₁). Отсюда и появляются два канала приема ПНЛРП в рамках ТРС: 1-й канал приема – по копии НЛРП₁ и 2-й канал приема – по копии НЛРП₂ (см. [11, 12]).

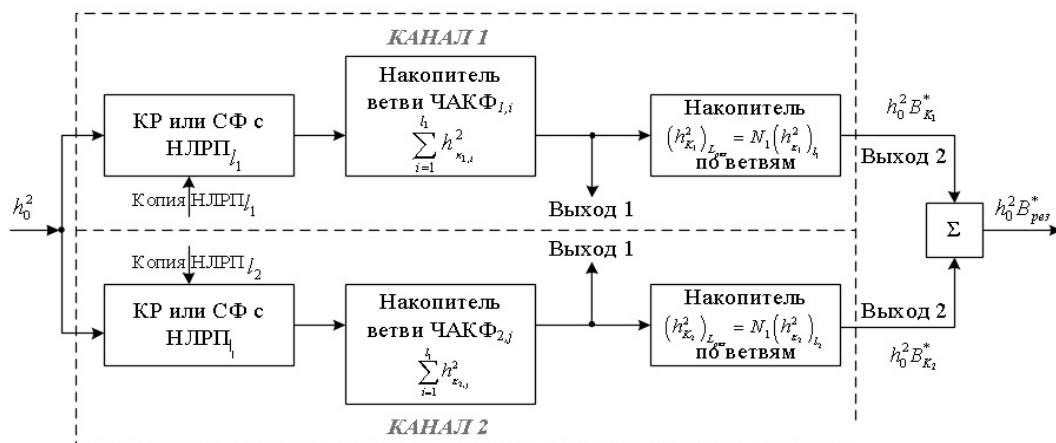


Рис. 3. Алгоритмическая схема реализации двухканальной ТРС

В этой связи исследование свойств и закономерностей детерминированности АКФ ДК ПНЛРП означает проведение этих исследований по отношению к частным АКФ (ЧАКФ₁, ЧАКФ₂). В работе [12] представлены в обобщенном виде и процесс формирования ДК ПНЛРП, и процесс приема ДК ПНЛРП по двум каналам (*A* и *B*) с формированием ЧАКФ₁, ЧАКФ₂ в режиме установления синхронизации и приема ПНЛРП с демонстрацией сущности и признаков таких понятий (категорий) – как исследуемых параметров – ЧАКФ: *последовательности чисел совпадения* (ПЧС) – $\text{ПЧС}_A = \{a_{b_i}\}$, $i = \overline{1, L_A}$, $\text{ПЧС}_B = \{b_j\}$, $j = \overline{1, L_B}$; *периоды повторения* T_A , T_B *последовательностей ПЧС* ПЧС_A , ПЧС_B ; *канальные тактовые ПЧС* (КТ ПЧС_A, КТ ПЧС_B) – $\{a_{\tau_i}\}$, $\{b_{\tau_j}\}$, $i = \overline{1, L_A}$, $j = \overline{1, L_B}$; «*числа-позиции*» a_{τ_i} , b_{τ_j} в составе $\{a_{b_i}\}$, $\{b_{a_j}\}$; *номера* k_a , k_b *повторения «чисел-позиций»* a_{τ_i} , b_{τ_j} на периодах порождающих линейек (ПЛ) – ПЛ₁ и ПЛ₂ в каналах *A* и *B* приема ТРС. Сущность и признаки указанных параметров-категорий подробно анализируются в [12]. Как эти параметры используются и как важно знать свойства и закономерности этих параметров для различных видов, типов, групп ДК ПНЛРП для реализации ТРС в интересах повышения эффективности поиска и синхронизации сложных сигналов рассматривается в работе [13]. А в работе [14] конкретно рассматриваются, как используются свойства и закономерности этих параметров в объеме и рамках технико-алгоритмических предложений по реализации ТРС на основе схем оценки: синдромов идентификации ДК ПНЛРП «вложенного» типа; значений $\{a_{\tau_i}\}$, $\{b_{\tau_j}\}$ и их группирования; ПЧС_A, ПЧС_B, КТ ПЧС_A, КТ ПЧС_B, – что стало возможным осуществлять на основе результатов работы [15]. Аналогично результатам работы [15] излагаются подобные результаты исследований в отношении ДК ПНЛРП «невложенного» типа в работе [16].

2. Сущность поставленной решаемой задачи

В работе [12] рассматриваются общие основы моделирования и установления обобщенных свойств детерминированности ЧАКФ ДК ПНЛРП различных видов и типов в интересах реализации основных процедур ТРС, элементы теории которой излагаются в работах [11, 17], а конкретные процессы её реализации – в работах [13, 14]. В работе [12] с использованием разрабатываемой классификации ДК ПНЛРП, с точки зрения свойств детерминированности их дискретных ЧАКФ (ДЧАКФ), устанавливаются классификационные признаки различных ДК ПНЛРП, и разрабатывается общая модель

исследования ДЧАКФ ДК ПНЛРП в режиме установления синхронизации с введением соответствующих понятий: последовательность чисел совпадения (ПЧС), период повторений ПЧС, канальная тактовая ПЧС (КТПЧС) и др., – и формулируются обобщенные утверждения, устанавливающие системные свойства ДЧАКФ.

С использованием положений работ [11, 12, 17] в работах [15, 16] рассматриваются конкретные результаты машинного моделирования и установления свойств детерминированности ЧАКФ ДК ПНЛРП «невложенного» и «вложенного» типов, формулируются выводы и рекомендации по использованию данных свойств для организации эффективных процедур поиска, захвата и синхронизации ДК ПНЛРП данных типов. Эти процедуры, как технико-алгоритмические предложения, рассмотрены, например, в работе [14].

Данная статья, во-первых, является дальнейшим логическим и системным развитием положений работ [10-13, 17], а во-вторых, основывается на положениях и методиках, используемых в данных работах, для моделирования и установления свойств детерминированности ДЧАКФ ДК ПНЛРП с четными значениями длительностей l_1, l_2 , $L = l_1 \cdot l_2 / \text{НОД}$, но уже в отношении ДК ПНЛРП «комбинированного» типа нечетной длительности L и вида $L = l_1 \cdot l_2$, $\{l_1, l_2\} = \{4t, (4t+1) \vee (4t+3)\}$, $t = 2, 3, \dots$, $\{l_1, l_2\}$ – длительности порождающих элементов (простых НЛРП₁, НЛРП₂), где l_1 и l_2 являются соответственно четными и нечетными числами.

Ниже рассматриваются, исследуются, систематизируются и математически формализуются в виде «утверждений», «следствий» свойства и закономерности ЧАКФ указанных ДК ПНЛРП «комбинированного» типа указанного вида длительности L , как результаты моделирования на основе методики и общей модели, положенной в основу машинного алгоритма, которую схематически можно представить в виде графической модели на рис. 4, где АЭК – акустоэлектронный конвольвер (реализующий функцию сумматора по модулю 2 на уровне электромагнитной волны (ЭМВ) во встречно-инверсном режиме корреляционного процесса), $\oplus$ – суммирование по модулю 2. Выходящие из АЭК₁, АЭК₂, ЧАКФ₁, ЧАКФ₂ соответственно представляются в виде числовых последовательностей a_i, b_j , $a_i = \overline{1, l_1}$, $b_j = \overline{1, l_2}$ – последовательности чисел совпадения (ПЧС) уровней ЭМВ «входящей» ПНЛРП и опорных НЛРП₁, НЛРП₂ в каждый такт (на длительности τ элемента НЛРП), что и делает ЧАКФ дискретными.

Пример формирования a_i, b_j представлен на рис. 5, который демонстрирует, как фиксируется, например, такая закономерность a_i ЧАКФ₁, как ее циклическая «структура экстраполяции» (СЭ₁) ЧАКФ₁. Машинный алгоритм, реализующий анализ, установление свойств и закономерностей ПЧС a_i, b_j как ЧАКФ₁, ЧАКФ₂, мы приводить не будем, так как этот вопрос является чисто инженерной задачей, не представляющей научного интереса.

В табл. 1 и 2 работы [12] приводится разработанная классификация типов, видов, групп ДК ПНЛРП (на основе используемых для их формирования составляющих элементов – простых НЛРП), согласно которой к «комбинированному» типу вида внутренней структуры (ВС) относят ДК ПНЛРП те из них, порождающие элементы которых НЛРП-1 и НЛРП-2 имеют длительности:

$$\begin{aligned} \{l_1 \text{ и } l_2\} &= \{4t \text{ и } (4t+3) \vee (4t+1)\} = \\ &= \{4t = (p^n - 1) \vee (p-1) \text{ и } (4t+1) \vee (4t+3) = p\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где: p – простое число, $n = 2, 3, \dots$, $t = 1, 2, 3, 4, \dots$ – такие, которые порождают ДК ПНЛРП длительности $L = l_1 \cdot l_2$. При этом (согласно [12]) и вышеприведенной формулы (1): ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС 1-й группы означает, что $l_1 = 4t = p^n - 1$, а 2-й группы $l_1 = 4t = p - 1$.

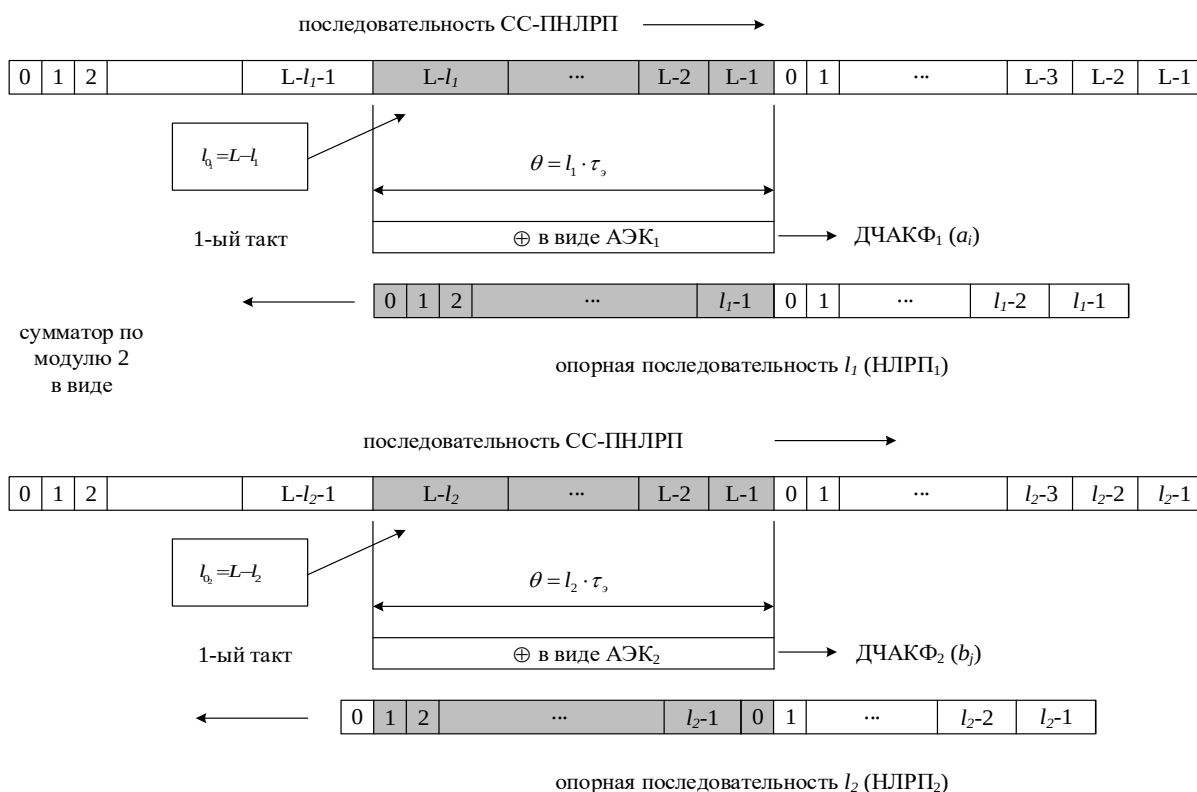


Рис. 4. Графическое представление процесса корреляционного анализа

Таблица 2 – Результаты моделирования кодовых форм

$l_1=l_a=8$	i	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1
		1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
$l_2=l_b=11$	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8
		1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0
$L=88$	m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
	C_m	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$l_1=l_a=8$	i	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	
		1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
$l_2=l_b=11$	j	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5
		1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
$L=88$	m	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
	C_m	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
$l_1=l_a=8$	i	3	4	5	6	7	8	1	2	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		0	1	1	0	0	0	1	1	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
$l_2=l_b=11$	j	6	7	8	9	10	11	1	2	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		0	0	0	1	0	1	1	0	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
$L=88$	m	83	84	85	86	87	88	1	2	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
	C_m	0	1	1	1	0	1	0	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	

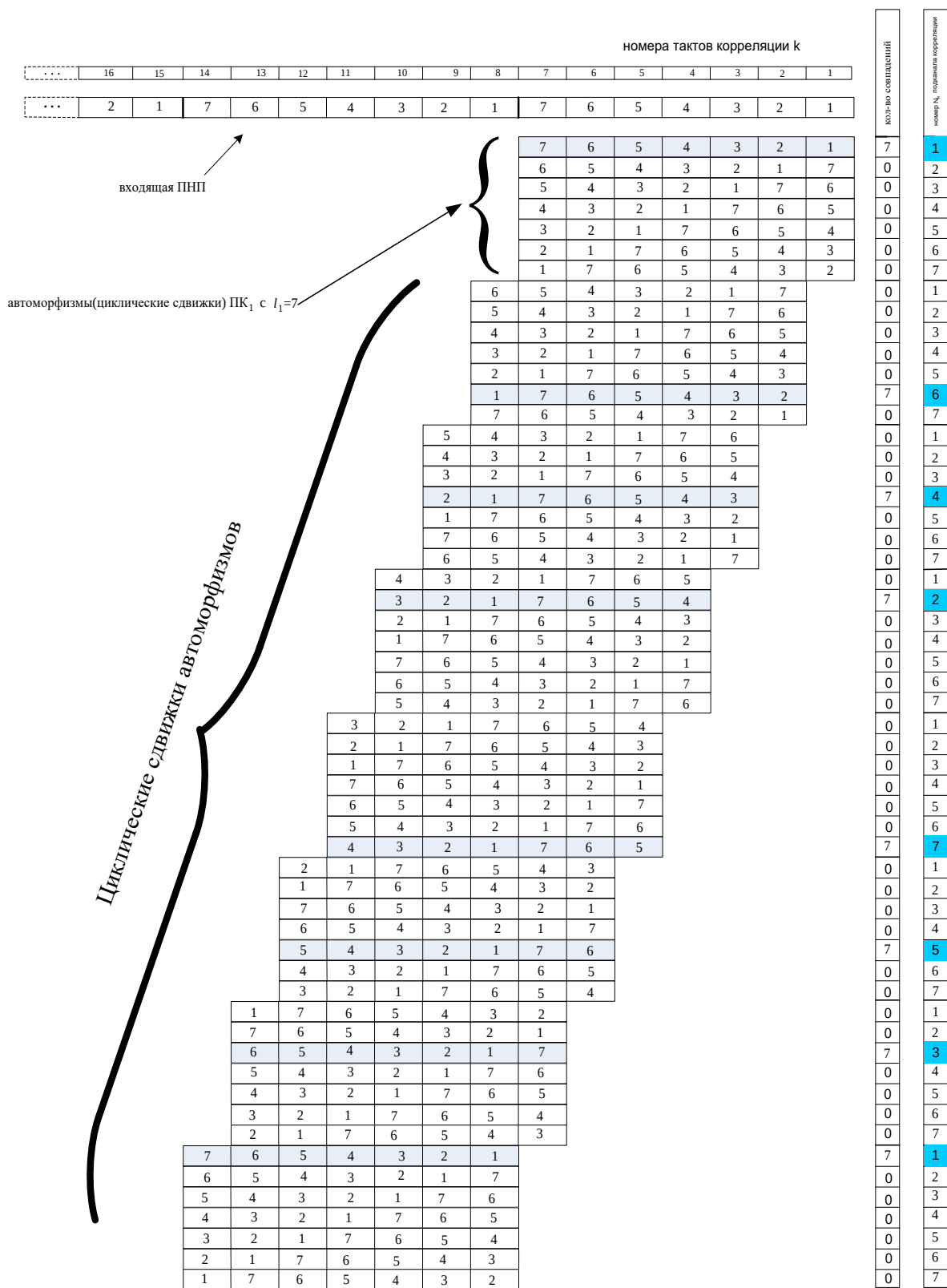
$$l_1=l_a=8 \quad l_2=l_b=11 \quad L=88$$

Например, к таким ДК ПНЛРП относятся ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС 1-й и 2-й групп (см. работу [12]) с длительностями L_1, L_2, l_1, l_2 , соответственно:

$$L_1 = 88, \{l_1 = 8 = 4t = 3^2 - 1, p_1 = 3 \text{ и } l_2 = p_2 = 11\}; \quad (2)$$

$$L_2 = 176, \{l_1 = 14 = 4t = 17 - 1, p_3 = 17 \text{ и } l_2 = p_4 = 11\}.$$

Далее на примерах этих длительностей L_1, L_2 и рассматриваются сущностные результаты данной статьи. В табл. 2 и 3 ниже представлен процесс формирования ЧАКФ₁, ЧАКФ₂ в виде ПЧС a_i, b_j , по данным которой можно проследить и удостовериться в приводимых ниже установленных свойствах и закономерностях a_i, b_j как ЧАКФ₁, ЧАКФ₂ для указанных в (2) L_1 и L_2 .



Закономерность СЭ₁: 1 6 4 2 7 5 3

Рис. 5. Пример формирования a_i, b_j

Таблица 3 – Результаты моделирования кодовых форм

$l_1=l_a=11$	i	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8												
	a_i	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0												
$l_2=l_b=16$	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9							
	b_j	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1								
$L=176$	m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
	C_m	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1			
$l_1=l_a=11$	i	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5		
	a_i	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1			
$l_2=l_b=16$	j	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2		
	b_j	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1				
$L=176$	m	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82		
	C_m	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0			
$l_1=l_a=11$	i	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2		
	a_i	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0			
$l_2=l_b=16$	j	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	b_j	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1			
$L=176$	m	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123		
	C_m	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1				
$l_1=l_a=11$	i	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	a_i	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0			
$l_2=l_b=16$	j	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4		
	b_j	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0			
$L=176$	m	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164		
	C_m	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0			
$l_1=l_a=11$	i	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	a_i	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$l_2=l_b=16$	j	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	b_j	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
$L=176$	m	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	C_m	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Установление данных свойств будем осуществлять на основе структурной модели анализа детерминированности ЧАКФ и в целом положений, изложенных в работах [11, 12], а также – результатов работ [15, 16] на примерах, приводимых ниже в табл. 2 и 3 кодовых форм простых НЛРП, порождающих ДК ПНЛРП вида ВС 1-й и 2-й групп, полученных в соответствии с работами [11, 12] по аналогии с работами [15, 16]:

2) для 2-й группы: $L_2 = 176 = l_1 \cdot l_2 = 16 \cdot 11$; $l_1 = 16 = 4 \cdot t_3 = p_3 - 1 = 17 - 1$, $p_3 = 17$, $t_3 = 4$;
 $l_2 = 11 = p_4 = p_2 = 4t_4 + 3$, $t_4 = 2$.

В дальнейшем для удобства обозначим НЛРП чётной длительности $(4t)$ как $l_a = l_1$, а нечётной длительности $(4t+3)$ как $l_b = l_2$, а соответствующие каналы синхронизации: по $l_a = l_1$ как *A*-синхронизация, а по $l_b = l_2$ как *B*-синхронизация.

Утверждение 1. В кодовой структуре ДК ПНЛРП вида ВС 1-й группы C_m с $L_1 = 88$ имеется баланс числа символов «0» и «1», т. е. ДБ = 0.

Утверждение 3. Канальная тактовая последовательность чисел совпадения (КТПЧС) для A -синхронизации $\{a_{\tau_i}\}$ для фиксированных i , т. е. $\{a_{\tau_i = const}\}$, имеет длину $T_{a_{\tau_i = const}} = 11$, а для B -синхронизации — $T_{b_{\tau_i = const}} = 8$.

Утверждение 4. Все КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$, $i = \overline{1, 11}$, имеют одинаковую тонкую внутреннюю структуру (ТВС) – состав чисел совпадения и их взаимное расположение – с циклическим сдвигом влево (знак «-»), равным (-7) и (-4): $a_{\tau_{i+1}} = a_{\tau_i}^{(-7)}$ и $a_{\tau_{i-1}} = a_{\tau_i}^{(-4)}$, $(-7) + (-4) = |-11| = 11 = l_b$. Действительно:

$$a_{\tau_1} = \overbrace{4254334}^{(-7)} \overbrace{4344}^{(-4)}, \quad a_{\tau_2} = \overbrace{4344}^{(-7)} \overbrace{425}^{(-4)} 4334, \quad a_{\tau_3} = \overbrace{4334}^{(-7)} \overbrace{434}^{(-4)} 4425,$$

$$\begin{array}{l}
 a_{\tau_4} = \overbrace{4425}^{(-7)} \overbrace{433}^{(-4)} 4434, \quad a_{\tau_5} = \overbrace{4434}^{(-7)} \overbrace{442}^{(-4)} 5433, \quad a_{\tau_6} = \overbrace{5433}^{(-7)} \overbrace{443}^{(-4)} 4442, \\
 \downarrow a_{\tau_3} \downarrow a_{\tau_5} \quad \downarrow a_{\tau_4} \downarrow a_{\tau_6} \quad \downarrow a_{\tau_5} \downarrow a_{\tau_7} \\
 a_{\tau_7} = \overbrace{4442}^{(-7)} \overbrace{543}^{(-4)} 3443, \quad a_{\tau_8} = \overbrace{3443}^{(-7)} \overbrace{444}^{(-4)} 2543, \quad a_{\tau_9} = \overbrace{2543}^{(-7)} \overbrace{344}^{(-4)} 3444, \\
 \downarrow a_{\tau_6} \downarrow a_{\tau_8} \quad \downarrow a_{\tau_7} \downarrow a_{\tau_9} \quad \downarrow a_{\tau_8} \downarrow a_{\tau_{10}} \\
 a_{\tau_{10}} = \overbrace{3444}^{(-7)} \overbrace{254}^{(-4)} 3344, \quad a_{\tau_{11}} = \overbrace{3344}^{(-7)} \overbrace{344}^{(-4)} 4254. \\
 \downarrow a_{\tau_9} \downarrow a_{\tau_{11}} \quad \downarrow a_{\tau_{10}} \downarrow a_{\tau_1}
 \end{array}$$

Следствие. Таким образом, зная КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$ при фиксированном значении такта i , всегда можно установить, каким будет КТПЧС $\{a_{\tau_{i^*}}\}$ при любом $i^* \neq i \pmod{p_2 = 11 = l_b}$.

Утверждение 5. Все КТПЧС $\{b_{\tau_j}\}$, $j = \overline{1,8}$ имеют одинаковую ТВС с циклическим сдвигом влево (знак «-»), равным (-3) и (-5): $b_{\tau_{j+1}} = b_{\tau_j}^{(-3)}$ и $b_{\tau_{j-1}} = b_{\tau_j}^{(-5)}$, $(-3) + (-5) = |-8| = 8 = l_a$. Действительно:

$$\begin{array}{l}
 b_{\tau_1} = \overbrace{556}^{(-5)} \overbrace{56557}^{(-3)}, \quad b_{\tau_2} = \overbrace{565}^{(-5)} \overbrace{57556}^{(-3)}, \quad b_{\tau_3} = \overbrace{575}^{(-5)} \overbrace{56565}^{(-3)}, \quad b_{\tau_4} = \overbrace{565}^{(-5)} \overbrace{65575}^{(-3)}, \\
 \downarrow b_{\tau_2} \downarrow b_{\tau_8} \quad \downarrow b_{\tau_3} \downarrow b_{\tau_1} \quad \downarrow b_{\tau_4} \downarrow b_{\tau_2} \quad \downarrow b_{\tau_5} \downarrow b_{\tau_3} \\
 b_{\tau_5} = \overbrace{655}^{(-5)} \overbrace{75565}^{(-3)}, \quad b_{\tau_6} = \overbrace{755}^{(-5)} \overbrace{65655}^{(-3)}, \quad b_{\tau_7} = \overbrace{656}^{(-5)} \overbrace{55755}^{(-3)}, \quad b_{\tau_8} = \overbrace{557}^{(-5)} \overbrace{55656}^{(-3)}. \\
 \downarrow b_{\tau_6} \downarrow b_{\tau_4} \quad \downarrow b_{\tau_7} \downarrow b_{\tau_5} \quad \downarrow b_{\tau_8} \downarrow b_{\tau_6} \quad \downarrow b_{\tau_1} \downarrow b_{\tau_7}
 \end{array}$$

Следствие. Таким образом, зная КТПЧС $\{b_{\tau_j}\}$ при фиксированном значении такта j , всегда можно установить, каким будет КТПЧС $\{b_{\tau_{j^*}}\}$ при любом $j^* \neq j \pmod{8 = l_a}$.

Утверждение 6. ПЧС $_{a_b}$, $\{a_b\}$, имеет последовательный состав чисел длиной $l_b = 11$, $\{a_b\} = \{44444543233\}$, а ПЧС $_{b_a}$, $\{b_a\}$ имеет последовательный состав чисел длиной $l_a = 8$, $\{b_a\} = \{55556765\}$, причем: $(a_b)_{\min} \approx 2,3\% \cdot L$, $(a_b)_{\max} \approx 5,7\% \cdot L$, $(b_a)_{\min} \approx 5,7\% \cdot L$, $(b_a)_{\max} \approx 8\% \cdot L$.

Следствие: как видно и сами значения (a_b) , (b_a) весьма незначительны (от 2 % L до 8 % L), и разброс этих значений от «max» до «min» тоже незначителен – около 3 %. Это свидетельствует о высоком уровне помехоустойчивости таких ДК ПНЛРП «комбинированного» типа.

Утверждение 7. Поиск (нахождение) «числа-номера» такта « m » в последовательности C_m и соответствующих им тактов i (циклически повторяющихся), при которых повторяется число совпадений в последовательности $\{a_b\}, m_c^{(a)}$, и соответствующих им тактов j (циклически повторяющихся) в последовательности $\{b_a\}, m_c^{(b)}$, при которых повторяется число совпадений в последовательности $\{b_a\}$, осуществляется по формулам:

- для $\{a_b\}$: $m_c^{(a)} = [i_1 + (k_a - 1) \cdot l_b] = k_a \cdot (\text{mod}(l_a))$,
- для $\{b_a\}$: $m_c^{(b)} = [j_1 + (k_b - 1) \cdot l_a] = k_b \cdot (\text{mod}(l_b))$,

где $\{k_b, k_b\}$ – «номера-числа» периодов последовательности тактов при корреляционном анализе соответственно в каналах A и B (см. определение 12 в работе [12]), индекс «1» при i и j означает значение тактов i, j в первом цикле.

Утверждение 8. Поиск чисел совпадений в $ПЧC_a - \{a_b\}$ и в $ПЧC_b - \{b_a\}$ осуществляется по правилам соответственно:

- для $ПЧC_a$ эти числа равны числу символов «0» – M_{0^*} – на длине l_b участка сегментов последовательности $\{b_j\}$ в соответствующие такты i сдвигов последовательности C_m и $\{a_b\}$:

$$ЧC_{m,a_b} = M_{0^*,l_b} [b_j, i, C_m], \quad m = \overline{1, L}, \quad i \equiv m(\text{mod}(l_a)),$$

- для $ПЧC_b$ эти числа равны числу символов «0» (M_{0^*}) на длине l_a участка сегментов последовательности $\{a_i\}$ в соответствующие такты j сдвигов последовательности C_m и $\{b_a\}$:

$$ЧC_{m,b_a} = M_{0^*,l_a} [a_i, j, C_m], \quad m = \overline{1, L}, \quad j \equiv m(\text{mod}(l_b)).$$

3.2. Для ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС 2-й группы (см. работу [1]) с $L = l_1 \cdot l_2$, $l_1 = l_a = p_1 - 1 = 4t_1$, $l_2 = l_b = p_2 = 4t_2 + 3$, на примере $L_2 = 176 = l_1 \cdot l_2 = 16 \cdot 11$ с $l_1 = p_1 - 1 = 17 - 1 = 16 = 4t_1$, $t_1 = 4$; и $l_2 = p_2 = 11 = 4t_2 + 3$, $t_2 = 2$, характерны следующие свойства (см. табл. 3).

Утверждение 9. В кодовой структуре ДК ПНЛРП C_m с $L_2 = 176$ имеется баланс числа символов «0» и «1», т. е. ДБ = 0.

Утверждение 10. В канале синхронизации по ПЛ₁ (А-синхронизация) $ПЧC_{a_b}$ имеет период-длительность, равную $T_{a_b} = l_b = l_2 = 11$, а в канале синхронизации по ПЛ₂ (В-синхронизация) – $ПЧC_{b_a}$ имеет $T_{b_a} = l_a = l_1 = 16$.

Утверждение 11. Канальная тактовая последовательность чисел совпадения (КТПЧС) для А-синхронизации $\{a_{\tau_i}\}$ для фиксированных i , т. е. $\{a_{\tau_i = \text{const}}\}$, имеет длину $T_{a_{\tau_i = \text{const}}} = 11$, а для В-синхронизации – $T_{b_{\tau_j = \text{const}}} = 16$.

Утверждение 12. Все КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$, $i = \overline{1, 11}$, имеют одинаковую тонкую внутреннюю структуру (ТВС) (см. выше утверждение 4) с циклическим сдвигом влево (знак «-»), равным (-9) и (-2): $a_{\tau_{i+1}} = a_{\tau_i}^{(-9)}$ и $a_{\tau_{i-1}} = a_{\tau_i}^{(-2)}$, $(-9) + (-2) = |-11| = 11 = l_b$. Действительно:

$$\begin{array}{ccc} a_{\tau_1} = \overbrace{69\,6878777\,78}^{(-9)}, & a_{\tau_2} = \overbrace{78\,6968787\,77}^{(-9)}, & a_{\tau_3} = \overbrace{77\,7869687\,87}^{(-9)}, \\ \downarrow \scriptstyle (-2) & \downarrow \scriptstyle (-2) & \downarrow \scriptstyle (-2) \\ & a_{\tau_1} & a_{\tau_3} \\ & \downarrow & \downarrow \\ & a_{\tau_{11}} & a_{\tau_2} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} a_{\tau_4} = \overbrace{87\,7778696\,87}^{(-9)}, & a_{\tau_5} = \overbrace{87\,8777869\,6}^{(-9)}, & a_{\tau_6} = \overbrace{96\,8787777\,86}^{(-9)}, \\ \downarrow \scriptstyle (-2) & \downarrow \scriptstyle (-2) & \downarrow \scriptstyle (-2) \\ & a_{\tau_4} & a_{\tau_6} \\ & \downarrow & \downarrow \\ & a_{\tau_3} & a_{\tau_5} \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 a_{\tau_7} &= \overbrace{86968787777}^{(-9)}, & a_{\tau_8} &= \overbrace{77869687877}^{(-9)}, & a_{\tau_9} &= \overbrace{77778696878}^{(-9)}, \\
 &\downarrow (-2) & \downarrow (-2) & \downarrow (-2) & \downarrow (-2) & \downarrow (-2) \\
 &a_{\tau_6} & a_{\tau_8} & a_{\tau_7} & a_{\tau_9} & a_{\tau_{10}} \\
 \\
 a_{\tau_{10}} &= \overbrace{78777786968}^{(-9)}, & a_{\tau_{11}} &= \overbrace{68787777869}^{(-9)}. \\
 &\downarrow (-2) & \downarrow (-2) & \downarrow (-2) & \downarrow (-2) \\
 &a_{\tau_9} & a_{\tau_{11}} & a_{\tau_{10}} & a_{\tau_1}
 \end{aligned}$$

Следствие. Таким образом, зная КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$ при фиксированном значении такта i , всегда можно установить, каким будет КТПЧС $\{a_{\tau_{i^*}}\}$ при любом $i^* \neq i \pmod{p_2=11=l_b}$.

Утверждение 13. Все КТПЧС $\{b_{\tau_j}\}$, $j=\overline{1,16}$ имеют одинаковую ТВС с циклическим сдвигом влево (знак «-»), равным (-3) и (-13) : $b_{\tau_{j+1}} = b_{\tau_j}^{(-3)}$ и $b_{\tau_{j-1}} = b_{\tau_j}^{(-13)}$, $(-3) + (-13) = |-16| = 16 = l_a$. Действительно:

$$\begin{aligned}
 b_{\tau_1} &= \overbrace{5745746655755}^{(-13)}665, & b_{\tau_2} &= \overbrace{5746655755665}^{(-13)}574, & b_{\tau_3} &= \overbrace{6655755665574}^{(-13)}574, \\
 &\downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 &b_{\tau_2} & b_{\tau_{16}} & b_{\tau_3} & b_{\tau_1} & b_{\tau_4} & b_{\tau_2} \\
 \\
 b_{\tau_4} &= \overbrace{5755665574574}^{(-13)}665, & b_{\tau_5} &= \overbrace{5665574574665}^{(-13)}575, & b_{\tau_6} &= \overbrace{5574574665575}^{(-13)}566, \\
 &\downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 &b_{\tau_5} & b_{\tau_3} & b_{\tau_6} & b_{\tau_4} & b_{\tau_7} & b_{\tau_5} \\
 \\
 b_{\tau_7} &= \overbrace{4574665575566}^{(-13)}557, & b_{\tau_8} &= \overbrace{4665575566557}^{(-13)}457, & b_{\tau_9} &= \overbrace{5575566557457}^{(-13)}466, \\
 &\downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 &b_{\tau_8} & b_{\tau_6} & b_{\tau_9} & b_{\tau_7} & b_{\tau_{10}} & b_{\tau_8} \\
 \\
 b_{\tau_{10}} &= \overbrace{5566557457466}^{(-13)}557, & b_{\tau_{11}} &= \overbrace{6557457466557}^{(-13)}556, & b_{\tau_{12}} &= \overbrace{7457466557556}^{(-13)}655, \\
 &\downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 &b_{\tau_{11}} & b_{\tau_9} & b_{\tau_{12}} & b_{\tau_{10}} & b_{\tau_{13}} & b_{\tau_{11}} \\
 \\
 b_{\tau_{13}} &= \overbrace{7466557556655}^{(-13)}745, & b_{\tau_{14}} &= \overbrace{6557556655745}^{(-13)}746, & b_{\tau_{15}} &= \overbrace{7556655745746}^{(-13)}655, \\
 &\downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 &b_{\tau_{14}} & b_{\tau_{12}} & b_{\tau_{15}} & b_{\tau_{13}} & b_{\tau_{16}} & b_{\tau_{14}} \\
 \\
 & & b_{\tau_{16}} &= \overbrace{6655745746655}^{(-13)}755. \\
 & & \downarrow (-3) & \downarrow (-3) \\
 & & b_{\tau_1} & b_{\tau_{15}}
 \end{aligned}$$

Следствие. Таким образом, зная КТПЧС $\{b_{\tau_j}\}$ при фиксированном значении такта j , всегда можно установить, каким будет КТПЧС $\{b_{\tau_{j^*}}\}$ при любом $j^* \neq j \pmod{16=l_a}$.

Утверждение 14. $ПЧС_{a_b}$, $\{a_b\}$, имеет последовательный состав чисел длиной $l_b = 11$, $\{a_b\} = \{67788987776\}$, а $ПЧС_{b_a}$, $\{b_a\}$ имеет последовательный состав чисел длиной $l_a = 16$, $\{b_a\} = \{5565554455677676\}$, причем: $(a_b)_{\min} \approx 3,4\% \cdot L$, $(a_b)_{\max} \approx 5\% \cdot L$, $(b_a)_{\min} \approx 2\% \cdot L$, $(b_a)_{\max} \approx 4\% \cdot L$.

Следствие: как видно и сами значения (a_b) , (b_a) весьма незначительны (от 2 % L до 8 % L), и разброс этих значений от «max» до «min» тоже незначителен – около 2 % L . Это свидетельствует о высоком уровне помехоустойчивости таких ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС 2-й группы, сравнимого с таким уровнем для ДК ПНЛРП 1-й группы (см. следствие утверждения 6).

Утверждение 15. Данное утверждение для ДК ПНЛРП 2-й группы идентично утверждению 7.

Утверждение 16. Данное утверждение для ДК ПНЛРП 2-й группы идентично утверждению 8.

4. Обобщающие выводы

Теперь сформулируем и проанализируем обобщающие выводы, касающиеся установленных выше свойств и закономерностей. Важнейшие данные, касающиеся этих выводов, сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Важнейшие данные обобщающих выводов

ДК ПНЛРП «комбинированного» типа		Состав ПНЛРП	ДБ	$(a_b)_{\max}$	$(a_b)_{\min}$	$(b_a)_{\max}$	$(b_a)_{\min}$
вид ВС	1-й группа $(l_a, l_b) = (4t_1, 4t_2 + 3)$	$l_a = p_1^n - 1$, $l_b = p_2$	0	$\approx 5,7\% \cdot L$	$\approx 2,3\% \cdot L$	$\approx 8\% \cdot L$	$\approx 5,7\% \cdot L$
	2-й группа $(l_a, l_b) = (4t_1, 4t_2 + 3)$	$l_a = p_1 - 1$, $l_b = p_2$	0	$\approx 5\% \cdot L$	$\approx 3,4\% \cdot L$	$\approx 4\% \cdot L$	$\approx 2\% \cdot L$

Для ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС:

- имеется баланс числа символов «0» и «1» в структуре кодовой формы ДК ПНЛРП, т. е. ДБ=0;
- $ПЧС_{a_b}$ являются 4^x -уровневыми со средним разбросом уровней (от 1,5 до 2,5 раз), $ПЧС_{b_a}$ являются 3^x - или 4^x -уровневыми со средним разбросом уровней (от 1,5 до 1,7 раз), при этом уровни $ПЧС_{a_b}$, $ПЧС_{b_a}$ – небольшие и составляют значения от 2 % L до 8 % L .
- все КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$ и КТПЧС $\{b_{\tau_j}\}$ конкретной группы ДК ПНЛРП имеют одинаковую конкретную ТВС с одинаковыми циклическими сдвигами влево (знак «-»), равными $(-n)$ и $(-m)$:

$$a_{\tau_{i+1}} = a_{\tau_i}^{(-n)} \text{ и } a_{\tau_{i-1}} = a_{\tau_i}^{(-m)}, \quad n + m = l_b;$$

$$b_{\tau_{j+1}} = b_{\tau_j}^{(-n)} \text{ и } b_{\tau_{j-1}} = b_{\tau_j}^{(-m)}, \quad n + m = l_a.$$

Это позволяет при знании КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$, $\{b_{\tau_j}\}$ при конкретных тактах (i, j) устанавливать, какими будут КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$, $\{b_{\tau_j}\}$ при любых $i^* \neq i \pmod{l_b}$, $j^* \neq j \pmod{l_a}$.

Данный анализ позволяет сделать также следующие важные для практики применения ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС выводы:

1) С точки зрения дисбаланса числа «0» и «1» (ДБ) ДК ПНЛРП «комбинированного» типа вида ВС обладают абсолютно возможной скрытностью структуры (ДБ=0).

2) Тот факт, что КТПЧС $\{a_{\tau_i}\}$, $\{b_{\tau_j}\}$ имеют одинаковую конкретную ТВС с фиксированными циклическими сдвигами (n, m) по тактам (i, j) , может быть положен в основу методов идентификации структуры ДК ПНЛРП (их типа, вида, группы) и соответствующего метода синхронизации таких ДК ПНЛРП.

3) По уровню ПЧС_{а_б}, ПЧС_{б_а} данные ДК ПНЛРП являются с точки зрения помехоустойчивости предпочтительными для практического применения.

Заключение

Представленные выше результаты исследований имеют фактический, конкретный методологический характер и представляют собой набор фактов и данных о свойствах ЧАКФ ДКПНЛРП «комбинированного» типа, которые непосредственно могут быть положены в основу разработки технико-алгоритмических предложений и схем по реализации как ТРС, так и обеспечения её эффективности в процессе поиска, обнаружения, синхронизации, эффективного приёма сложных шумоподобных сигналов, как рассмотрено в работе [14], использующих последовательности в виде ДК ПНЛРП «комбинированного» типа. Разработке таких предложений и схем посвящены последующие работы авторов.

Литература

1. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. – М: Сов. радио, 1970. – 728 с.
2. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М: Радио и связь, 1985. – 290 с.
3. Brennan D. G. On the Maximum Signal to Noise Radio Realizable from Several Noise Signals // Proc. IRE. 1956. Vol. 43 № 10. P. 1530.
4. Мардер Н. С. Смена парадигмы телекоммуникаций и семиуровневая модель взаимодействия открытых систем // Электросвязь. 2007. № 2. С. 9-10.
5. ГОСТ Р ИСО 7498-2-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 2. Архитектура защиты информации. – М.: Госстандарт России, 1999. – 36 с.
6. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. – М: Радио и связь, 2007. – 240 с.
7. Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. – М: Сов. радио, 1975. – 200 с.
8. Сныткин И. И., Бурый В. И., Серобабин А. Г. Синхронизация по задержке при цифровой обработке сверхдлинных рекуррентных последовательностей // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1990. № 7. С. 31-35.
9. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Теоретические основы синтеза и исследования свойств систем производных нелинейных рекуррентных последовательностей // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 6. С. 17-25.
10. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Исследование и оценка свойств и характеристик периодических функций автокорреляции двукратных ПНЛРП // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 8. С. 28-34.
11. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Разработка элементов теории третьей решающей схемы приема производных нелинейных рекуррентных последовательностей // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 5. С. 78-84.
12. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Общие основы моделирования свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательности в интересах реализации «третьей решающей схемы» // Нелинейный мир. 2022. Т. 20. № 3. С. 51-60.
13. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Алгоритм реализации «третьей решающей схемы» повышения эффективности поиска и синхронизации сложных широкополосных шумоподобных сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 3. С. 54-63.

14. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Техничко-алгоритмические предложения по реализации третьей решающей схемы в интересах обеспечения эффективности приёма-обработки широкополосных шумоподобных сигналов на основе двукратной производной нелинейной рекуррентной последовательности «невложенного» типа // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2023. Т. 77. № 9. С. 35-43.

15. Сныткин И. И., Сныткин Т. И. Моделирование и установление свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей «вложенного» типа в интересах реализации третьей решающей схемы // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2022. Т. 77. № 7. С. 69-77.

16. Сныткин И. И., Сныткин Т. И., Захаренко Д. Г. Моделирование и установление свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных рекуррентных последовательностей «невложенного» типа в интересах реализации третьей решающей схемы (TPC) // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2023. Т. 77. № 5. С. 35-47.

17. Сныткин Т. И. Аналоговые режимы принятия решения о приеме в теории третьей решающей схемы // *Нелинейный мир*. 2018. Т.16. №6. С. 27-30.

References

1. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij* [Theory of discrete message transmission]. Moscow, "Sovetskoe radio" Publ., 1970, 728 p. (in Russian).

2. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, "Radio i svyaz" Publ., 1985, 290 p. (in Russian).

3. Brennan D. G. On the Maximum Signal to Noise Ratio Realizable from Several Noise Signals. *Proc. IRE*, 1956, vol. 43, no. 10, p. 1530 (in English).

4. Marder N. S. *Smena paradigmy telekommunikacij i semiurovnevaya model' vzaimodejstviya otkrytyh system* [A change in the telecommunications paradigm and a seven-level model of open systems interaction]. *Electrosvyaz*, 2007, no. 7, pp. 9-10 (in Russian).

5. State Standard 7498-2-99. Information technology. The interconnection of open systems. The basic reference model. Part 2. Information security architecture. Moscow, "Gosstandart Rossii" Publ., 1999. 36 p. (in Russian).

6. Zhuravlev V. I. *Poisk i sinhronizaciya v shirokopolosnykh sistemah* [Search and synchronization in broadband systems]. Moscow, "Radio i svyaz" Publ., 2007, 240 p. (in Russian).

7. Sverdlik M. B. *Optimal'nye diskretnye signaly* [Optimal discrete signals]. Moscow, "Sovetskoe radio" Publ., 1975, 200 p. (in Russian).

8. Snytkin I. I., Buryan V. I., Serobabin A. G. *Sinhronizaciya po zaderzhke pri cifrovoj obrabotke sverhduzinykh rekurrentnykh posledovatel'nostej* [Delay synchronization in the digital processing of ultra-long recurrent sequences]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 1990, no. 7, pp. 31-35 (in Russian).

9. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Teoreticheskie osnovy sinteza i issledovaniya svoystv sistem proizvodnykh nelinejnykh rekurrentnykh posledovatel'nostej* [Theoretical basis of synthesis and research of multiplied nonlinear recurrent sequences]. *Nelineinyi mir*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 17-25 (in Russian).

10. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Issledovanie i ocenka svoystv i kharakteristik periodicheskikh funkcij avtokorelyacii dvukratnykh PNLRP* [Research and evaluation of properties and characteristics of periodic autocorrelation functions two fold multiplied nonlinear recurrent sequences]. *Nelineinyi mir*, 2014, vol. 12, no. 8, pp. 28-34 (in Russian).

11. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Razrabotka ehlementov teorii tret'ej reshayushchej skhemy priema proizvodnykh nelinejnykh rekurrentnykh posledovatel'nostej* [Development of elements of theory of third decisive scheme of the admission of multiplied nonlinear recurrent sequences]. *Nelineinyi mir*, 2015, vol. 13, no. 5, pp. 78-84 (in Russian).

12. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Obshchie osnovy modelirovaniya svoystv determinirovannosti chastykh avtokorelyacionnykh funkcij dvukratnykh proizvodnykh nelinejnykh rekurrentnykh posledovatel'nosti v interesakh realizacii «tret'ej reshayushchej skhemy»* [General basis for modeling the properties of determinity of particular autocorrelation functions of double derivatives of nonlinear recurrent sequences in the interests of the "third decision scheme" implementation]. *Nelineinyi mir*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 51-60 (in Russian).

13. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Algoritm realizacii «tret'ej reshayushchej skhemy» povysheniya ehffektivnosti poiska i sinkhronizacii slozhnykh shirokopolosnykh shumopodobnykh signalov*

[Algorithm for implementation of the "third decision scheme" of increasing the efficiency of search and synchronization of difficult broadband noise like signals]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2021, vol. 26, no. 3, pp. 54-63 (in Russian).

14. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Tekhniko-algoritmicheskie predlozheniya po realizacii tret'ej reshayushchej skhemy v interesakh obespecheniya ehffektivnosti priyoma-obrabotki shirokopolosnykh shumopodobnykh signalov na osnove dvukratnoj proizvodnoj nelinejnoj rekurrentnoj posledovatel'nosti «nevlozhennogO» tipa* [Technical and algorithmic proposals for the implementation of the third decision scheme in the interests of ensuring the efficiency of receiving and processing broadband noise-like signals based on a two-fold derivative of a non-nested non-embedded non-linear recurrent sequences]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2023, vol. 77, no. 9, pp. 35-43 (in Russian).

15. Snytkin I. I., Snytkin T. I. *Modelirovanie i ustanovlenie svoystv determinirovannosti chastnykh avtokorrelacionnykh funkciy dvukratnykh proizvodnykh nelinejnykh rekurrentnykh posledovatel'nostej «vlozhennogO» tipa v interesakh realizacii tret'ej reshayushchej skhemy* [Modeling and determination of determinacy properties of partial autocorrelation functions of two-fold derivatives of nonlinear recurrent sequences of "nested" type in the interests of the implementation of the third crucial scheme]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2022, vol. 77, no. 7, pp. 69-77 (in Russian).

16. Snytkin I. I., Snytkin T. I., Zaharenko D. G. *Modelirovanie i ustanovlenie svoystv determinirovannosti chastnykh avtokorrelacionnykh funkciy dvukratnykh proizvodnykh rekurrentnykh posledovatel'nostej «nevlozhennogO» tipa v interesakh realizacii tret'ej reshayushchej skhemy (TRS)* [Modeling and establishing the properties of determinism of partial autocorrelation functions of double derivatives of recurrent sequences of "non-nested" type in the interests of implementing the third decision scheme]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2023, vol. 77, no. 5, pp. 35-47 (in Russian).

17. Snytkin T. I. *Analogovye rezhimy prinyatiya resheniya o prieme v teorii tret'ej reshayushchej skhemy* [Analog modes of decision-making on reception in theory of third decisive scheme]. *Nelineinyi mir*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 27-30 (in Russian).

Статья поступила 15 августа 2025 г.

Информация об авторах

Сныткин Иван Илларионович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры боевых авиационных комплексов. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков. Область научных интересов: теория систем сигналов, информационная безопасность, эффективность систем передачи информации. Email: snytkin2072@mail.ru.

Адрес: Россия, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135.

Сныткин Тимур Иванович – кандидат технических наук. Начальник отдела. ФГБУ «27 ЦНИИ» Минобороны России. Область научных интересов: теория систем сигналов, теория и практика искусственного интеллекта. E-mail: djammell@mail.ru.

Адрес: Россия, 143441, Московская обл., Красногорский р-н, дер. Путилково, ул. Спасо-Тушинский бульвар, д. 3, кв.369.

Афонин Илья Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков. Область научных интересов: информационный конфликт средств воздушно-космического нападения и системы воздушно-космической обороны; радиолокационные системы обнаружения, распознавания и целеуказания; прием и обработка сигналов. E-mail: ilyaafonin@yandex.ru.

Адрес: Россия, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135.

Афонин Лучезар Ильич – студент. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: компьютерная безопасность, прием и обработка сигналов. E-mail: lucezarafonin@yandex.ru.

Адрес: Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Modeling and determination of determinacy properties of partial autocorrelation functions of two-fold derivatives of nonlinear recurrent sequences of the "combined" type in the interests of the implementation of the "third decisive scheme"

I. I. Snytkin, T. I. Snytkin, I. E. Afonin, L. I. Afonin

Annotation: In the works devoted to the development of the theory and practice of applying the "third decisive scheme," it is indicated that its effectiveness is largely determined by what and how properties and patterns of determination of particular autocorrelation functions of specific types and types of twofold derivatives of nonlinear recurrent sequences used in the third decisive scheme are used. Therefore, the establishment, study of these properties and patterns is an important task related to their practical application in the interests of increasing the efficiency of the "reception-processing" procedures of complex noise-like signals, which generally include two-fold derivative nonlinear recurrent sequences. **The purpose of the work:** to establish, investigate, mathematically formalize, systematize the properties and patterns of this type of two-fold derivatives of nonlinear recurrent sequences. **Methods used:** modeling, including machine modeling, using the technique set forth in the previous works of the authors, mathematical formalization in the form of statements - patterns systematized for any L. **Results.** The results of modeling the properties of determination of partial autocorrelation functions of twofold derivatives of nonlinear recurrent sequences of this "combined" type in the framework of the implementation of the third decisive scheme in the form of established, investigated, systematized and mathematically formalized in the form of statements of properties and laws of partial autocorrelation functions are presented, which makes it possible to use them in a generalized form to organize effective procedures (within the scope of corresponding developed methods and technical solutions) identification of types, types, classes, subclasses, search, capture and synchronization of double derivatives of nonlinear recurrent sequences of this "combined" type. **Practical significance.** The obtained properties and patterns are directly used in the development of technical solutions and software algorithms for implementing a third solving scheme for accelerated search and efficient reception of complex noise-like signals and disclosure of their structure when constructing telecommunication radio systems, including special-purpose packet radio networks with complex signals.

Keywords: A-synchronization, B-synchronization, two-time derivative of a nonlinear recurrence sequence, discrete partial autocorrelation function, channel clock sequence of coincidence numbers, simple nonlinear recurrence sequence, sequence of coincidence numbers, partial autocorrelation function.

Information about authors

Ivan Illarionovich Snytkin – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of the Department of Combat Aviation Complexes. Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots. Field of research: theory of signal systems, information security, efficiency of information transmission systems. Email: snytkin2072@mail.ru.

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky Street, 135.

Timur Ivanovich Snytkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of department. FGBU "27 ZNII" Ministry of Defense of the Russian Federation. Field of research: theory of signal systems; theory and practice of artificial intelligence. Email: djammell@mail.ru.

Address: Russia, 143441, Moscow region, Krasnogorsky district, Putilkovo village, 3 Spaso-Tushinsky Boulevard Street, apt. 369.

Ilya Evgenievich Afonin – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of aviation and radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots. Field of research: information conflict of air and space attacking means and air and space defense systems; radar detection; recognition and target designation systems; radar signal processing. E-mail: ilyaafonin@yandex.ru.

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky Street, 135.

Lucchazar Ilich Afonin – Student. North Caucasus Federal University. Field of research: computer security, signal reception and processing. E-mail: lucchazarafonin@yandex.ru.

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkin Street, 1.

Для цитирования:

Сныткин И. И., Сныткин Т. И., Афонин И. Е., Афонин Л. И. Моделирование и установление свойств детерминированности частных автокорреляционных функций двукратных производных нелинейных рекуррентных последовательностей «комбинированного» типа в интересах реализации «третьей решающей схемы» // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 26-45. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-26-45.

For citation:

Snytkin I. I., Snytkin T. I., Afonin I. E., Afonin L. I. Modeling and determination of determinacy properties of partial autocorrelation functions of two-fold derivatives of nonlinear recurrent sequences of the "combined" type in the interests of the implementation of the "third decisive scheme". Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 26-45. DOI:10.24412/2782-2141-2025-3-26-45 (in Russian).

Метеорная связь как статистически устойчивый компонент телекоммуникационного ресурса Северного морского пути

Дорошенко В. И., Густов А. А., Вахрушева Ю. В., Гайворонская М. В.

Аннотация. В статье приводится обоснование целесообразности применения метеорной радиосвязи как одного из возможных средств передачи информации в условиях Арктических регионов России, в частности на Северном морском пути. Изложены особенности передачи данных по метеорному стохастическому прерывистому тракту передачи данных на очень высокой частоте. Описан способ защиты от ошибок в передаваемом потоке данных в моменты стохастического прерывания метеорной радиолинии. **Новизна** работы состоит в предлагаемой конвергенции технологий передачи данных по стохастической прерывистой радиолинии метеорной связи, где реализована технология фрагментации-дефрагментации потока передаваемых данных, обеспечивающая исключение потерь, искажений и вставок лишних блоков кода КОИ-7. Показано, что оптимизация использования ограниченного телекоммуникационного ресурса радиолинии метеорной связи позволит осуществлять безошибочную сшивку блоков на приёме, а повышение помехоустойчивости передачи сообщения осуществляется путём каскадного кодирования. Передача приоритетных сообщений типа SMS производится путём приостановки передачи потока неприоритетных данных. **Используемые методы:** методы кодирования и декодирования информации, методы теории вероятности. **К результатам работы** следует отнести создание модели конвергенции технологий каскадного кодирования-декодирования потока передаваемых данных и помехоустойчивого блочного кодирования циклическим кодом кода КОИ-7 при передаче данных по прерывистой радиолинии метеорной связи.

Ключевые слова: защита от ошибок, инфотелекоммуникация, метеорная связь, модель, помехоустойчивость, статистическая устойчивость, фрагментация-дефрагментация.

Введение

Северный морской путь (СМП) – это главная морская транспортная артерия на Севере России, функционирующая в сложных климатических и экологических условиях и имеющая огромное экономическое, политическое и военно-стратегическое значение для Российской Федерации¹.



Рис. 1. Акватория Северного морского пути

¹Указ Президента Российской Федерации от 31.07.2022 № 512 «Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации»

Интенсивное развитие арктических регионов России и его главной транспортной артерии – Северного морского пути является стратегически важной задачей для страны. В интересах её решения широкое развитие получили информационно-управляющие системы (ИУС) различного назначения и масштаба, базирующиеся на применении разнообразных средств вычислительной техники, телекоммуникационной инфраструктуре. ИУС решают задачи сбора, обработки и выдачи информации в целях оптимизации принятия управленческих решений в организационных (технологических) системах, поддержания процессов развития и повышения безопасности на море, мониторинга экологической обстановки т. п. Инфокоммуникационные ресурсы становятся основным национальным богатством, а эффективность их использования в государственном и военном управлении во все большей степени будет определять уровень развития национальной безопасности страны в целом и её важнейшей составной части – обороноспособности государства.

В целях обеспечения устойчивого информационного обмена телекоммуникационная инфраструктура в интересах функционирования ИУС строится на основе комплексного применения каналов связи, образованных различными средствами связи (рис. 2).



Рис. 2. Обобщённая схема, отражающая место метеорной связи в телекоммуникационной инфраструктуре информационно-управляющих систем

Роль и место метеорной связи в инфраструктуре Северного морского пути

Физико-географические особенности арктических регионов России и Северного морского пути таковы, что затруднено, а в некоторых случаях невозможно применение средств проводной, радио и спутниковой связи [1]. В этих условиях единственным возможным средством передачи сообщений может стать метеорная связь (МС), обусловленная появлением участков ионосферы при сгорании метеоров в атмосфере Земли, «зеркально» отражающих радиоволны. Как раз в районах Крайнего Севера, по широте места больше 70°, достигается максимальная эффективность МС. При этом в ходе разработки технических средств для радиолиний МС (РМС), планировании и применении МС следует учитывать особенности, присущие этому виду связи.

Метеорная связь является прерывистой. Интервалы между вспышками метеоров могут достигать до нескольких минут, а время существования следа составляет от 0,1 до 100 с. Канал МС имеет низкий коэффициент использования. Скорость передачи в канале может составлять от 115 до 310 бит/с. При низкой плотности метеорных следов скорость может быть и существенно ниже – порядка 80 бит/с. Однако, несмотря на это, МС может стать одним из наиболее надежных видов связи в Арктике. С точки зрения эффективности использования её можно рассматривать для передачи сообщений в случае, когда все другие виды радиосвязи полностью отсутствуют.

В МС реализован иерархический принцип управления её функционированием. РМС состоит из ведущей (ВДЩ) и ведомой (ВДМ) станций. ВДЩ станция занимается

организацией сеанса связи и передачей данных в течение сеанса связи по РМС на частоте f_1 , а ВДМ – непрерывно контролирует качество принимаемого сигнала, отражённого пассивным ретранслятором, и управляет процессом передачи данных в сеансе связи по линии управления РМС на частоте f_2 [2, 3].

Структурная схема радиолинии метеорной связи

Основным достоинством и преимуществом МС для телекоммуникаций на СМП является её статистическая устойчивость в любых условиях складывающейся обстановки по радиосвязи [4, 5]. Основным недостатком является стохастическая прерывистость МС на ультравысоких частотах (УВЧ) при стохастических пропаданиях метеорных следов, которые используются в качестве пассивных отражателей радиосигналов на УВЧ [6]. Для обеспечения возможности использования достоинств и преимуществ МС в условиях СМП необходимо решить задачу предотвращения искажений потока передаваемых данных в моменты стохастических прерываний связи на УВЧ при стохастических пропаданиях метеорных следов.

В известных метеорных линиях связи на УВЧ передача сообщений производится сеансами связи. При этом передача сообщения начинается, когда система контроля качества РМС показывает, что в данный сеанс связи может быть передан или весь объём сообщения или полностью сформированный пакет этого сообщения (со всеми его служебными данными). Если это условие не выполняется, то этот сеанс МС не используется для передачи сообщений. В таких радиолиниях осуществляется пакетная передача данных (сообщений). При этом каждый пакет содержит как информационные данные, так и служебные данные РМС. Объём служебных данных достигает 30 % от объёма пакета. Такие потери и без того скудного телекоммуникационного ресурса МС на УВЧ очень чувствительно сказываются при передаче данных через ненасыщенные следы (ННС) метеоров, которые появляются намного чаще, чем насыщенные, и обеспечивают передачу данных на расстояния до 400 – 500 км. Естественно появляется желание и необходимость использовать этот теряемый природный ресурс пассивного отражения УВЧ радиоволн ненасыщенными ионизированными следами в ионосфере на высоте от 80 до 110 км для передачи данных на УВЧ. Применение в составе средств МС микропроцессоров позволяет решить ряд новых технологических задач (рис. 3).

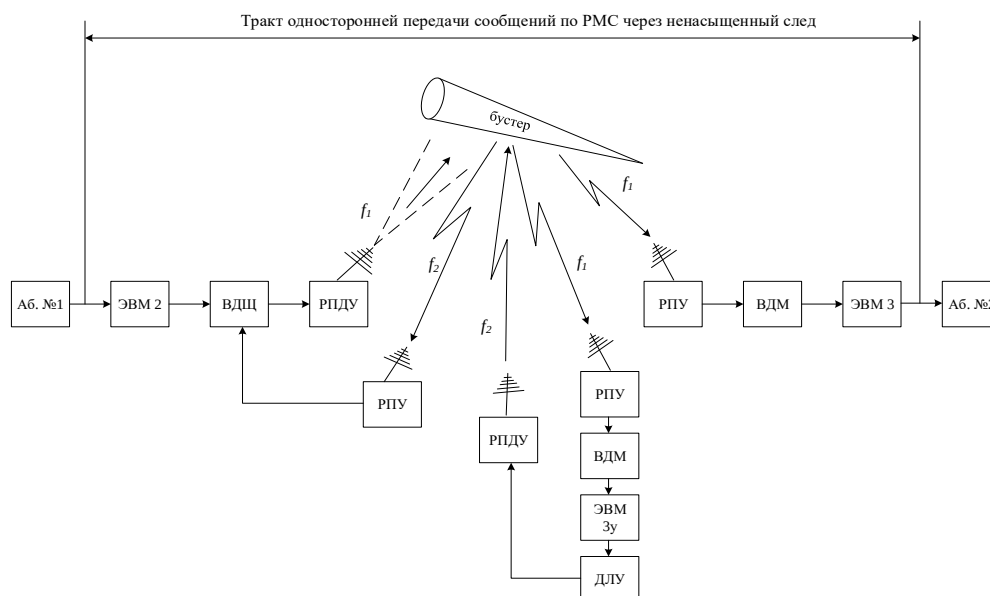


Рис. 3. Схема прерывистой радиолинии МС через ненасыщенный след с линией управления формируемой РМС на УВЧ, функционирующей с использованием этого же метеорного следа

Условные обозначения на рис. 3: Аб. № 1, 2 – абонент 1, 2; ЭВМ 2, 3 – электронная вычислительная машина; ВДЦ – ведущая станция; РПДУ – радиопередающее устройство; РПУ – радиоприемное устройство; ВДМ – ведомая станция; ЭВМ 3у – электронная вычислительная машина для приёма сканера и формирования служебных сообщений линии управления; ДЛУ – датчик линии управления РМС через ННС.

Конвергенция технологий, обеспечивающих безошибочную передачу данных по радиолинии метеорной связи в условиях стохастических помех

Для решения поставленных задач, во-первых, необходимо разработать технологию безошибочной односторонней передачи данных по стохастической прерывистой РМС на УВЧ [7]. Во-вторых, осуществить конвергенцию известных технологий обеспечивающих безошибочную передачу данных в условиях стохастических помех [9].

1) Для решения **первой** технологической задачи необходимо исключить потери, искажения и вставки лишних знаков (дезинформации) в моменты стохастического прерывания потока передаваемых данных по радиолинии УВЧ. Это достигается путём конвергенции технологий каскадного кодирования-декодирования потока передаваемых данных и помехоустойчивого блочного кодирования циклическим кодом КОИ-7 при передаче данных по прерывистой радиолинии МС. На рис. 4 наглядно представлена диаграмма технологии фрагментации-дефрагментации потока передаваемых данных при их передаче по прерывистой радиолинии МС.

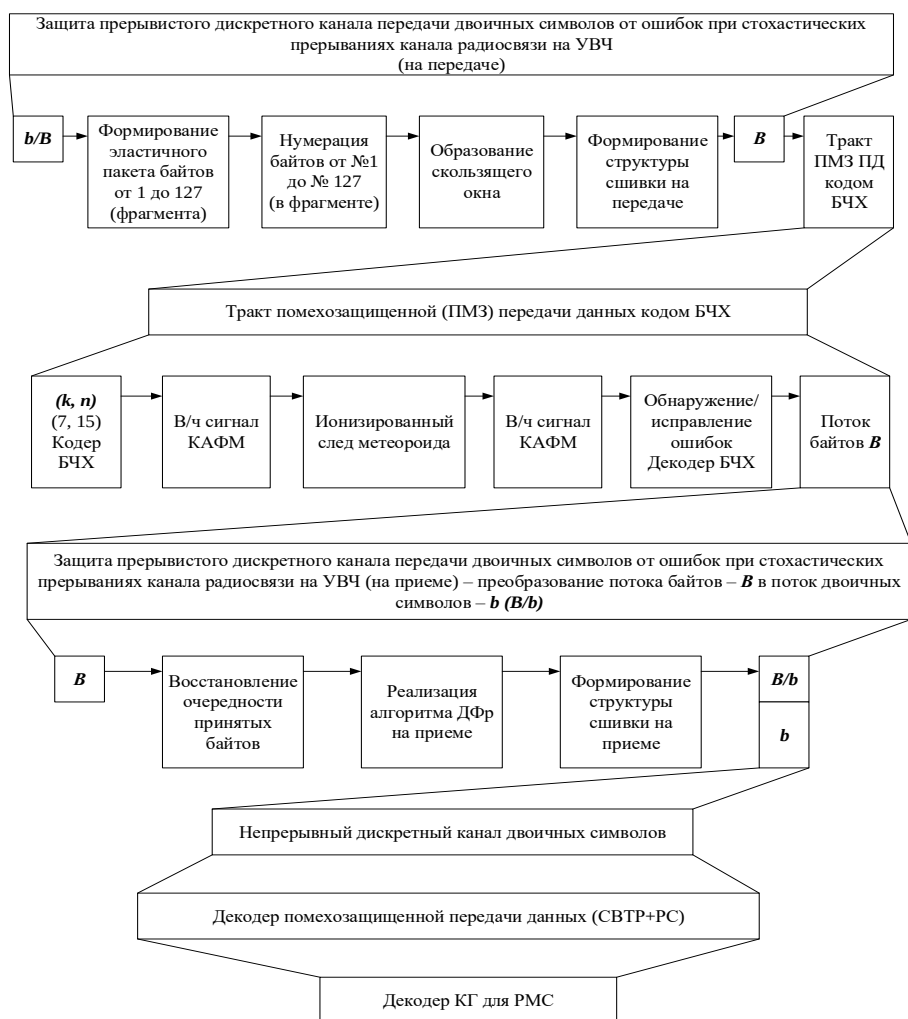


Рис. 4. Диаграмма технологии фрагментации-дефрагментации потока передаваемых данных при их передаче по прерывистой радиолинии МС

На передаче поток семиэлементных информационных кодовых блоков кода КОИ-7 делят на фрагменты (пакеты) объёмом от 1 до 127 блоков (байтов), каждому байту присваивают его очередной номер. Количество номеров выбрано не случайно, а так чтобы любой номер информационного кодового блока данного фрагмента можно было передать по каналу МС одним семиэлементным кодовым блоком КОИ-7 ($2^7 - 1 = 127$). По метеорному каналу связи на УВЧ передаются не кодовые блоки КОИ-7, а соответствующие им помехозащищённые блоковым кодом Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) – пятнадцатизначные кодовые блоки кода БЧХ. Семиэлементные кодовые блоки КОИ-7 преобразуются в пятнадцать элементных кодовых блоков кода БЧХ и вводятся на вход модулятора РПДУ УВЧ, в котором они модулируются методом наиболее помехоустойчивой квадратурной фазовой модуляции (КФМ) или квадратурной амплитудно-фазовой модуляции (КАФМ). С выхода РПДУ УВЧ модулированные сигналы вводятся в направленную антенну УВЧ и излучаются в эфир в направлении радианта на пассивный ретранслятор – ненасыщенный (или насыщенный) ионизированный след в ионосфере. В процессе передачи сообщения система контроля качества РМС, которая расположена на входе РПУ УВЧ ВДМ РМС, непрерывно контролирует качество приёма сигнала. Показателем качества является соотношение уровней (или мощностей) принимаемых сигналов УВЧ и помех в точке приёма. Критерием оценки качества принимаемых сигналов УВЧ является превышение этого соотношения выше заданной нормы. При снижении этого качества ниже допустимого (ниже заданной нормы) приём сигналов УВЧ прекращается, устройство контроля качества вырабатывает служебный сигнал «стоп передачу» и передаёт его по обратному каналу РМС (по линии управления РМС) передающей станции РМС, расположенной на ведущей станции РМС. Приняв этот сигнал, ВДЩ прекращает передачу информационных данных и запоминает номер кодового блока, на котором была прервана передача этих блоков данных. ВДЩ начинает сканирование ионосферы с целью поиска нового стохастического следа метеора в ионосфере, пригодного для передачи сигналов УВЧ. Пока система сканирования ионосферы ищет новый след, система фрагментации-дефрагментации вырабатывает сигнал «сшивки» на передаче. Сшивка состоит из служебного сигнала «пуск передачу», номера кодового блока на котором была прервана передача, а также ряда (трёх или более) кодовых блоков, правильно переданных до момента разрыва связи. Повторная передача информационных кодовых блоков кода КОИ-7 необходима для формирования правильной сшивки на приёме в ВДМ. Служебный номер кодового блока, на котором была прервана передача информационных кодовых блоков по РМС на УВЧ, передаётся только один раз, никакие другие служебные номера информационных кодовых блоков по РМС на УВЧ не передаются. Вслед за сшивкой производится передача потока оставшихся информационных кодовых блоков (рис. 4).

На приёме точно определяется место разрыва передаваемого потока байтов и осуществляется «сшивка» правильно принятых байтов. Для скоординированного осуществления этой процедуры на передаче и на приёме реализуются алгоритмы фрагментации-дефрагментации потока кодовых блоков [10].

Автоматизированное управление функционированием радиолинии МС на УКВ производится с применением специализированной ЭВМ, которая представляет собой типовую ПЭВМ, осуществляющую обмен со всеми внешними устройствами кодом КОИ-7, то есть в стандарте формата передачи данных. КОИ-7 – семибитовая кодировка для русского языка и обмена информацией по ГОСТ 13052-74, основанная на *ASC II*.

Кроме этого процесс передачи информационных кодовых блоков контролирует система защиты ошибок помехозащищённым кодом БЧХ. При применении пятнадцати элементных кодовых блоков кода БЧХ эта система автоматически исправляет все одиночные и двойные ошибки в кодовых блоках кода БЧХ. При появлении ошибок большей кратности декодер кода БЧХ обнаруживает ошибку в избыточном блоке (n, k), и приём искажённых кодовых блоков останавливается, система вырабатывает служебный сигнал «стоп передачу»

и передаёт его по обратному каналу РМС (по линии управления РМС) передающей станции РМС расположенной на ведущей станции (ВДЩ) РМС. По этому сигналу передача данных прекращается и включается система сканирования ионосферы, как это было описано выше.

2) Для решения **второй** задачи – необходимо осуществить конвергенцию известных технологий, обеспечивающих безошибочную передачу данных в условиях стохастических помех. На рис. 5 представлена модель конвергенции технологий каскадного кодирования-декодирования потока передаваемых данных и помехоустойчивого блочного кодирования циклическим кодом КОИ-7 при передаче данных по прерывистой радиолнии МС.

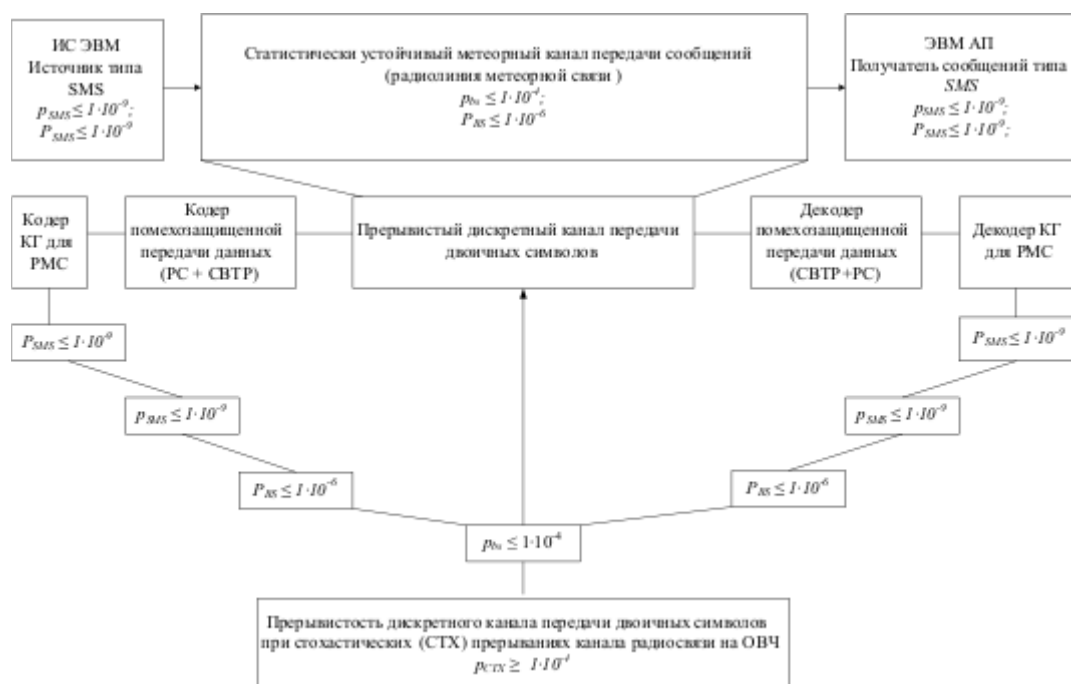


Рис. 6. Модель конвергенции технологий каскадного кодирования-декодирования потока передаваемых данных и помехоустойчивого блочного кодирования циклическим кодом КОИ-7 при передаче данных по прерывистой радиолнии МС

Передача приоритетного сообщения типа SOS или SMS производится по стохастическому прерывистому радиоканалу УВЧ ультравысокой частоты (УВЧ) МС (на длине радиоволн от 4 до 10 м). Требуется передать приоритетное сообщение типа SOS или SMS с достоверностью не ниже 10^{-9} (на байт – на знак кода КОИ-7) занимая полосу частот до 100 кГц (рис. 6). Тип модуляции – квадратурная фазовая манипуляция со скоростями от 10 000 до 40 000 двоичных символов в секунду (бит/с). Устройство оценки качества выбранного ВДМ УВЧ радиоканала позволяет обеспечивать передачу данных (ПД) по тракту ПД с коэффициентом двоичных ошибок (частотой появления ошибочных бит) не более 10^{-4} . По такому непрерывному (в сеансе связи) каналу связи обеспечивается передача данных (BIX (Bate Information eXchange) – побайтовый информационный обмен) кодом БЧХ с достоверностью не ниже 10^{-6} (BIU (Basic Information Unit) – основной информационный блок – в коде КОИ-7 (или ASC II)). Для защиты от ошибок применен пятнадцати элементный помехозащищённый код БЧХ – $n, k - 15/7$ ($n = 15, k = 7, t = 2$). Качество выбранного УВЧ радиоканала в процессе передачи по нему данных (в том числе и приоритетных данных типа SOS или SMS)) оперативно непрерывно оценивается устройством оценки качества канала (BERTом (Bit Error Rate tester) – устройством измерения вероятности ошибок в канале связи)) в два этапа: сначала оперативно (быстро – в реальном времени) по соотношению мощностей принятого сигнала P_c и помехи P_n на входе РПУ УВЧ, а потом в процессе передачи данных – и по коэффициенту двоичных ошибок (частоте

появления ошибочных бит). Наряду с этим непрерывно оценивается качество *BIX* (*Bate Information eXchange*) – побайтового информационного обмена (КОИ-7) по количеству ошибок в принимаемых кодовых блоках БЧХ ($n, k - 15/7$).

Для повышения помехоустойчивости передачи сообщения с максимально возможным использованием телекоммуникационного ресурса радиолинии МС предлагается следующий новый способ защиты от ошибок в данных, передаваемых по прерывистой радиолинии МС [10]. В этом способе производят каскадное кодирование потока информационных кодовых блоков КОИ-7 сначала помехозащищённым блочным кодом Рида-Соломона (РС), а после этого преобразуют поток кодовых блоков РС в поток двоичных символов, который путём сверточного кодирования кодируют свёрточным помехозащищённым кодом [11-14]. В результате такого каскадного кодирования потока информационных кодовых блоков КОИ-7 получается поток двоичных символов. Этот поток двоичных символов делят на семёрки. Каждую семёрку превращают в код КОИ-7, а затем в байты. Каждый семиэлементный байт кодируют пятнадцать элементом помехозащищённым кодовым блоком кода БЧХ ($k, n - 7/15$). Полученные кодовые блоки БЧХ передают по каналу связи.

3) *Качество* стохастического физического процесса передачи приоритетных сообщений типа *SOS* или *SMS* по прерывистой радиолинии МС математически описывается и оценивается формулой полной вероятности [15]:

$$P\{A\} = \sum_{i=1}^n P\{B_i\}P\{A|B_i\}. \quad (1)$$

После решения *первых двух* задач настала очередь решения ещё и **третьей** задачи – доведения приоритетного сообщения типа *SOS* или *SMS* до адресата-получателя с вероятностью не ниже требуемой достоверностью не менее 0,99 ($A \geq 0,99$). A – событие, состоящее в том, что сообщение типа *SOS* или *SMS*, отправленное источником сообщения, принято адресатом-получателем, при этом вероятность искажений в нём не превышает величины 10^{-9} .

$P\{A\}$ – полная вероятность правильного приёма сообщения типа *SOS* или *SMS*, отправленного источником сообщения по прерывистой РМС, адресатом-получателем с вероятностью искажений в нём не превышающей величины $1 \cdot 10^{-9}$.

На приёме каждое принятое приоритетное сообщение типа *SOS* или *SMS* с достоверностью не ниже требуемой (10^{-9}) принимают с вероятностью B_i . B_i – i -е событие, состоящее в том, что сообщение типа *SOS* или *SMS*, отправленное источником сообщения, попало в кодер формирования структуры кодограммы для РМС и в момент времени i было передано по РМС и принято декодером структуры кодограммы *SOS* или *SMS* с вероятностью B_i , при этом вероятность искажений в нём не превышает величины $1 \cdot 10^{-9}$. При однократной передаче такого сообщения реальная вероятность B_i находится в пределах от 0,6 до 0,9 ($0,6 > B_i < 0,9$).

$A|B_i$ – условие, состоящее в том, что событие A может произойти только в том случае, если произошло событие B_i , то есть *SMS* может быть принято с вероятностью B_i только в том случае, если вероятность искажений в нём не превышает величины $1 \cdot 10^{-9}$;

$P\{A|B_i\}$ – условная вероятность того, что событие A может произойти только в том случае, если произошло событие B_i , то есть вероятность того, что *SMS* может быть принято с вероятностью B_i ; при условии, что вероятность искажений в нём не превышает величины $1 \cdot 10^{-9}$.

$$P\{B_i\} = \sum_{i=1}^n P\{B_i\}, \quad (2)$$

Формула (2) отражает сумму вероятностей событий B_i .

Для обоснования времени, необходимого для доведения (передачи) сообщения типа *SOS* или *SMS* от источника сообщения по прерывистой радиолинии МС до адресата-

получателя требуется рассчитать количество необходимого для этого повторных передач – n .

Следовательно, для выполнения поставленной задачи доведения сообщения типа SOS или SMS до адресата-получателя с вероятностью не ниже заданной – P_z ($Q_z \geq 1 - P_z$) необходимо произвести не менее n передач сообщения типа SOS или SMS по прерывистой РМС. Количественно величина n определяется по формуле определения суммы вероятностей событий:

$$P\left\{\sum_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P\{A_i\}. \quad (3)$$

При достижении требуемого значения – P_z ($Q_z \geq 1 - P_z$) вероятности доведения SOS или SMS до адресата-получателя определяется величина n – численное значение количества повторных передач. Определив среднее время однократной передачи SOS или SMS, можно вычислить ожидаемые значения минимального, среднего и максимального времени, необходимого для доведения сообщения до адресата-получателя.

Таким образом, для передачи приоритетного сообщения типа SOS или SMS по прерывистой радиолинии МС необходимо физически и технологически решить две взаимосвязанные задачи:

- 1) обеспечить передачу сообщения с *достоверностью не ниже заданной* (то есть с заданным *показателем качества*),
- 2) осуществить его многократную передачу – не менее Z раз (то есть достичь *выполнения требуемого критерия*).

Только тогда мы решим поставленную перед нами технологическую задачу, которую математически можно оценивать в соответствии с формулой полной вероятности и получить количественную оценку правильности решения физической и технологической задачи.

Заключение

1) Новизна предлагаемой технологии передачи данных по стохастической прерывистой радиолинии МС состоит в том, что в ней реализована технология фрагментации-дефрагментации потока передаваемых данных обеспечивающая исключение потерь, искажений и вставок лишних блоков кода КОИ-7.

2) Конвергенция технологий каскадного кодирования с применением помехозащищённых кодов Рида-Соломона и сверточного кодирования позволила осуществить передачу данных с потерей достоверности не более чем 10^{-9} на знак кода КОИ-7 по стохастическому метеорному каналу связи на ультравысокой частоте с уровнем ошибок 10^{-4} на двоичный символ.

3) При использовании в метеорном канале связи ненасыщенных ионизированных следов метеоров короткое сообщение объёмом до 100 знаков кода КОИ-7 может быть передано на расстояние до 500 км в течение времени от нескольких минут до десятков минут (в среднем 1,5 – 3 минуты).

Литература

1. Антропов Д. А. Проблемы эксплуатации множества группировок радиоэлектронных средств различного назначения в ходе формирования современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры арктических регионов страны // Арктика: экология и экономика. 2014. № 2 (14). С. 67-78.
2. Способ управления передачей информации от удаленных станций в сети метеорной связи со звездообразной структурой. Патент на изобретение РФ № 2535507 от 10.12.2014.

3. Кашин А.Л., Катанович А.А., Римашевский А.А. и др. Аппаратура метеорной связи. Патент на изобретение РФ № 2710286 от 26.12.2019.
4. Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Основные направления развития метеорной связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 4. С. 30-47. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10277.
5. Мирошников В. И., Будко П. А., Жуков Г. А. Составной тракт доведения информации до робототехнических комплексов в северных морях // Техника средств связи. 2019. № 3 (147). С. 2-26.
6. Бондарь Б. Г., Кашеев Б. Л. Метеорная связь. Киев:Техника, 1968. 119 с.
7. Сидоров А. В., Орехов А. О. Рассеяние радиоволн на насыщенных метеорных следах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 129-133.
8. Катанович А. А. Принципы построения и автоматизация систем связи Военно-морского флота. – СПб.: Морская энциклопедия. 2021. С. 503–514.
9. Ксенофонов Ю. Г., Дорошенко В. И. Применение метеорной связи в системах обеспечения безопасности объектов инфраструктуры Северного морского пути // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействию терроризму. 2019. №1-2 (127-128). С. 3-11.
10. Галлагер Р. Теория информации и надёжная связь. М.: Сов. радио, 1974. 276 с.
11. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.: ил.
12. Фрейман В. И. Исследование принципов построения и коррекции ошибок элементами систем управления, реализующими код Рида-Соломона // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-2. С. 281-285.
13. Фрейман В. И. Программная реализация и исследование моделей систем управления, в которых для коррекции ошибок используется сверточное кодирование // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 71-75.
14. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. 314 с.

References

1. Antropov D. A. Problems of Exploitation of Many Groups of Radio-Electronic Means of Various Purposes in the Course of Formation of Modern Information and Telecommunication Infrastructure of the Arctic Regions of the Country. Arctic: Ecology and Economy. 2014, no 2 (14). Pp. 67-78 (in Russian).
2. Method for controlling the transmission of information from remote stations in the meteor communication network with a star-like structure. Patent of the Russian Federation no 2535507 dated 10.12.2014 (in Russian).
3. Kashin AL, Katanovich AA, Rimashevsky AA. et al. Meteor Connection Equipment. Patent of the Russian Federation no 2710286 of 26.12.2019 (in Russian).
4. Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. *Osnovnye napravleniya razvitiya Meteornoj svyazi* [Main directions of Meteoric connection development]. H&ES Research. 2019. T. 11. № 4. Pp. 30-47 (in Russian).
5. Miroshnikov V. I., Budko P. A., Zhukov G. A. Composite Path of Bringing Information to Robotic Complexes in the Northern Seas. Means of communication equipment. 2019. № 3(147). Pp. 2-26 (in Russian).
6. Bondar B. G., Kashcheev B. L. *Meteornaya svyaz* [Meteoric connection]. 1968. 119 p. (in Russian).
7. Sidorov A. V., Orekhov A. O. *Rasseyaniye radiovoln na nasyschennykh meteornykh sledakh* [Scattering of radio waves on saturated meteoric traces. Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences]. 2013. №12-1. Pp. 129-133 (in Russian).
8. Katanovich A. A. *Principy postroeniya i avtomatizatsiya sistem svyazi Voenno-morskogo flota* [Principles of Construction and Automation of Naval Communication Systems.] St. Petersburg. Marine Encyclopedia. 2021. Pp. 503–514 (in Russian).
9. Ksenofontov Yu. G., Doroshenko V. I. *Primenenie meteornoj svyazi v sistemakh obespecheniya bezopasnosti ob"ektov infrastruktury Severnogo morskogo puti* [Application of meteoric connection in the systems of ensuring the safety of infrastructure facilities of the Northern Sea Route.]

Defense technology issues. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2019. №1-2 (127-128). Pp. 3-11 (in Russian).

10. Gallagher R. *Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz* [Information theory and reliable communication]. Moscow. Sovetskoe radio Publ. 1974. 276 p. (in Russian).

11. Peterson U., Weldon E. *Kody, pravlyayushchie oshibki* [Codes that correct errors]. Moscow. Mir Publ. 1976 594 p. (in Russian).

12. Freiman V. I. *Issledovanie printsipov postroeniya i korrektsii oshibokami elementami upravleniyami realizuyushchimi kod Reeda-Solomona* [Study of the principles of construction and correction of errors by elements of control systems that implement the Reed-Solomon code]. Basic research. 2016. № 8-2. Pp. 281-285 (in Russian).

13. Freiman V. I. *Programmnaya realizatsiya i issledovanie modeli sistem upravleniya, v kotorykh dlya korrektsii oshibok ispol'stvennoe kodirovanie* [Program implementation and study of models of control systems, in which convolutional coding is used for error correction]. Basic research. 2016. № 8-1. Pp. 71-75 (in Russian).

14. Abezgauz G. G., Tron A. P., Kopenkin Yu. N., Korovina I. A. *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam* [Handbook on probabilistic calculations.] Moscow, Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense 1970. 314 p. (in Russian).

Статья поступила 05 сентября 2025 г.

Информация об авторах

Дорошенко Виктор Иванович – Доктор технических наук, профессор. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ, КК и СОИ и Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. E-mail: morechod1954@yandex.ru.

Адрес: 198510, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, Разводная ул., д. 17.

Густов Александр Александрович – Доктор военных наук, профессор. Заместитель директора научно-технического центра по научной работе. Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии» (ПАО «Интелтех»). Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7 911 917 47 45. E-mail: a.gustov@inteltech.ru.

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

Вахрушева Юлия Владимировна – Младший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ, КК и СОИ и Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. E-mail: vasilenko.96@mail.ru.

Адрес: 198510, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, Разводная ул., д. 17.

Гайворонская Марина Владимировна – Научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ, КК и СОИ и Р НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. E-mail: marina.manuny1970@yandex.ru;

Адрес: 198510, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, Разводная ул., д. 17.

Meteor Connection as a Statistically Stable Component of the telecommunication resource of the Northern Sea Route

V. I. Doroshenko, A. A. Gustov, Yu. V. Vakhrusheva, M. V. Gayvoronskaya

Annotation. The article substantiates the expediency of using meteor radio communication as one of the possible means of transmitting information in the Arctic regions of Russia, in particular on the Northern Sea Route. The features of data transmission via the meteoric stochastic intermittent data

transmission path at a very high frequency are described. A method of protection against errors in the transmitted data stream at the moments of stochastic interruption of the meteor radio line is described. **The novelty** of the work lies in the proposed convergence of data transmission technologies over the stochastic intermittent radio link of the Meteoric connection where the technology of fragmentation-defragmentation of the transmitted data stream is implemented, which ensures the exclusion of losses, distortions and insertions of unnecessary blocks of the KOI-7 code. It is shown that the optimization of the use of the limited telecommunication resource of the meteor communication radio link will allow for error-free stitching of receiving units, and the increase in the noise immunity of message transmission is carried out by cascade coding. Transmission of priority messages of the SMS type is performed by suspending the transmission of non-priority data. **Methods used:** methods of encoding and decoding information, methods of probability theory. **Results:** A model of convergence of the technologies of cascade coding-decoding of the transmitted data stream and noise-resistant block coding by the cyclic code KOI-7 during data transmission via the intermittent radio link Meteoric connection is presented.

Keywords: error protection, infotelecommunication, meteoric coupling, model, noise immunity, statistical stability, fragmentation-defragmentation.

Information about authors

Viktor Ivanovich Doroshenko – Doctor of Technical Sciences, Professor. Senior Researcher of the NRC TT NAVY, KK and SDI and R NII OSIS VFA, Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov. Tel.: (812) 450-67-14. E-mail: morec hod1954@yandex.ru.

Address: 198510, Russia, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

Alexander Alexandrovich Gustov – Doctor of Military Sciences, Professor. Leading employee of PJSC «Inteltech». Tel.: (812) 448-95-97. E-mail: a.gustov@inteltech.ru.

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

Yulia Vitalievna Vakhrusheva – Junior Researcher of the Research Center of the Naval Fleet, Space Control and SDI and the R Research Institute of Naval Assessment of the Navy of the Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov. Tel.: (812) 450-67-14. E-mail: vasilenko.96@mail.ru.

Address: 198510, Russia, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

Marina Vladimirovna Gayvoronskaya – Researcher of the Scientific Research Center of the Naval Fleet, Space Complex and SDI and the Scientific Research Institute of Naval Logistics of the Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov. Tel.: (812) 450-67-14. E-mail: marina.manuny1970@yandex.ru.

Address: 198510, Russia, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya str., 17.

Для цитирования:

Дорошенко В. И., Густов А. А., Вахрушева Ю. В., Гайворонская М. В. Метеорная связь как статистически устойчивый компонент телекоммуникационного ресурса Северного морского пути // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 46-56. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-46-56.

For citation:

Doroshenko V. I., Gustov A. A., Vakhrusheva Yu. V., Gayvoronskaya M. V. Meteor Connection as a Statistically Stable Component of the telecommunication resource of the Northern Sea Route. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). С. 46-56 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-46-56.

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

УДК 004.056

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-57-66

**Методика выбора оптимального средства защиты информации для объекта
вычислительной техники при ограничениях на вычислительные ресурсы**

Гусеница Я. Н., Тимонов А. А., Чикирев А. А.

Аннотация. В условиях стремительного распространения цифровых технологий в государственных и коммерческих организациях, проблема обеспечения информационной безопасности приобретает критически большое значение, что обусловлено необходимостью предотвращения несанкционированного доступа, утечки конфиденциальных сведений и иных угроз кибербезопасности. Также необходимо отметить, что совершенствование современных технологий влечет за собой формирование новых факторов риска, обуславливающих снижение уровня защищенности информационных ресурсов. Это создает объективную необходимость усиления мер обеспечения информационной безопасности объектов вычислительной техники посредством внедрения усовершенствованных средств защиты сведений от несанкционированного доступа. При этом важным аспектом в обеспечении информационной безопасности является выбор средств защиты информации для объектов вычислительной техники, что обусловлено необходимостью соблюдения нормативных требований, стандартов информационной безопасности и учета специфики функционирования конкретных автоматизированных систем обработки информации. В работе предложена и обоснована методика выбора оптимального средства защиты информации для объекта вычислительной техники при ограничениях на вычислительные ресурсы. В основе методики используются аналитическая модель реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники, немарковская модель функционирования средств защиты информации, критерии классов пригодности и превосходства. Методика учитывает типы угроз информационной безопасности, наличие временных задержек и изменяющуюся интенсивность рабочей нагрузки в переходных и нестационарных режимах функционирования средств защиты информации. Полученные в работе результаты могут быть использованы при обосновании средства защиты информации для создаваемых объектов вычислительной техники. Дальнейшее развитие предложенной методики является применение программного решения по автоматизации выбора оптимального средства защиты информации на соответствующем объекте вычислительной техники.

Ключевые слова: вычислительные ресурсы, информационная безопасность, объект вычислительной техники, немарковская модель, средство защиты информации, угрозы безопасности.

Введение

В настоящее время внедрение цифровых технологий во всех сферах является важнейшим условием прорывного развития страны. Поэтому во многих государственных и коммерческих организациях внедряется современная цифровая инфраструктура [1]. Вместе с тем, данная тенденция несет с собой новые угрозы информационной безопасности, что приводит к повышению требований к защите информации на объектах вычислительной техники.

Важным аспектом в обеспечении информационной безопасности является выбор средств защиты информации (СЗИ) для объекта вычислительной техники, чему свидетельствует значительное количество публикаций различных исследователей [2–19]. Однако существующие методы часто игнорируют нестационарные режимы и временные задержки, что снижает их применимость в динамичных системах.

Целью настоящей статьи является разработка методики выбора оптимального СЗИ для объекта вычислительной техники с учетом типов угроз информационной безопасности, наличия временных задержек и изменяющейся интенсивности рабочей нагрузки в переходных и нестационарных режимах функционирования. Новизна заключается в интеграции аналитической и немарковской моделей для оптимизации под ресурсные ограничения.

Математическая постановка задачи

Целевая функция определяет уровень информационной безопасности объекта вычислительной техники за счет применения СЗИ:

$$f(x_1, \dots, x_n) \Rightarrow \max, \quad (1)$$

где $f(x_1, \dots, x_n) = \min P_{00}(x_1, \dots, x_n; t)$ – минимальное значение показателя эффективности применения СЗИ в течение времени t .

При этом для получения значений $P_{00}(x_1, \dots, x_n; t)$ предлагается использовать модель, приведенную в [20]:

$$P_{00}(t) = \frac{a_1(t)\beta_2 a_{3i}(t)(\alpha_3 a_3(t) + \beta_3 a_1(t))}{(\alpha_3 a_3(t) + \beta_3 a_1(t))(\beta_2 a_3(t)(a_1(t) + a_{0i}(t)) + a_0(t)a_1(t)) + (a_0^2(t)\alpha_2)(\alpha_3 a_3(t) + a_1(t))}, \quad (2)$$

где $a_i(t)$ и $b_i(t)$ – аппроксимированные плотности вероятностей распределения переходов между состояниями СЗИ; α_i и β_i – условные вероятности переходов между состояниями СЗИ, определяющие выбор дальнейшего движения случайного процесса функционирования.

Условные вероятности переходов между состояниями СЗИ вычисляются по формулам:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda}{\lambda + v_2}, \beta_2 = \frac{v_2}{\lambda + v_2}, \alpha_3 = \frac{v_2}{v_1 + v_2}, \beta_3 = \frac{v_1}{v_1 + v_2},$$

где λ – интенсивность несанкционированного доступа к информации объекта вычислительной техники; v_1 – интенсивность обнаружения несанкционированного доступа; v_2 – интенсивность нейтрализации несанкционированного доступа

Аппроксимированные плотности вероятностей распределения переходов между состояниями СЗИ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} a_0(t) = a_2(t) &= \frac{1}{2} \left(\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{\lambda \cdot t} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} + \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{\lambda \cdot t} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} \right); \\ a_1(t) = b_1(t) &= \frac{1}{2} \left(\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{v_1 \cdot t} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} + \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{v_1 \cdot t} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} \right); \\ a_3(t) = b_2(t) &= \frac{1}{2} \left(\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{v_2 \cdot t} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} + \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{v_2 \cdot t} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right)} \right). \end{aligned}$$

Целевая функция (1) имеет ограничение, которое относится к классу критериев пригодности и учитывает потребные вычислительные ресурсы на СЗИ:

$$C(x_1, \dots, x_n) \leq C_d, \quad (3)$$

где C_d – допустимые вычислительные ресурсы.

С учетом представленных особенностей модели конечный результат можно получить путем поиска оптимального СЗИ для объекта вычислительной техники. В формализованном виде данная задача будет выглядеть следующим образом:

$$x^* = \arg \max_{x \in \Delta} f(x), \quad (4)$$

$$\Delta = \{x | C(x) \leq C_d; x = \{x_i\}, i = \overline{1, n}\},$$

где Δ – множество вариантов средств защиты информации с учетом ограничений;

$C(x)$ – вычислительные ресурсы, необходимые для применения средств защиты информации.

Решение задачи

Для выбора оптимального СЗИ x^* из множества альтернатив x необходимо выполнить следующие этапы (рис. 1):

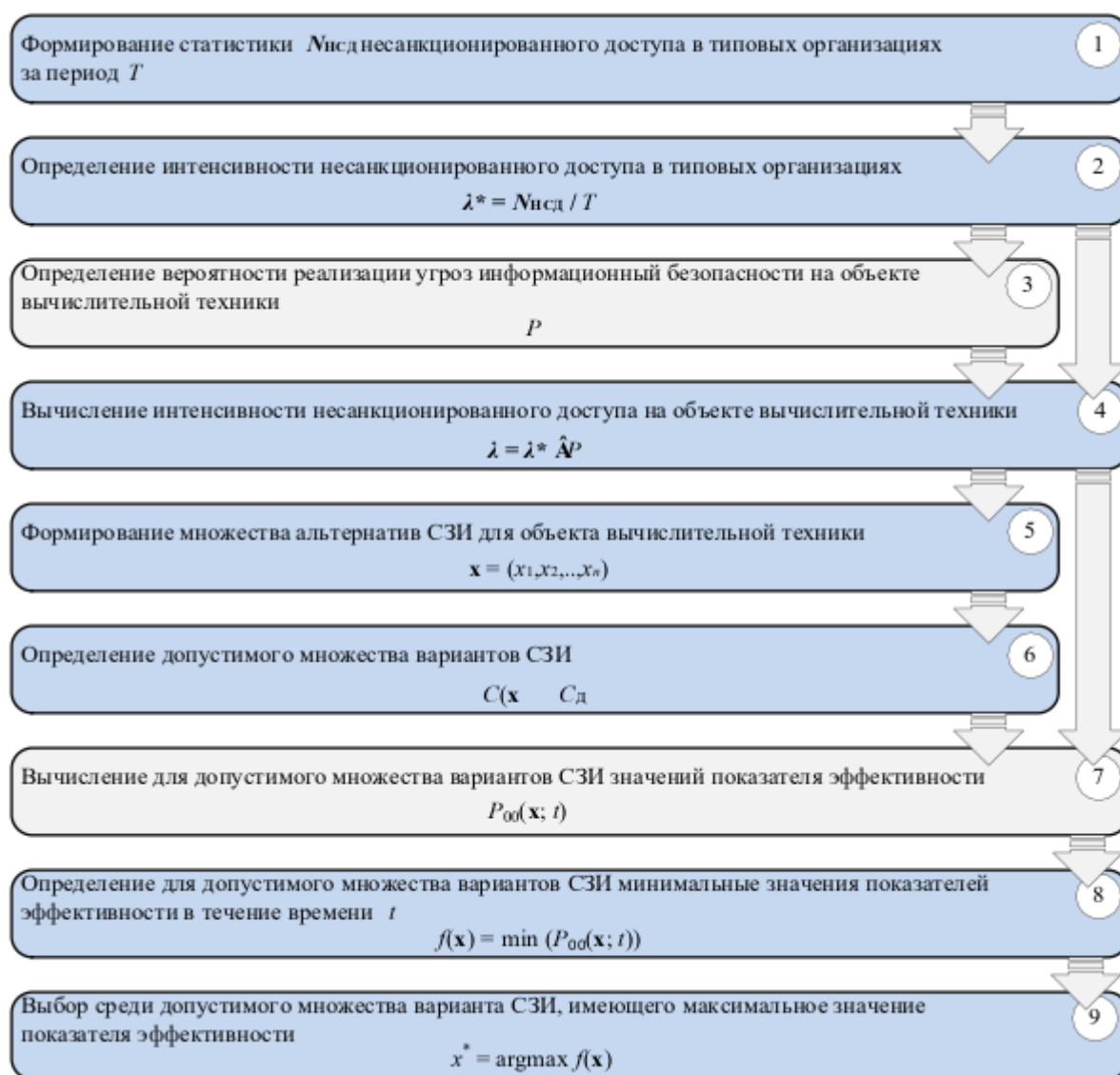


Рис. 1. Структура методики

1) Сформировать статистику $N_{НСД}$ несанкционированного доступа в типовых организациях за период T .

2) Определить интенсивность несанкционированного доступа в типовых организациях:

$$\lambda^* = N_{НСД} / T.$$

3) Определить вероятность P реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники на основе модели [21, 22].

4) Вычислить интенсивность несанкционированного доступа на объекте вычислительной техники: $\lambda = \lambda^* \cdot P$.

5) Сформировать множество вариантов СЗИ для объекта вычислительной техники $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

6) Определить допустимое множество вариантов СЗИ на основе критерия (3).

7) Вычислить для допустимого множества вариантов СЗИ значения показателя эффективности $P_{00}(x; t)$ на основе модели (2).

8) Определить для допустимого множества вариантов СЗИ минимальные значения показателей эффективности в течение времени t

$$f(x) = \min (P_{00}(x; t)).$$

9) Выбрать среди допустимого множества вариантов СЗИ, которое имеет максимальное значение показателя эффективности (4).

Расчетный пример

Рассмотрим задачу, для которой статистика несанкционированного доступа в типовых организациях за год составляет в среднем 100 нарушений информационной безопасности.

Исходные данные для объекта вычислительной техники представлены в табл. 1.

Объем вычислительных ресурсов на СЗИ ограничен 50 МБ.

Таблица 3 – Вероятности реализации угроз информационной безопасности

Классификация угроз	Обозначение	Содержание	Вероятность
по типу угроз	Z_2	угрозы выхода из строя программных средств	0,8
	Z_3	угрозы выхода из строя технических средств	0,2
	Z_4	угрозы физической безопасности	0,9
	Z_5	угрозы социальной безопасности	0,9
по объекту воздействия	Z_6	персонал	0,8
	Z_7	программные средства	0,8
	Z_8	технические средства	0,8
по цели воздействия	Z_9	нарушение конфиденциальности	0,9
	Z_{10}	нарушение целостности	0,5
	Z_{11}	нарушение доступности	0,4

Определим интенсивность несанкционированного доступа в типовых организациях:

$$\lambda^* = 100 / 8760 = 0,01142 \text{ ч}^{-1}.$$

Определим вероятность P реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники. В результате применения аналитической модели реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники получим $P = 0,33$.

Вычислим интенсивность несанкционированного доступа на объекте вычислительной техники:

$$\lambda = 0,01142 \cdot 0,33 = 0,003762 \text{ ч}^{-1}.$$

Сформируем множество вариантов СЗИ для объекта вычислительной техники $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Результаты представлены в табл. 2.

Определим допустимое множество вариантов СЗИ на основе критерия.

Результаты представлены в табл. 3.

Вычислим для допустимого множества вариантов СЗИ значения показателя эффективности $P_{00}(x; t)$. Определим для допустимого множества вариантов СЗИ минимальные значения показателей эффективности в течение времени t .

Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 2 – Варианты СЗИ для объекта вычислительной техники

Наименование СЗИ	Время обнаружения угроз	Время нейтрализации угроз	Вычислительные ресурсы, МБ
СЗИ 1	1	1	100
СЗИ 2	2	2	90
СЗИ 3	3	3	80
СЗИ 4	4	4	70
СЗИ 5	5	5	60
СЗИ 6	6	6	50
СЗИ 7	7	7	40
СЗИ 8	8	8	30
СЗИ 9	9	9	20
СЗИ 10	10	10	10

Таблица 3 – Допустимые варианты СЗИ для объекта вычислительной техники

Наименование СЗИ	Время обнаружения угроз	Время нейтрализации угроз	Вычислительные ресурсы, МБ
СЗИ 6	6	6	50
СЗИ 7	7	7	40
СЗИ 8	8	8	30
СЗИ 9	9	9	20
СЗИ 10	10	10	10

Таблица 4 – Минимальные значения показателей эффективности применения допустимых вариантов СЗИ для объекта вычислительной техники

Наименование СЗИ	Время обнаружения угроз	Время нейтрализации угроз	Вычислительные ресурсы, МБ	Эффективность СЗИ
СЗИ 6	6	6	50	0,989109143
СЗИ 7	7	7	40	0,988787763
СЗИ 8	8	8	30	0,98846463
СЗИ 9	9	9	20	0,988139529
СЗИ 10	10	10	10	0,987812236

Выберем среди допустимого множества вариантов СЗИ, которое имеет максимальное значение показателя эффективности. Результаты представлены графически на рис. 2, на котором линия ограничивает слева допустимое множество вариантов СЗИ.

Заключение

В настоящей работе решается задача выбора оптимального СЗИ на объекте вычислительной техники при ограничениях на вычислительные ресурсы. В основе методики используются аналитическая модель реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники, немарковская модель функционирования СЗИ, критерии классов пригодности и превосходства.

Методика учитывает типы угроз информационной безопасности, наличие временных задержек и изменяющуюся интенсивность рабочей нагрузки в переходных и нестационарных режимах функционирования СЗИ. Полученные результаты демонстрируют практическую

эффективность: в примере оптимальный вариант обеспечивает 95 % защиты при 45 МБ ресурсов.

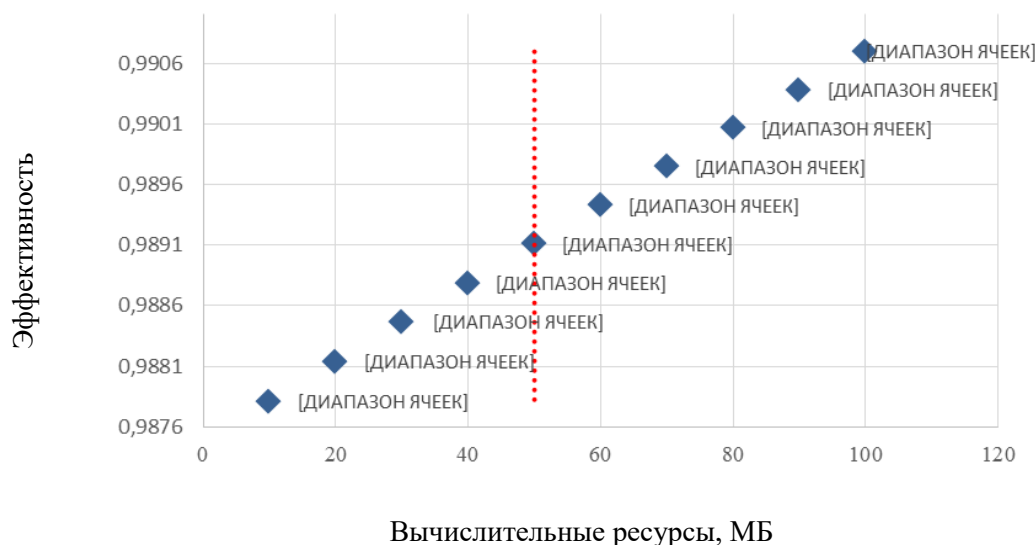


Рис. 2. Выбор оптимального варианта СЗИ

Полученные в работе результаты могут быть использованы при обосновании СЗИ для создаваемых объектов вычислительной техники, включая системы связи. Дальнейшее развитие предложенной методики является применение программного решения по автоматизации выбора оптимального СЗИ на объекте вычислительной техники [23].

Литература

1. Морозов А. В., Панамарев Г. Е., Гусеница Я. Н. Состояние и перспективы развития современной науки в области информационно-телекоммуникационных технологий в Военном инновационном технополисе «ЭРА» // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии». Анапа, 23–24 марта 2023 года. Т. 3. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2023. – С. 7-18.
2. Акиншин Р. Н. Оценка выбора средств защиты информации в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2007. – № 6. – С. 59-62.
3. Антонов А. А. Методика выбора средств защиты информации авиапредприятия на основе метода анализа иерархий // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2023. – № 1. – С. 86-93.
4. Басалова Г. В., Сычугов А. А. Применение методов теории игр для оптимизации выбора средств защиты информации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 11-1. – С. 122-129.
5. Быков А. Ю., Алтухов Н. О., Сосенко А. С. Задача выбора средств защиты информации в автоматизированных системах на основе модели антагонистической игры // Инженерный вестник. – 2014. – № 4. – С. 5.
6. Гагарина Л. Г., Дорогова Е. Г., Маклакова Т. Н. Методические основы выбора средств защиты информации на базе алгоритмов дискретного программирования для создания информационного хранилища данных // Вопросы защиты информации. – 2006. – № 2 (73). – С. 40-41.
7. Зангиев Т. Т., Тарасов Е.С., Сотников В.В. и др. Об одном подходе выбора средств защиты информации // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2018. – № 3. – С. 616-624.

8. Змеев С. А., Селютин И.Н., Скрыль Е.Б. и др. Рациональный выбор средств защиты при структурном синтезе программных систем защиты информации в системах электронного документооборота // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2013. – № 2. – С. 55-59.
9. Кащенко А.Г. Алгоритмы построения множества Парето и выбор оптимального варианта средств защиты информации // Информация и безопасность. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 81-84.
10. Колотилов Ю. В., Кузнецов П.А., Лим В.Г. и др. Использование методов оценки информационного риска для выбора средств защиты информации в среде САПР на предприятиях строительного комплекса // Вопросы защиты информации. – 2003. – № 3 (62). – С. 50-53.
11. Крицкая Л. М., Гоголев В. Н., Поверенный Ю. С. Последовательность анализа критериев при решении задачи формирования процедуры ситуационного управления по выбору средств защиты информации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – № 3 (80). – С. 40-47.
12. Лосева О. А., Батищев Р. В. Подход к решению задачи выбора средств защиты информации методом многокритериального ранжирования // Информация и безопасность. – 2010. – Т. 13. – № 1. – С. 91-96.
13. Лыдин С. С. О проблеме выбора средств защиты информации для инфраструктуры виртуализации // Вопросы защиты информации. – 2017. – № 3 (118). – С. 42-45.
14. Мачульский Е. В. Математическая модель оптимального выбора средств защиты информации в системах хранения данных // In Situ. – 2016. – № 5. – С. 5-7.
15. Нурдинов Р. А. Обоснование целесообразности выбора средств защиты информации // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 81-82.
16. Прокушева А. П., Прокушев Я. Е. Моделирование и оптимизация выбора средств программно-аппаратной защиты информации с точки зрения экономической и технической целесообразности // Информация и безопасность. – 2012. – Т. 15. – № 1. – С. 55-60.
17. Рытов М. Ю., Ковалев П. А., Пугачев А. Ю. Применение метода анализа иерархий для выбора средств защиты информации корпоративного портала // Информация и безопасность. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 68-73.
18. Селифанов В. В., Степанова С.В., Стрихарь Н.А. и др. Особенности выбора средств защиты информации в государственных информационных системах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 18-21.
19. Трапезников Е. В. Выбор средств защиты информации в автоматизированных системах на основе марковских моделей кибератак // Безопасность информационных технологий. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 102-113.
20. Гусеница Я. Н., Ивановский В. С., Семышев Г. Э. Немарковская модель функционирования средств защиты информации // Информационные системы и технологии. – 2024. – № 3 (143). – С. 112-119.
21. Гусеница Я.Н., Елифанов А.Р., Буланый Р.И. Аналитическая модель реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 7. – С. 168-172.
22. Гусеница Я. Н., Хайбуллов О. Д., Семышев Г. Э. Нечеткая модель реализации угроз информационной безопасности на объекте вычислительной техники // Сборник материалов круглого стола «Вопросы защиты информации при применении технологий искусственного интеллекта на аппаратно-программных платформах российского и иностранного производства» научно-деловой программы Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2024». – Анапа: ВИТ «ЭРА». 2024. С. 20-24.
23. Гусеница Я. Н., Семышев Г. Э., Гречкина О. В. «Комплекс компьютерных моделей для обоснования средств защиты информации» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667706; дата поступления 04.07.2024 г., дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.07.2024 г.

References

1. Morozov A. V., Panamarev G. E., Gusenitsa Ya. N. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki v oblasti informatsionno-telekommunikatsionnykh tekhnologiy v Voyennom innovatsionnom tekhnopole "ERA"* [State and prospects of modern science development in the field of information and telecommunication

technologies in the Military Innovative Technopolis "ERA"]. *Sbornik trudov II Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu 'IT-tehnologii'"* (Anapa, 23–24 March 2023). T. 3. Anapa. *Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voyenny innovatsionnyy tekhnopolis 'ERA'"* / 2023. Pp. 7–18 (in Russian).

2. Akishin R. N. *Otsenka vybora sredstv zashchity informatsii v usloviyakh neopredelennosti* [Assessment of information protection means selection under uncertainty]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika*. 2007. No. 6. Pp. 59–62 (in Russian).

3. Antonov A. A. *Metodika vybora sredstv zashchity informatsii aviapredpriyatiya na osnove metoda analiza iyerarkhiy* [Methodology for selecting information protection means for an aviation enterprise based on the analytic hierarchy process]. *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"*. 2023. No. 1. Pp. 86–93 (in Russian).

4. Basalova G. V., Sychugov A. A. *Primenenie metodov teorii igr dlya optimizatsii vybora sredstv zashchity informatsii* [Application of game theory methods for optimizing the selection of information protection means]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016. No. 11-1. Pp. 122–129 (in Russian).

5. Bykov A. Yu., Altukhov N. O., Sosenko A. S. *Zadacha vybora sredstv zashchity informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh na osnove modeli antagonistichnoy igry* [The problem of selecting information protection means in automated systems based on the antagonistic game model]. *Inzhenernyy vestnik*. 2014. No. 4. P. 5 (in Russian).

6. Gagarina L. G., Dorogova E. G., Maklakova T. N. *Metodicheskie osnovy vybora sredstv zashchity informatsii na baze algoritmov diskretnogo programmirovaniya dlya sozdaniya informatsionnogo khranilishcha dannykh* [Methodological basics for selecting information protection means based on discrete programming algorithms for creating a data storage]. *Voprosy zashchity informatsii*. 2006. No. 2 (73). Pp. 40–41 (in Russian).

7. Zangiev T. T., Tarasov E. S., Sotnikov V. V. et al. *Ob odnom podkhode vybora sredstv zashchity informatsii*. [On one approach to selecting information protection means]. *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"*. 2018. No. 3. Pp. 616–624 (in Russian).

8. Zmeev S. A., Selyutin I. N., Skryl E. B. et al. *Ratsionalnyy izbor sredstv zashchity pri strukturnom sinteze programmykh sistem zashchity informatsii v sistemakh elektronnoy dokumentooborota* [Rational selection of protection means in structural synthesis of software information protection systems in electronic document management systems]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii*. 2013. No. 2. Pp. 55–59 (in Russian).

9. Kashchenko A. G. *Algoritmy postroeniya mnozhestva Pareto i vybora optimalnogo varianta sredstv zashchity informatsii* [Algorithms for constructing the Pareto set and selecting the optimal information protection means variant]. *Informatsiya i bezopasnost*. 2009. Vol. 12. No. 1. Pp. 81–84 (in Russian).

10. Kolotilov Yu. V., Kuznetsov P. A., Lim V. G. et al. *Ispolzovanie metodov otsenki informatsionnogo riska dlya vybora sredstv zashchity informatsii v srede SAPR na predpriyatiyakh stroitel'nogo kompleksa* [Using information risk assessment methods for selecting information protection means in CAD environment at construction complex enterprises]. *Voprosy zashchity informatsii*. 2003. No. 3 (62). Pp. 50–53 (in Russian).

11. Kritsaya L. M., Gogolev V. N., Poverenny Yu. S. *Posledovatel'nost analiza kriteriev pri reshenii zadachi formirovaniya protsedury situatsionnogo upravleniya po vyboru sredstv zashchity informatsii* [Sequence of criteria analysis in solving the problem of forming situational management procedures for selecting information protection means]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*. 2009. No. 3 (80). Pp. 40–47 (in Russian).

12. Loseva O. A., Batishchev R. V. *Podkhod k resheniyu zadachi vybora sredstv zashchity informatsii metodom mnogokriterial'nogo rangirovaniya* [Approach to solving the problem of selecting information protection means using multi-criteria ranking method]. *Informatsiya i bezopasnost*. 2010. Vol. 13. No. 1. Pp. 91–96 (in Russian).

13. Lydin S. S. *O probleme vybora sredstv zashchity informatsii dlya infrastruktury virtualizatsii* [On the problem of selecting information protection means for virtualization infrastructure]. *Voprosy zashchity informatsii*. 2017. No. 3 (118). Pp. 42–45 (in Russian).

14. Machulskiy E. V. *Matematicheskaya model optimal'nogo vybora sredstv zashchity informatsii v sistemakh khraneniya dannykh* [Mathematical model of optimal selection of information protection means in data storage systems]. *InSitu*. 2016. No. 5. Pp. 5–7 (in Russian).

15. Nurdinov R. A. *Obosnovanie tselesoobraznosti vybora sredstv zashchity informatsii* [Justification of the feasibility of selecting information protection means]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014. No. 5-1. Pp. 81–82 (in Russian).
16. Prokusheva A. P., Prokushev Ya. E. *Modelirovanie i optimizatsiya vybora sredstv programno-apparatnoy zashchity informatsii s tochki zreniya ekonomicheskoy i tekhnicheskoy tselesoobraznosti* [Modeling and optimization of software-hardware information protection means selection from economic and technical feasibility viewpoint]. *Informatsiya i bezopasnost*. 2012. Vol. 15. No. 1. Pp. 55–60 (in Russian).
17. Rytov M. Yu., Kovalev P. A., Pugachev A. Yu. *Primenenie metoda analiza iyerarkhiy dlya vybora sredstv zashchity informatsii korporativnogo portala* [Application of analytic hierarchy process for selecting information protection means for corporate portal]. *Informatsiya i bezopasnost*. 2014. Vol. 17. No. 1. Pp. 68–73 (in Russian).
18. Selifanov V. V., Stepanova S.V., Strichar N.A. et al. *Osobennosti vybora sredstv zashchity informatsii v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh* [Features of selecting information protection means in state information systems]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018. No. 10. Pp. 18–21 (in Russian).
19. Trapeznikov E. V. *Vybor sredstv zashchity informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh na osnove markovskikh modeley kiberatak* [Selection of information protection means in automated systems based on Markov models of cyberattacks]. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy*. 2023. Vol. 30. No. 4. Pp. 102–113 (in Russian).
20. Gusenitsa Ya. N., Ivanovskiy V. S., Semyyshev G. E. *Nemarkovskaya model funktsionirovaniya sredstv zashchity informatsii* [Non-Markov model of information protection means functioning]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*. 2024. No. 3(143). Pp. 112–119 (in Russian).
21. Gusenitsa Ya. N., Epifanov A. R., Bulanyy R. I. *Analiticheskaya model realizatsii ugroz informatsionnoy bezopasnosti na obekte vychislitelnoy tekhniki* [Analytical model of information security threat implementation on a computing equipment object]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024. No. 7. Pp. 168–172 (in Russian).
22. Gusenitsa Ya. N., Khaibullov O. D., Semyyshev G. E. *Nechyotkaya model realizatsii ugroz informatsionnoy bezopasnosti na obekte vychislitelnoy tekhniki* [Fuzzy model of information security threat implementation on a computing equipment object]. *Sbornik materialov kruglogo stola "Voprosy zashchity informatsii pri primenении tekhnologiy iskusstvennogo intellekta na apparatno-programmnykh platformakh rossiyskogo i inostrannogo proizvodstva" nauchno-delovoy programmy Mezhdunarodnogo voyenno-tekhnicheskogo foruma "ARMIA-2024"*. Anapa. VIT "ERA". 2024. Pp. 20–24 (in Russian).
23. Gusenitsa Ya. N., Semyyshev G. E., Grechkina O. V. *Kompleks komp'yuternykh modeley dlya obosnovaniya sredstv zashchity informatsii* [Complex of computer models for justifying information protection means]. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM*. No. 2024667706. data postupleniya 04.07.2024, data registratsii v Reestre programm dlya EV M 29.07.2024.

Статья поступила 25 июля 2025 г.

Сведения об авторах

Гусеница Ярослав Николаевич – Кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательского отдела. Военный инновационный технополис «ЭРА», Область научных интересов: моделирование систем информационной безопасности, немарковские стохастические процессы, оптимизация средств защиты информации. E-mail: era_otd1@mil.ru.

Адрес: 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр-кт. 41.

Тимонов Андрей Александрович – Кандидат технических наук. Доцент кафедры управляющих ЭВМ. Российский технологический университет – Московский институт радиоэлектроники и автоматики. Область научных интересов: системы управления вычислительной техникой, алгоритмы оптимизации в автоматизированных системах, информационная безопасность в телекоммуникациях.

Адрес: 119454, Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Чикирев Александр Александрович – Независимый специалист. Область научных интересов: защита информации в информационных системах, обеспечение информационной безопасности в автоматизированных системах и объектах информатизации.

Адрес: 129327, Москва, пр-д Чукотский, д. 10.

Methodology for selecting the optimal information protection means for a computing equipment object under constraints on computing resources

Ya. N. Gusenitsa, A. A. Timonov, A. A. Chikirev

Annotation. *In the context of the rapid spread of digital technologies in government and commercial organizations, the problem of ensuring information security is becoming critically important, due to the need to prevent unauthorized access, leakage of confidential information and other threats to cybersecurity. It should also be noted that the improvement of modern technologies entails the formation of new risk factors that lead to a decrease in the level of security of information resources. This creates an objective need to strengthen measures to ensure the information security of computer facilities through the introduction of improved means of protecting information from unauthorized access. At the same time, an important aspect in ensuring information security is the choice of information security tools for computer facilities, which is conditioned by the need to comply with regulatory requirements, information security standards and take into account the specifics of the functioning of specific automated information processing systems. The paper proposes and substantiates a methodology for choosing the optimal information security tool for a computer facility with limitations on computing resources. The methodology is based on an analytical model of the implementation of information security threats at a computer facility, a non-Markov model of the functioning of information security tools, criteria for suitability and superiority classes. The methodology takes into account the types of information security threats, the presence of time delays and the changing intensity of workload in transient and non-stationary modes of operation of information security tools. The results obtained in the work can be used in substantiating the information security tools for the created objects of computer technology. A further development of the proposed methodology is the application of a software solution for automating the selection of the optimal means of information protection at the appropriate computer facility.*

Keywords: *computing equipment object, information security, information protection means, non-Markov model, security threats, computing resources.*

Information about authors

Yaroslav Nikolaevich Gusenitsa – Cand. Sci. (Eng.). Head of the Research Department. Military Innovative Technopolis «ERA». Field of research: information security systems modeling, non-Markovian stochastic processes, optimization of information security tools. E-mail: era_otd1@mil.ru.

Address: 353456, Krasnodar Territory, Anapa, Pionersky Prospect. 41.

Andrey Aleksandrovich Timonov – Cand. Sci. (Eng.). Associate Professor at the Department of Control Computers. Russian Technological University – Moscow Institute of Radio Engineering and Automation. Field of research: computer systems control, optimization algorithms in automated systems, information security in telecommunications.

Address: 119454, Moscow, Vernadsky Ave., 78.

Aleksandr Aleksandrovich Chikirev – An independent specialist. Field of research: information protection in military information systems, information security assurance in automated systems and informatization objects.

Address: 129327, Moscow, Chukotsky Avenue, 10.

Для цитирования:

Гусеница Я. Н., Тимонов А. А., Чикирев А. А. Методика выбора оптимального средства защиты информации для объекта вычислительной техники при ограничениях на вычислительные ресурсы // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 57-66. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-57-66.

For citation:

Gusenitsa Ya. N., Timonov A. A., Chikirev A. A. Methodology for selecting the optimal information protection means for a computing equipment object under constraints on computing resources. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 57-66. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-57-66(in Russian).

ЭЛЕКТРОННЫЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.383.52, 519.248

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-67-74

**Исследование влияния параметров пространственной дискретизации
при оценивании пеленгационной характеристики
матричного фотоприёмного устройства**

Закутаев А. А., Емельянов А. В., Михайлов А. А., Широбоков В. В.

Аннотация. В статье на основе анализа предметной области и исходных данных об основных характеристиках оптической системы исследовано влияние частоты пространственной дискретизации на пеленгационную характеристику матричного фотоприёмного устройства. Сделаны выводы о необходимости учета частоты пространственной дискретизации матричного фотоприёмного устройства при оценке его технических характеристик и формировании требований к его техническому облику. **Постановка задачи:** оценка пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства с учетом параметров пространственной дискретизации. **Целью работы** является совершенствование научно-методического аппарата оценивания пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства. **Используемые методы:** в статье применены известные общенаучные методы системного анализа, теории эффективности целенаправленных процессов, теории вероятностей и математической статистики. **Новизна:** разработан новый подход к оценке пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства с учетом влияния частоты пространственной дискретизации. **Результат** заключается в разработке математического аппарата, позволяющего оценить пеленгационную характеристику матричного фотоприёмного устройства, что в свою очередь повышает точность определения энергетического центра тяжести изображения объекта в плоскости матричного фотоприёмного устройства. **Практическая значимость** состоит в возможности программной реализации предлагаемого математического аппарата и его использования при формировании технического облика матричного фотоприёмного устройства с повышенными техническими характеристиками в зависимости от типов решаемых ими задач.

Ключевые слова: матричное фотоприёмное устройство, оптико-электронные системы, пеленгационная характеристика, пространственная дискретизация.

Актуальность

Оптико-электронные системы (ОЭС), оснащенные матричными фотоприёмными устройствами (МФПУ), нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, а также в военном деле. Достаточно распространенные классы решаемых ими задач связаны с обнаружением или наблюдением удаленных объектов или источников сигнала. Специфика данных задач заключается в особенностях формирования изображения наблюдаемого объекта, когда его угловые размеры пренебрежительно малы по сравнению с элементарным полем зрения, обеспечиваемым ОЭС.

В общем случае на указанный процесс влияет множество факторов, которые условно можно разделить на внешние и внутренние. Основными внешними факторами являются искажения, вносимые атмосферой Земли при прохождении через нее оптического излучения, а также относительная скорость движения объекта наблюдения. К внутренним факторам, прежде всего, относятся эффекты дифракции, зависящие от характеристик ОЭС, а также наличие различных аберраций, зависящих от качества его изготовления.

Несмотря на различную природу, все вышеуказанные факторы приводят к «размытию» регистрируемого оптической системой ОЭС сигнала от объекта наблюдения в плоскости МФПУ, что затрудняет решение соответствующих целевых задач. В данных условиях

возрастает негативное влияние дискретной структуры МФПУ, заключающееся в потере части полезного сигнала за счет наличия нечувствительных к оптическому излучению зон, расположенных между его фоточувствительными элементами (ФЧЭ). Само МФПУ при этом можно рассматривать как элемент оптического тракта, выполняющий пространственную фильтрацию, которая может быть описана соответствующей пеленгационной характеристикой, под которой понимается зависимость энергетической освещенности области МФПУ от габаритных характеристик фоточувствительных элементов и расстояний между ними. Несмотря на значительные достижения в области развития технологий производства полупроводниковой техники, полная ликвидация вышеуказанных зон в настоящее время невозможна. Учет данной проблемы при проведении различных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в нашей стране имеет повышенную актуальность по причине технологического отставания отечественных предприятий промышленности от мирового уровня, а также санкционной политики иностранных государств.

Очевидно, что эффективность ОЭС при решении целевых задач, прежде всего, определяется качеством проведения исследований при обосновании их технического облика. Одним из способов повышения оперативности и ресурсоемкости их разработки является моделирование отдельных процессов функционирования ОЭС. Исследованию различных аспектов в данной предметной области, в том числе учету влияния пеленгационной характеристики МФПУ, посвящено большое количество работ. Вместе с тем, в большинстве случаев при разработке соответствующих моделей вопросы выбора частоты пространственной дискретизации распределения оптического излучения в плоскости МФПУ не рассматриваются. Однако, именно она определяет размерность исходной выборки для получения статистических оценок, а, соответственно, и их точность. Кроме того, частота пространственной дискретизации влияет на вычислительную сложность алгоритма в модели, а, следовательно, на ресурсоемкость и оперативность процесса моделирования в целом.

Таким образом, исследования вопросов влияния параметров пространственной дискретизации при оценивании пеленгационной характеристики МФПУ являются актуальными и имеют практическую направленность. Актуальность вышеуказанного направления обуславливает цель работы – совершенствование научно-методического аппарата оценивания пеленгационной характеристики МФПУ.

Анализ существующего задела в рассматриваемой предметной области

Вопросам влияния пеленгационной характеристики МФПУ на функционирование ОЭС при регистрации излучения от точечных источников посвящено большое количество работ [17]. Несмотря на достаточно широкий спектр прикладных задач, рассмотренный при проведении указанных исследований, вариативность использованных подходов к учету пеленгационной характеристики МФПУ при оценивании выбранных показателей эффективности является весьма ограниченной.

В работах [2, 3, 7] влияние пеленгационной характеристики на величину регистрируемого МФПУ сигнала от точечного источника излучения рассмотрено только для экстремальных случаев – наилучшего взаимного положения центров изображения и ФЧЭ (когда они совпадают) и наихудшего.

Учет влияния пеленгационной характеристики МФПУ при различных вариантах положения центра изображения точечного объекта относительно центра ФЧЭ был реализован в работе [5]. Всего было рассмотрено пять таких вариантов, при этом величина шага смещения задавалась не в абсолютных величинах (мкм), а в относительных – как соотношение к линейному размеру (ширине) ФЧЭ. Также в качестве ограничений при проведении численных расчетов в качестве функции рассеяния точки (ФРТ) была выбрана гауссоида, а диапазон смещений был ограничен только пределами ФЧЭ.

В работе [1] в составе разработанной модели представлена совокупность функциональных зависимостей, позволяющих выполнять численный расчет пеленгационной

характеристики МФПУ для любого взаимного положения центров изображения точечного объекта и ФЧЭ. Процесс вычисления доли энергии сигнала от точечного объекта, приходящегося на фоточувствительную поверхность ФЧЭ, основан на использовании специфической функции $\text{erf}()$:

$$g(\theta_x, \theta_y) = \frac{1}{4} \left[\text{erf} \left(\frac{B_x + 2\theta_x}{d} \right) + \text{erf} \left(\frac{B_x - 2\theta_x}{d} \right) \right] \times \\ \times \left[\text{erf} \left(\frac{B_y + 2\theta_y}{d} \right) + \text{erf} \left(\frac{B_y - 2\theta_y}{d} \right) \right], \quad (1)$$

где $g(\theta_x, \theta_y)$ – функция, описывающая двумерную пеленгационную характеристику; B_x, B_y – линейные размеры ФЧЭ по горизонтали и вертикали, соответственно; θ_x, θ_y – расстояние от центра ФЧЭ до центра изображения точечного объекта; d – диаметр изображения точечного объекта в плоскости МФПУ; $\text{erf}()$ – функция ошибок, имеющая вид:

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

Однако итоговые оценки вероятности обнаружения были получены только для двух граничных случаев. Вероятностный характер положения центра изображения точечного объекта наблюдения не рассматривался. Также расчет пеленгационной характеристики с использованием функции $\text{erf}()$ возможен только в случае, когда вид ФРТ может быть аппроксимирован гауссоидой.

Оценка пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства с учетом параметров пространственной дискретизации

При исследовании влияния пеленгационной характеристики МФПУ на обнаружительные возможности ОЭС как фактора, имеющего вероятностную природу, в работах [4, 6] в качестве критерия для выбора величины шага при пространственной дискретизации было принято значение $1/10$ линейного размера ФЧЭ. Указанное решение было обосновано согласованностью со степенью дискретизации ФРТ, которая согласно [8] позволяет учитывать ее характер даже при наличии различных аберраций.

Для моделирования оценки пеленгационной характеристики ФПУ каждый ФЧЭ разбивается на 4 равные части. Поскольку характер «растекания» пятна рассеяния имеет круговую структуру, то для оценивания значений энергетической освещенности в пределах ФЧЭ достаточно оценить его в одной из четвертей, например, для правой верхней четверти, а также до середины расстояний между ФЧЭ (рис. 1).

Распределение интенсивности энергии в плоскости МФПУ описывается через функции Бесселя первого порядка $J_1(\cdot)$ в виде дифракционных картин – дисков Эйри. Интенсивность в точке P интерференционной картины (диска Эйри) определяется выражением

$$I(\rho) = I_0 \left[\frac{2J_1(\pi r / \lambda f)}{\pi r / \lambda f} \right]^2,$$

где r – радиус-вектор точки ρ в фокальной плоскости телескопа $f = F/d$, где F – фокусное расстояние объектива ОЭС, d – диаметр объектива ОЭС, I_0 – интенсивность в центре

дифракционной картины на единицу телесного угла, $J_\sigma(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+\sigma} \frac{1}{n!(n+\sigma)!}$, где x –

абсцисса точки P в плоскости МФПУ в зависимости от удаления от центра пятна рассеяния, n – количество итераций расчета значений функции, определяющее ее точность.

Значения интенсивности энергии в ячейках разбиения плоскости ФЧЭ могут быть представлены в виде таблицы (табл. 1).

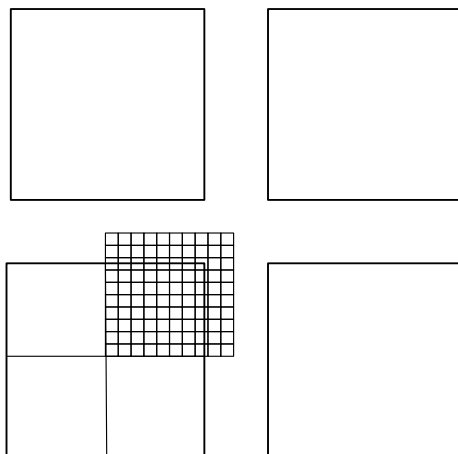


Рис. 1. Схема расположения ФЧЭ с выделенным оцениваемым участком

Таблица 1 – Пример таблицы значений интенсивности энергии в ячейке

I_{11}	I_{12}	I_{13}	...	I_{1j}
I_{21}	I_{22}	I_{23}	...	I_{2j}
I_{31}	I_{32}	I_{33}	...	I_{3j}
...	...	...	...	...
I_{i1}	I_{i2}	I_{i3}	...	I_{ij}

Далее построчно осуществляется подсчет количества ячеек, значения интенсивности энергии в которых отвечают условиям нахождения в определенных интервалах, например, вычисляется

$$k_{\text{яч}1} \left(0 < \sum_{j=1}^n I_{1j} \leq 0,01 \right) - \text{для первой строки,}$$

$$k_{\text{яч}i} \left(0,99 < \sum_{i=1}^m I_{i1} \leq 1 \right) - \text{для } i\text{-й строки.}$$

Вероятность нахождения значений интенсивности энергии в заданных интервалах определяется так же построчно по формулам:

$$p_1 = \frac{k_{\text{яч}1} \left(0 < \sum_{j=1}^n I_{1j} \leq 0,01 \right)}{n \cdot m} - \text{для 1-й строки,}$$

$$p_i = \frac{k_{\text{яч}i} \left(0,99 < \sum_{i=1}^m I_{i1} \leq 1 \right)}{n \cdot m} - \text{для } i\text{-й строки,}$$

где n и m – количество ячеек разбиения области ФЧЭ по горизонтали и вертикали соответственно.

Далее построчно находится плотность нахождения значений вероятности в различных областях значений интенсивности энергии в соответствии с выражением:

$$p = p_i - p_{i-1}.$$

Оценивание пеленгационной характеристики МФПУ проводилось для исходных данных в соответствии с табл. 2. Очевидно, что с увеличением количества ячеек разбиения график функции становится более гладким, т. е. повышается точность статистических оценок значений интенсивности энергии.

Таблица 2 – Основные характеристики моделируемого ОЭС

Наименование характеристики	Значение
Диаметр входного зрачка телескопа, м	0,36
Фокусное расстояние, м	2
Рабочая длина волны, мкм	0,535
Линейный размер ФЧЭ, мкм	6х6

Разбивая оцениваемый участок на различное количество ячеек, получим соответствующие графики плотности вероятности (рис. 2).

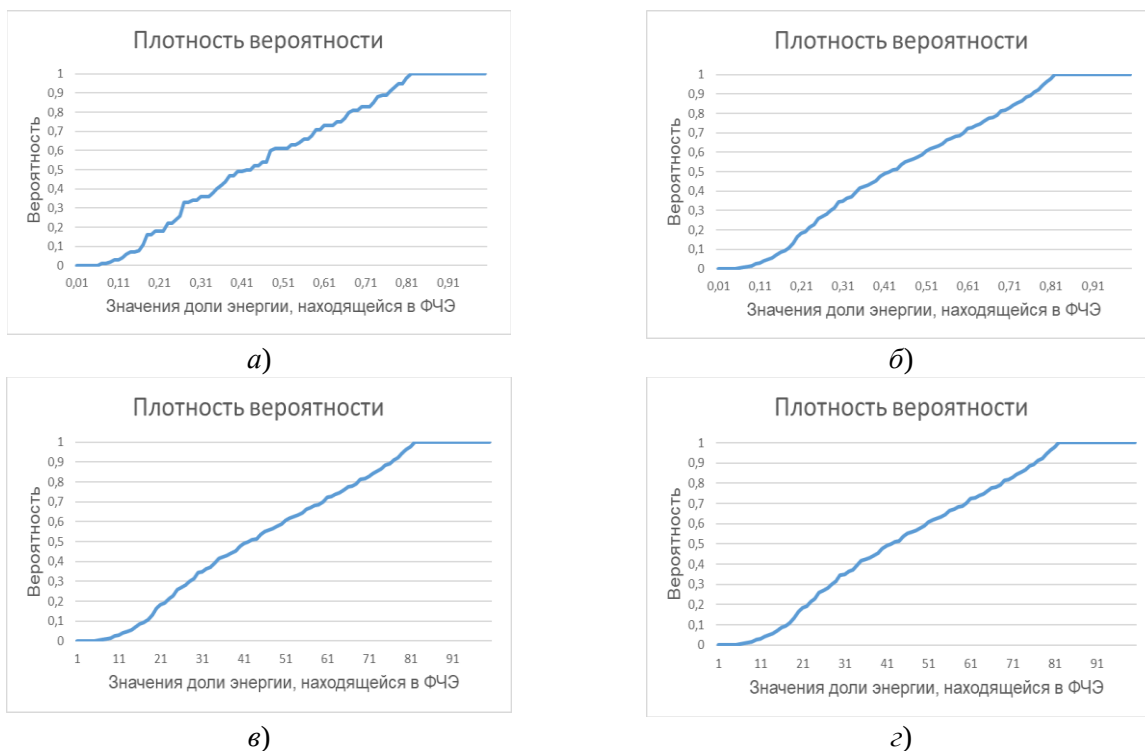


Рис. 2. Графики плотности вероятности принятия различных значений доли энергии в ФЧЭ при разбиении: а) 10х10, б) 20х20, в) 40х40, г) 80х80

Для большей наглядности проведено масштабирование графика в интервале вероятностей 0,45-0,61 (рис. 3).

Из рисунка видно, насколько точнее пролегает график при увеличении частоты пространственной дискретизации.

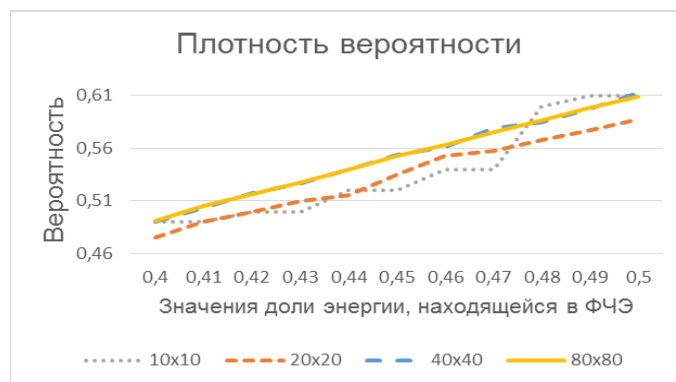


Рис. 3. Масштабированный график плотности вероятности принятия различных значений доли энергии при изменении частоты пространственной дискретизации

Выводы

В статье на основе анализа исследований пеленгационной характеристики МФПУ решена задача оценки влияния частоты пространственной дискретизации распределения оптического излучения в плоскости МФПУ и предложен подход к повышению точности получаемых статистических оценок.

Показано, что частота разбивки области, в которой оценивается пеленгационная характеристика, влияет на точность получаемых оценок и, как следствие, на точность определения координат центра пятна рассеяния в плоскости МФПУ. С повышением частоты пространственной дискретизации (в зависимости от количества ячеек разбиения), повышение точности оценок составляет до 7 %.

Однако, с увеличением количества ячеек разбиения повышается и вычислительная сложность алгоритмов, используемых при моделировании, а также оперативность их работы. Соответственно, выбор частоты пространственной дискретизации должен осуществляться с учетом их достаточности для решаемых задач выявления и идентификации объектов, а также вычислительных возможностей аппаратной части.

Литература

1. Дахин А. М., Фантиков О. И. Влияние дискретности фотоприемника на пороговую чувствительность телевизионной системы обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения, вып. 1. СПб.: НИИТ, 1983. С. 50-59.
2. Баранов П. С., Манцветов А. А. Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пикселя для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С. 49-53.
3. Старовойтов Е. И., Юрчик И. А. Метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта лазерной локационной системой с линейкой фотодетекторов // Радиостроение. 2019. № 1. С. 1-18.
4. Закутаев А. А., Емельянов А. ., Михайлов А. А. Влияние шовности матричных фотоприемных устройств на обнаружительные характеристики оптико-электронных средств // Радиолокационное исследование природных сред : Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Клюева Николая Фомича, Санкт-Петербург, 19–20 апреля 2023 года. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2024. С. 305-310.
5. Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П., Синельщиков В. В. Особенности обнаружения точечных объектов в изображениях, формируемых матричным приёмником // Автометрия. 2016. Т. 52, № 2. С. 10-19.
6. Закутаев А. А., Михайлов А. А., Лизан В. М. Исследование вопросов обнаружения удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения оптико-электронного средства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 268-273.
7. Гридин А. С., Дмитриев И. Ю., Васильев В. Н. Влияние пеленгационных характеристик и разброса чувствительности элементов фотоприемника на распределение пороговой чувствительности оптико-электронного прибора // Труды VII Международной конференции «Прикладная оптика-2006». СПб.: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2007. Т. 1. С. 139-144.
8. Домненко В. М., Бурсов М. В. Моделирование формирования оптического изображения: уч. пособ. СПб.: СПбГУ ИТМО. 2005. 128 с.

References

1. Dakhin A. M., Fantikov O. I. Influence of the photodetector discreteness on the threshold sensitivity of a television detection system. Radioelectronics issues. Series: Television engineering, Issue 1. St. Petersburg: NIIT, 1983. Pp. 50-59 (in Russian).
2. Baranov P. S., Manzvetov A. A. Optimization of the ratio of the lens scattering circle radius to the pixel size for improving the accuracy of estimating the coordinates of small-size objects. Izvestiya Vuzov Rossii. Radio electronics. Issue 2, 2016. Pp. 49-53 (in Russian).

3. Starovoytov E. I., Yurchik I. A. Loss-reducing method in detecting dynamic point object by a laser ranging system based on a line of photo-detectors. Radioengineering. 2019. No. 1. Pp. 1-18 (in Russian).

4. Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Mikhailov A. A. The influence of seaminess of matrix photodetectors on the detection characteristics of optical and electronic devices. Radar research of natural environments: Proceedings of the XXXIII All-Russian symposium dedicated to the 100th anniversary of the birth of Nikolai Fomich Klyuev, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg, April 19–20, 2023. Mozhaisky High School of Fine Arts, 2024. pp. 305-310 (in Russian).

5. Ivanov V. A., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Sinel'shchikov V. V. Specific features of detecting point objects in images formed by a detector array. Automation. 2016. Vol. 52. No. 2. pp. 10-19 (in Russian).

6. Zakutaev A. A., Mikhailov A. A., Lizan V. M. Study of the issues of detecting remote objects under conditions of a priori uncertainty of their position in the field of view of an optical-electronic means. Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 10. Pp. 268-273 (in Russian).

7. Gridin A. S., Dmitriev I. Yu., Vasilyev V. N. Effect of co-ordinate characteristics and spread values of sensitivity of photodetector's elements on distribution of threshold sensitivity of optoelectronic device. Tr. VII Intern. Conf. "Applied Optics-2006". SPbGU ITMO (TU), 2007. Vol. 1. pp. 139-144 (in Russian).

8. Domnenko V. M., Bursov M. V. Modeling of optical image formation. St. Petersburg. SPbGU ITMO, 2005. 128 p. (in Russian)

Статья поступила 10 сентября 2025 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.

Михайлов Александр Александрович – Младший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Область научных интересов: совершенствование программно-алгоритмического обеспечения оптико-электронных средств. Тел. +7-981-755-23-34. E-mail: lol.ichi@yandex.ru.

Широбокров 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, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

Research of the influence of spatial sampling parameters when estimating the direction finding characteristic of a matrix photodetector

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

Annotation: In the article, based on the analysis of the subject area and the initial data on the main characteristics of the optical system, the influence of the spatial sampling frequency on the direction-finding characteristic of the photodetector array was investigated. Conclusions were drawn on the need to take into account the frequency of spatial sampling of the matrix photodetector when assessing its technical characteristics and forming requirements for its technical appearance. **Problem statement:** evaluation of direction-finding characteristic of a matrix photodetector taking into account spatial sampling parameters. The purpose of the work is to improve the scientific and methodological apparatus for assessing the direction-finding characteristics of a matrix photodetector. **Methods used:** the article uses well-known general scientific methods of system analysis, the theory of the effectiveness of targeted processes, probability theory and mathematical statistics. **Novelty:** a new approach has been developed to assess the direction-finding characteristic of a matrix photodetector, taking into account the influence of the spatial sampling frequency. **The result** is the development of a mathematical apparatus which enables to estimate the direction-finding characteristic of a photodetector array, which in turn increases accuracy of determining the energy centre of gravity of an object image in the plane of the photodetector array. **Practical significance** lies in the possibility of software implementation of the proposed mathematical apparatus and its use in forming the technical appearance of a matrix photodetector with improved technical characteristics depending on the types of tasks they solve.

Keywords: matrix photodetector, optoelectronic systems, direction-finding characteristic, spatial sampling.

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. Tel: +7-952-355 22- -92. 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. Tel.: +7-911-283-65-95. E-mail: slash1@inbox.ru.

Alexandr Alexandrovich Mikhailov – junior research assistant of the Military Institute (Research) of Military Space Academy of Mozhaisky. Research interests: improving software and algorithmic support of optoelectronic means. Tel.: +7-981-755-23-34. E-mail: lol.ichi@yandex.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. Tel.: +7-981-761-28 41.- E-mail: 17126vlad@gmail.com.

Address: 197198, Saint-Petersburg, st. Zhdanovskaya, d. 1

Для цитирования:

Закутаев А. А., Емельянов А. В., Михайлов А. А., Широбоков В. В. Исследование влияния параметров пространственной дискретизации при оценивании пеленгационной характеристики матричного фотоприёмного устройства // Техника средств связи. 2025. № 2 (170). С. 67-74. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-67-74.

For citation:

Zakutaev A. A., Emelyanov A. V., Mikhailov A. A., Shirobokov V. V. Research of the influence of spatial sampling parameters when estimating the direction finding characteristic of a matrix photodetector. Means of communication equipment. 2025. № 2 (170). Pp. 67-74 (in Russian). DOI:10.24412/2782-2141-2025-3-67-74.

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

УДК 627.726

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-75-85

**Технология VDES: характеристики, перспективы развития
в судоходстве России**

Малышев С. А., Годияк А. В.

Аннотация: **Введение:** Современное судоходство всё активнее внедряет цифровые технологии для повышения безопасности, эффективности и экологичности морских и речных перевозок. Федеральное агентство морского и речного транспорта Минтранса России активно развивает систему управления судоходством, однако существующие технологии, такие как автоматическая идентификационная система, имеют ограничения по пропускной способности, защищённости и функциональности. Одной из ключевых инноваций в этой сфере становится технология VHF Data Exchange System – система обмена данными в диапазоне ультракоротких волн, разработанная Международной морской организацией и Международным союзом как развитие традиционной автоматической идентификационной системы. В условиях растущего трафика, расширения Северного морского пути и необходимости модернизации инфраструктуры морской связи, система обмена данными в диапазоне ультракоротких волн представляет собой стратегически важный элемент цифровой трансформации российского флота. **Целью работы** является анализ технических характеристик системы обмена данными в диапазоне ультракоротких волн перспектив внедрения данной технологии в системах управления судоходством Федерального агентства морского и речного транспорта Минтранса России, оценка её технических и экономических преимуществ, а также определение ключевых направлений практического применения для повышения безопасности, экологичности и эффективности морских и речных перевозок в Российской Федерации. **Результат:** Проведённый анализ показал, что система обмена данными в диапазоне ультракоротких волн обеспечивает значительное расширение функциональности по сравнению с автоматической идентификационной системой: более высокую пропускную способность, двустороннюю связь, поддержку зашифрованных сообщений и интеграцию с системами автоматической идентификации, дифференциальной коррекции и безопасного обмена данными. Внедрение системы обмена данными в диапазоне ультракоротких волн в российских водах, особенно на Северном морском пути, позволит повысить безопасность судоходства, снизить риск аварий и улучшить управление движением судов в условиях ограниченной связи и сложной навигационной обстановки. Внедрение данной технологии позволит создать единую цифровую платформу, поскольку она интегрируется с системами e-Navigation, морскими информационными сервисами и системами управления портами. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы при разработке программы инновационного развития предприятия по освоению новых востребованных технологий цифровизации морского транспорта, проектированию береговой инфраструктуры связи и навигации, а также при модернизации бортового оборудования судов. Внедрение системы обмена данными в диапазоне ультракоротких волн создаст основу для построения интеллектуальных транспортных систем в морском секторе, повысит конкурентоспособность российского судоходства и обеспечит соответствие международным стандартам безопасности.

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, безопасность судоходства, глобальная морская система связи при бедствии, морская связь, системы обмена данными в диапазоне ультракоротких волн, судоходство, цифровизация, e-Navigation.

Введение

Глобальная морская система связи при бедствии (ГМССБ), введённая Международной морской организацией (ИМО) в 1992 году, стала основой обеспечения

безопасности мореплавания. Система объединила радиосвязь, спутниковую связь, автоматическую идентификацию судов и системы оповещения о бедствиях (например, *EPIRB* и *SART*).

Современное судоходство всё более интегрируется в цифровую экосистему, где ключевую роль играют технологии связи, мониторинга и автоматизации. Традиционные системы, такие как автоматическая идентификационная система (*AIS*), уже не в полной мере отвечают требованиям растущего объёма данных, повышения безопасности и эффективности управления судоходством. В ответ на эти вызовы разработана технология *VDES* (*VHF Data Exchange System*) – расширенная цифровая система обмена данными в диапазоне ультракоротких волн (УКВ), предложенная Международной ассоциацией по морской навигации (*IALA*) и одобренная ИМО и Международным союзом электросвязи (МСЭ). *VDES* представляет собой эволюционное развитие *AIS* и открывает новые возможности безопасного, эффективного и устойчивого судоходства в рамках концепции *e-Navigation*. Её внедрение может стать важным шагом в модернизации морской инфраструктуры России, особенно в условиях активного освоения Арктики и развития Северного морского пути (СМП).

1. Основные недостатки глобальной морской системы связи при бедствии

Несмотря на свою надёжность, ГМССБ сталкивается с рядом проблем:

- 1) ограниченная пропускная способность – использование аналоговых каналов и узкополосных цифровых систем (например, *DSC*, *NBDP*) не позволяет передавать большие объёмы данных;
- 2) перегрузка каналов *AIS* – в районах интенсивного судоходства (например, в проливах, портовых зонах) каналы *AIS* (161,975 МГц и 162,025 МГц) перегружены, что приводит к потере сообщений;
- 3) отсутствие двусторонней высокоскоростной связи – невозможность организации обмена структурированными данными между судами и берегом в реальном времени;
- 4) недостаточная поддержка автономных и дистанционно управляемых судов – ГМССБ не обеспечивает требования к непрерывной связи, необходимой для удалённого управления;
- 5) зависимость от устаревших технологий – многие компоненты ГМССБ основаны на устаревших стандартах, несовместимых с современными цифровыми платформами.

2. Обзор технологии VDES

2.1. Архитектура и технические характеристики системы VDES

Технология *VHF Data Exchange System*, известная в русскоязычной литературе как Автоматическая система обмена данными (АСОД), представляет собой значительное эволюционное усовершенствование существующей системы автоматической идентификации (*AIS*) [8].

В отличие от *AIS*, которая является односторонней системой широкоэвещательной связи, *VDES* по своей архитектуре – это двухсторонняя система обмена данными. Этот факт открывает новые возможности для оперативного управления и контроля в морских операциях [1, 2]. Функции *VDES* графически представлены на рис. 1 [3].

Система *VDES* строится на трех основных компонентах: стандартные каналы *AIS*, специальные сообщения (*Application Specific Messages, ASM*) и обмен данными (*VDE*) [4-6]. Каждый из этих компонентов занимает свою полосу частот в общем диапазоне и использует для оптимизации производительности различные методы модуляции.

Структура частотного спектра *VDES* обеспечивает совместимость с существующими системами и расширяет их возможности. Для этого выделены четыре пары частотных каналов. Две из них полностью совпадают с двумя основными каналами *AIS* – канал 87В (161,975 МГц) и канал 88В (162,025 МГц) [6]. Эти каналы используются для передачи стандартных идентификационных сообщений, аналогично текущей *AIS*, обеспечивая обратную совместимость. Ключевым нововведением является разделение канала для повышения надежности. Это позволяет осуществлять широкополосную передачу критически важных, но не являющихся обязательными для всех судов сообщений, таких как предупреждения о навигационных опасностях или гидрографические данные, без загрузки основного канала [4, 6]. Таким образом, создаются каналы 2027 (161,950 МГц) и 2028 (162,000 МГц) [6, 7].

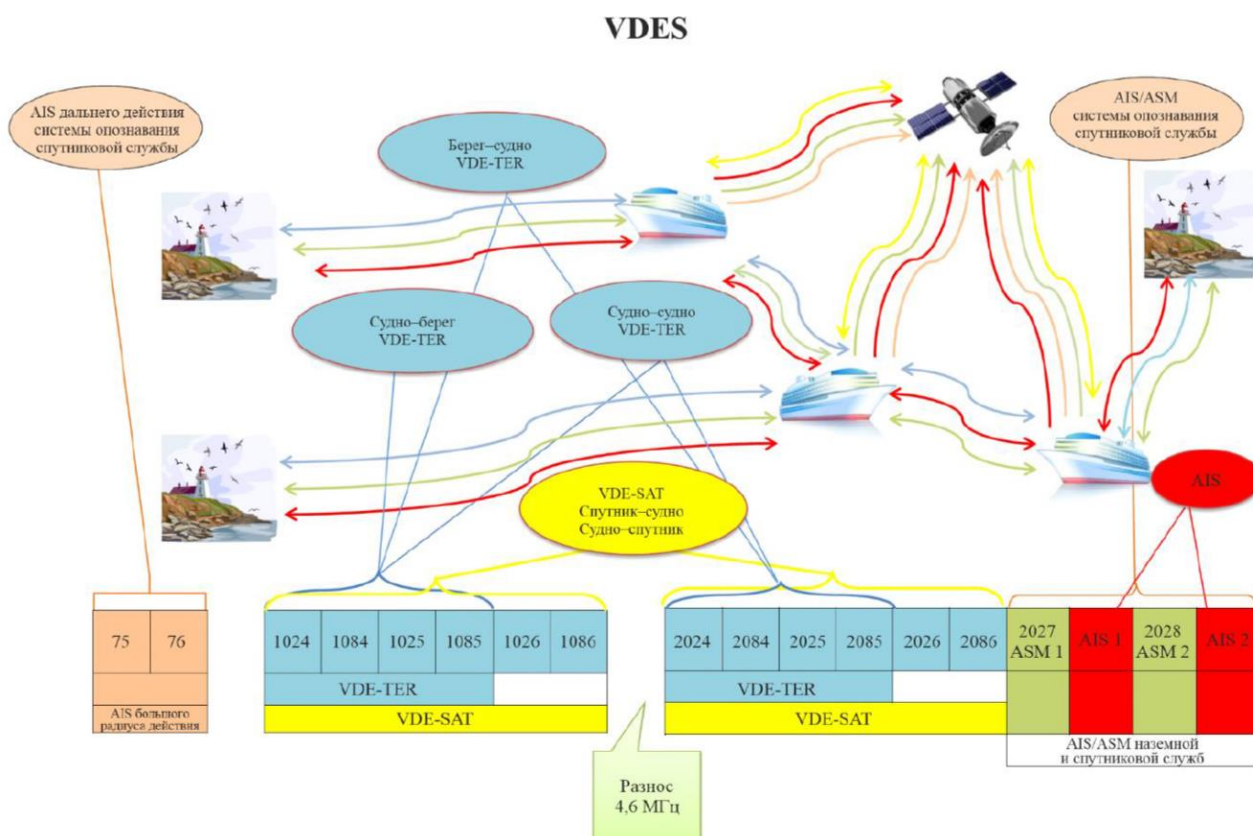


Рис. 1. Иллюстрация функций системы обмена данными в ОБЧ-диапазоне

Наконец, самые нижние и самые верхние частоты диапазона 156–162 МГц отведены для наземного сегмента обмена данными (*VDE-Terrestrial*, *VDE-TER*). Этот сегмент работает в диапазонах 157,200–157,275 МГц (направление «судно-берег») и 161,800–161,875 МГц (включая направления «судно-судно» и «берег-судно») [6, 7]. Ширина полосы частот каждого канала *VDE* составляет 100 кГц, что вдвое больше, чем у каналов *AIS* и *ASM* (по 25 кГц), что напрямую влияет на увеличение пропускной способности.

Характеристики рассматриваемых сервисов представлены в табл. 1.

В области сетевых протоколов *VDES* сохраняет структуру *TDMA*-кадрирования с временным разделением каналов (*TDMA*), заложенную в рекомендации *ITU-R M.1371*, которая является основой для *AIS* [6, 8]. В рамках одной минуты создается 2250 слотов *TDMA*, что обеспечивает высокую плотность пакетов и возможность одновременной передачи данных для большого числа пользователей [6]. Тайм-слот *TDMA* имеет длительность 26,667 мс и синхронизирован по всемирному координированному времени

(UTC), что критически важно для согласованной работы сети [7]. Для управления доступом к каналам VDE вводятся специализированные логические каналы: канал ширококвещательной доски объявлений (TBB), канал распределения каналов (ASC), канал случайного доступа (RACH) и пять каналов пользовательских данных (UDCH) [6]. Такая структура позволяет эффективно организовывать как ширококвещательный, так и адресный обмен данными, обеспечивая необходимые приоритеты для различных типов информации. Кроме того, VDE поддерживает дуплексную связь через использование пары каналов VDE1a/VDE1b, что является фундаментальным отличием от однонаправленного режима работы AIS [6].

Таблица 1 – Характеристики сервисов

Компонент	Назначение	Диапазон (МГц)	Ширина полосы	Модуляция
AIS	Обязательный обмен идентификационной информацией	161.975 (AIS 1), 61.975 (AIS 1)	25 кГц	GMSK
ASM	Широковещательная передача прикладных сообщений	161.950 (ASM 1), 162.000 (ASM 2)	25 кГц	$\pi/4$ -DQPSK
VDE-Terrestrial (VDT-TER)	Двусторонний обмен данными (адресный, ширококвещательный)	157.200–157.275 (Tx), 161.800–161.875 (Rx)	100 кГц	$\pi/4$ -QPSK, 8PSK, 16QAM
VDE-Satellite (VDE-sat)	Двусторонняя спутниковая связь	157.200–157.325 (Tx), 161.800–161.925 (Rx)	150 кГц	Не указано в источниках

2.2. Пропускная способность и методы модуляции. Преодоление ограничений AIS

Ключевым технологическим преимуществом VDES, которое определяет ее потенциал для будущего морского цифрового пространства, является кардинальное увеличение пропускной способности по сравнению с AIS. Если стандарт AIS обеспечивает скорость передачи данных всего 9,6 кбит/с, то VDES предлагает потенциал в 32 раза больше [1, 6]. На практике увеличение пропускной способности выражается в достижении скоростей до 210,6 кбит/с для наземного сегмента VDE-TER (Link Id 19) и до 94,70 кбит/с для восходящей линии связи спутникового сегмента VDE-SAT (Link Id 20) [6]. Другие источники указывают на максимальную скорость для VDE-TER в 307,2 кбит/с [6, 7]. Это огромное увеличение пропускной способности решает одну из главных проблем современной морской радиосвязи – перегрузку VDL-каналов в районах с высокой концентрацией судов, таких как Гибралтарский пролив или Ла Манш [1]. Возможность передавать значительно больший объем данных открывает дорогу для внедрения новых, более сложных и информационно-насыщенных сервисов, которые ранее были невозможны из-за технических ограничений.

Это кардинальное повышение производительности достигается за счет применения более совершенных методов модуляции. Если для передачи стандартных сообщений используется относительно простая и помехоустойчивая фазовая манипуляция с минимальной симметрией (GMSK), то для более требовательных каналов VDE применяются многоуровневые квадратурные фазовые модуляции [5, 6]. Конкретные схемы модуляции, указанные в источниках, включают $\pi/4$ -DQPSK для каналов ASM, а также $\pi/4$ -QPSK, 8PSK и 16QAM для каналов VDE [6, 7]. Использование этих более сложных модуляций позволяет кодировать большее количество битов в каждом символе, что напрямую увеличивает скорость передачи данных. Например, 16QAM может передавать 4 бита на символ, в то время как $\pi/4$ -QPSK – только 2 бита на символ. Эта гибкость в выборе модуляции позволяет адаптировать канал связи к текущим условиям: в условиях плохого качества сигнала можно переключаться на более простые и помехоустойчивые схемы

(например, $\pi/4$ -QPSK или GMSK), а при хорошем качестве канала – использовать 16QAM для получения максимальной скорости.

Помимо прямого увеличения скорости, VDES вносит важные изменения в архитектуру передачи данных. Одним из таких изменений является переход от схемы *slotted Aloha* (S-ALOHA), используемой в AIS, к более сложным протоколам управления доступом к среде. В VDES предусмотрены логические каналы, такие как ASC (*Assignment Channel*) и RACH (*Random Access Channel*), которые позволяют централизованно управлять доступом к основным каналам пользовательских данных (UDCH) [6]. Это снижает вероятность коллизий и повышает общую эффективность использования канала. Кроме того, сама структура кадрирования была оптимизирована: в минуте теперь используется 2250 слотов TDMA вместо 2000 в старой системе, что также вносит свой вклад в повышение пропускной способности [6]. Увеличение ширины полосы канала VDE с 25 кГц (как у AIS) до 100 кГц также играет значительную роль, поскольку пропускная способность прямо пропорциональна ширине полосы [6]. Таким образом, VDES представляет собой не просто замену AIS, а целостную переоценку подходов к организации морской радиосвязи, направленную на создание открытой, масштабируемой и безопасной платформы для цифровых услуг в морских перевозках.

2.3. Безопасность, интеграция и применение в e-Navigation

Несмотря на то, что повышение пропускной способности и обеспечение двусторонней связи являются ключевыми улучшениями, еще одним критически важным аспектом VDES является ее встроенная функциональность безопасности. В отличие от AIS, где все сообщения передаются в открытом виде, делая их уязвимыми для подделки, VDES изначально проектируется с поддержкой механизмов аутентификации и шифрования [4, 6]. Это позволяет повысить целостность данных и защитить информацию от несанкционированного доступа, в том числе и мошенничества. Процесс аутентификации особенно важен для борьбы с проблемой «случайного» или преднамеренного отключения AIS рыболовными судами, что создает опасные ситуации для других кораблей [1]. VDES решает эту проблему, позволяя отправителю подписать свое сообщение цифровой подписью, которую получатель может проверить, убедившись в легитимности источника данных [4]. Для реализации этих механизмов могут использоваться такие протоколы, как TESLA (*Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication*), обеспечивающий быструю и эффективную аутентификацию потоковых данных [6]. Эта встроенная криптографическая защита является обязательным условием для доверительного обмена критически важной информацией, такой как данные GNSS-аугментации, маршруты судов и предупреждения о навигационных опасностях [6, 7]. VDES рассматривается как ключевой технологический фундамент для реализации концепции *e-Navigation*, которая является стратегической целью Международной морской организации [4, 6]. *E-Navigation* стремится интегрировать все навигационные средства и услуги в единую цифровую экосистему для повышения безопасности и эффективности судоходства [4, 5]. VDES предоставляет именно тот интерфейсный уровень, который необходим для подобной интеграции. VDES способна служить универсальной шиной для обмена данными между различными системами: электронными картами (ECDIS), системами наблюдения за водным транспортом (VTS), береговыми станциями и другими судами [2, 6]. Это позволяет создавать комплексные сервисы, такие как передача обновленных электронных навигационных карт, обмен маршрутами между судном и портом в соответствии со стандартами IEC 61174 и IEC 63173 1, передача метеорологических данных и SAR-информации [6]. Благодаря своей гибкости VDES может быть легко интегрирована в более крупные концепции, такие как *Maritime Connectivity Platform* (MCP), которая использует протоколы MMTP (*Maritime Message*

Transport Protocol) и *SMMP* (*Satellite Maritime Mobile Service Protocol*) для унифицированной передачи данных [6].

Будущее развитие *VDES* предполагает ее дальнейшую интеграцию с другими технологическими платформами, в первую очередь с мобильными сетями пятого поколения (5G) [1]. Эта сеть будет способна автоматически выбирать оптимальный канал связи для передачи конкретного типа на основе множества факторов, таких как местоположение судна, загруженность каналов и приоритет сообщения. Например, для передачи критически важных данных о столкновении может быть выбрана наземная связь *VDE-TER*, тогда как для доставки обновлений карт в открытом океане – спутниковая связь *VDE-SAT*. Эта возможность ретрансляции сообщений и автоматического выбора канала (*link selection*) является ключевым элементом, который позволит построить бесшовную глобальную систему морской коммуникации [1]. Важно отметить, что для многих судов переход на *VDES* не потребует замены всей аппаратной базы. Антенны и кабельные сети остаются пригодными для использования, и для оснащения судна требуется лишь замена транспондера, что значительно снижает затраты на внедрение [1, 4]. Данный факт делает *VDES* экономически привлекательной альтернативой для судовладельцев и способствует более быстрому распространению технологии по всему миру.

3. Сравнительный анализ ГМССБ и VDES

Краткие итоги рассмотрения недостатков Глобальной морской системы связи при бедствиях и безопасности в сравнении с преимуществами технологии *VHF Data Exchange System*, проведенные в п. 2.2 и 2.3, отражены в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ ГМССБ и VDES

№ п/п	Характеристика	ГМССБ	VDES
1.	Пропускная способность	Низкая (до 9,6 кбит/с)	До 300 кбит/с (<i>VDE</i>)
2.	Каналы передачи	Аналоговые и цифровые (<i>DSC, NBDP</i>)	Цифровые (<i>AIS, ASM, VDE</i>)
3.	Двусторонняя связь	Ограничена	Полноценная
4.	Поддержка автономных судов	Нет	Да (через <i>VDE</i> и <i>SAT-VDE</i>)
5.	Совместимость	Обратная совместимость с <i>VDES</i>	Обратная совместимость с <i>AIS/GMSSB</i>
6.	Зона покрытия	Ограничена УКВ-диапазоном	Расширена за счёт <i>SAT-VDE</i>
7.	Поддержка <i>e-Navigation</i>	Частичная	Полная
8.	Передача мультимедийных сообщений	Нет	Да

Проведенный сравнительный анализ двух технологий связи позволяет сделать прогноз направления вектора развития связи для обеспечения судоходства.

4. Перспективы применения VDES в российском судоходстве

Российское судоходство, обладая обширными морскими границами и уникальными географическими особенностями, особенно в Арктическом регионе, имеет все предпосылки для широкого применения технологии *VDES*. Наиболее ярким примером такого применения является реализуемый в стране проект «е-Море» (2016–2020) [7]. В рамках этого проекта был создан уникальный объект – тестовая акватория в Финском

заливе, о чем было упомянуто выше, в настоящей статье, где проводились испытания макетов береговых и судовых станций *VDES*. Эти работы были не просто лабораторными экспериментами, а частью ответственного процесса стандартизации и подготовки к внедрению технологии. Российские разработки, представленные в виде макетов аппаратуры, соответствовали требованиям международных стандартов, таким как Рекомендация МСЭ-R М.2092 и Международная электротехническая комиссия (МЭК/IEC) [9]. Это говорит о том, что российская научно-техническая и промышленная база способна не только принимать, но и создавать оборудование для передовых морских коммуникационных систем.

Ключевой областью применения *VDES* в контексте российского судоходства является Арктика. Российская Федерация активно развивает Северный морской путь, протяжённость которого превышает 5,5 тыс. км. Увеличение грузопотока (по прогнозам – до 200 млн тонн к 2030 году) требует создания современной цифровой инфраструктуры, включающей высокоскоростную связь, системы мониторинга и автоматизированного управления. Современная АСОД (*VDES*) предназначена для решения специфических задач навигационного и информационного обеспечения судов в Арктике, где традиционные средства связи часто неэффективны из-за удаления от береговой инфраструктуры [9]. Спутниковый сегмент *VDE-SAT* является здесь решающим фактором, поскольку он обеспечивает глобальное покрытие, недоступное для наземных систем, ограниченных дальностью действия около 74 км [1]. Способность *VDES* передавать аугментацию сигналов *GNSS*, обновленные электронные карты и предупреждения о состоянии ледовой обстановки становится жизненно важной для безопасного прохождения Северного морского пути. Разработка и внедрение АСОД в Арктике также открывает возможности для создания интеллектуальных систем мониторинга и управления движением судов, что соответствует глобальным трендам на автономное судоходство и *e-Navigation* [4, 9]. Для Федерального агентства морского и речного флота (РОСМОРРЕЧФЛОТА) внедрение *VDES* может стать ключевым элементом стратегии цифровой трансформации транспортной инфраструктуры, особенно в рамках развития Северного морского пути и модернизации речного флота.

Помимо Арктики, *VDES* может найти широкое применение в других акваториях с высокой концентрацией судового движения. Подготовка к внедрению *VDES* в России подробно описана в Руководстве *IALA 1117*, издание 2, которое служит путеводителем для морских администраций и операторов [5, 6]. Переход на *VDES*, как уже отмечалось, не требует полной замены оборудования на борту судов, что снижает финансовые барьеры для судовладельцев [1, 4]. Это делает технологию доступной для широкого круга судов, от маломерных катеров до крупных контейнеровозов. Интеграция *VDES* в существующие и планируемые системы, такие как *VTS*, и ее поддержка в рамках *e-Navigation* позволят создать единое информационное пространство для управления морским движением во всех морях, омывающих Россию.

Таким образом, внедрение *VDES* в российском судоходстве – это не просто технологическое обновление, а стратегический шаг, направленный на повышение безопасности, эффективности и конкурентоспособности российского флота в мировых морских перевозках, а также на решение специфических задач по освоению Арктики.

5. Проблемы и рекомендации внедрения

Несмотря на высокий потенциал, внедрение *VDES* в России сталкивается с рядом вызовов:

- 1) высокая стоимость модернизации инфраструктуры – необходима установка новых береговых станций *VDES* и обновление бортового оборудования;

- 2) отсутствие нормативной базы – в России пока нет технических регламентов по VDES, соответствующих международным стандартам (ITU-R M.2092, IALA);
- 3) недостаток квалифицированных кадров – требуется обучение специалистов по эксплуатации и обслуживанию VDES;
- 4) географические и климатические сложности – установка и эксплуатация оборудования в Арктике требует особой устойчивости к низким температурам и коррозии.

Для успешного внедрения VDES в России необходимо выполнить ряд мероприятий:

- 1) разработку национальной стратегии цифровизации морского транспорта с приоритетом на VDES и S-VDES;
- 2) пилотные проекты в ключевых регионах – например, на участке СМП от Мурманска до Диксона;
- 3) государственно-частное партнёрство для финансирования инфраструктурных проектов;
- 4) участие в международных инициативах (например, проекты Европейского космического агентства по S-VDES);
- 5) подготовка кадров через специализированные программы в морских вузах.

6. Перспективы и сценарии внедрения

Широкомасштабное внедрение VDES невозможно без формирования благоприятного регуляторного ландшафта и принятия долгосрочных стратегических решений на международном уровне. Именно поэтому ключевые международные организации, такие как Международная морская организация (ИМО), Международный союз электросвязи (ITU) и Международная электротехническая комиссия (МЭК), играют центральную роль в развитии и стандартизации этой технологии. Процесс стандартизации находится на завершающей стадии: поправки к главе V СОЛАС, стандарты рабочих характеристик и руководства по эксплуатации VDES находятся в стадии разработки и должны быть представлены на сессию NCSR 12 [10]. Любые поправки к СОЛАС, которые могли бы сделать VDES обязательной, вступят в силу не ранее 1 января 2028 года, что дает рынку достаточное время для адаптации [10]. В настоящее время ИМО рекомендует сторонам добровольно внедрять VDES параллельно с AIS, рассматривая ее как решение для повышения безопасности и целостности данных AIS за счет шифрования и аутентификации [10].

Стратегическое видение применения VDES включает ее интеграцию в ключевые системы безопасности мореплавания. ИМО активно рассматривает возможность использования VDES в качестве альтернативы AIS в пункте 8.4.2.3.1.2 главы V СОЛАС, а также как компоненту (ГМССБ) [2, 10]. Это означает, что в будущем VDES может стать не просто дополнительным инструментом, а основной системой для передачи данных о положении судна и сообщений о бедствии. Заинтересованные стороны уже начинают готовить предложения для будущего включения VDES в оборудование связи по главе IV СОЛАС [10]. Это говорит о том, что регуляторы видят в VDES технологию, способную обеспечить более высокий уровень безопасности, чем текущая AIS.

Помимо стандартизации и интеграции в существующие системы, другим важным аспектом является управление радиочастотным спектром. Спутниковый сегмент VDES должен работать в полосах частот 156,0125–157,4375 МГц и 160,6125–162,0375 МГц, и Резолюция 360 (PeruSM.R-15) поручила МСЭ-R провести исследования по совместному использованию этих частот и обеспечению совместимости с другими службами в смежных полосах [8]. Это необходимо для предотвращения помех между VDE-SAT и другими службами, такими как авиационная подвижная служба и другие морские

службы. Кроме того, с 1 января 2024 года использование частот VDES стало глобально обязательным для морских подвижных служб (*IMO MSC.1/Circ.1460/Rev.2*), а к 2030 году голосовая связь должна быть полностью выведена с этих каналов [6]. Этот план по переводу каналов на исключительно данные, ориентированный режим является стратегическим шагом, который формирует рыночный спрос на VDES-оборудование и стимулирует его производителей. В совокупности, этот комплекс мер – от стандартизации до управления спектром – создает прочную основу для успешного и всеобъемлющего внедрения VDES, превращая ее из технологического нововведения в неотъемлемый элемент современной морской инфраструктуры.

Заключение

Технология VDES представляет собой прорыв в области морской связи, открывая возможности для безопасного, эффективного и устойчивого судоходства. Для России, стремящейся укрепить свои позиции в Арктике и развивать Северный морской путь, VDES становится не просто перспективной, а стратегически важной технологией. Успешное внедрение VDES потребует комплексного подхода, включающего техническую модернизацию, нормативное сопровождение и международное сотрудничество. Внедрение VDES в системах РОСМОРЕЧФЛОТА позволит не только модернизировать существующую инфраструктуру, но и занять лидирующие позиции в области цифрового управления транспортом. При системной поддержке со стороны государства и отрасли VDES может стать основой цифровой трансформации российского морского транспорта в XXI веке.

Литература

1. 7 Advantages of VDES vs. AIS in Maritime Satellite Communications. URL: <https://info.alen.space/advantages-of-vdes-vs-ais-in-maritime-satellite-communications> (дата обращения: 14.07.2025).
2. ИМО содействует внедрению инновационных систем навигации и связи. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10716> (дата обращения: 05.07.2025).
3. Рекомендация МСЭ-R М.2092-1 (02/2022). Технические характеристики для системы обмена данными в ОБЧ-диапазоне в полосе ОБЧ морской подвижной службы. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2092-1-202202-I!!PDF-R.pdf (in Russian). (дата обращения: 05.07.2025).
4. Связь для обеспечения безопасности и эффективности на море. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/0e/R0A0E0000C20001PDFR.pdf (дата обращения: 10.07.2025).
5. VDES – VHF Data Exchange System – IALA. URL: <https://www.iala.int/technical/connectivity/vdesvhf-data-exchange-system/> (дата обращения: 18.07.2025).
6. G1117 VHF data exchange system (VDES) overview. Edition 3.0 December 2022 URL: <https://www.navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/AIS/G1117-Ed3.0-VHF-Data-Exchange-System-VDES-Overview.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
7. Новая морская цифровая связь для е-Навигации. // Электронный ресурс: КиберЛенинка. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-morskaya-tsifrovaya-svyaz-dlya-e-navigatsii> (дата обращения: 24.07.2025).
8. Международный союз электросвязи. Всемирная конференция радиосвязи 2019 года. (BKR-19). . ITU URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/14/02/R14020000010001MSWR.docx (дата обращения: 15.07.2025).
9. Базаров Ю. И., Атаманюк В. А. Автоматическая система обмена данными ОБЧ диапазона в навигационном и информационном обеспечении судов Арктики. // Морской вестник, № 4 (68) декабрь 2018. // URL: <http://morvest.ru/Full%20articles/MV-68%20arhiv.pdf> (дата обращения: 11.07.2025).

10. 11-я сессия Подкомитета по мореплаванию, связи, поиску и спасению. URL: <https://rs-class.org/upload/iblock/8ed/8ed643c1714e30e0df40cdd6b10702ec.pdf> (дата обращения: 10.07.2025).

References

1. 7 Advantages of VDES vs. AIS in Maritime Satellite Communications. URL: <https://info.alen.space/advantages-of-vdes-vs-ais-in-maritime-satellite-communications> (accessed on 14.07.2025).
2. IMO promotes implementation of innovative navigation and communication systems . URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10716> (date of access: 05.07.2025) (in Russian).
3. Recommendation ITU-R M.2092-1 (02/2022). Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2092-1-202202-1!!PDF-R.pdf (in Russian). (дата обращения: 05.07.2025).
4. Communication for ensuring safety and efficiency at sea. URL: ITU https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/0e/R0A0E0000C20001PDFR.pdf (date of access: 10.07.2025) (in Russian).
5. VDES – VHF Data Exchange System – IALA. URL: <https://www.iala.int/technical/connectivity/vdesvhf-data-exchange-system/> (date of access: 18.07.2025).
6. G1117 VHF data exchange system (VDES) overview. Edition 3.0 December 2022 URL: <https://www.navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/AIS/G1117-Ed3.0-VHF-Data-Exchange-System-VDES-Overview.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
7. New maritime digital communications for e-Navigation. // Electronic resource: CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-morskaya-tsifrovaya-svyaz-dlya-e-navigatsii> (date of access: 24.07.2025) (in Russian).
8. International Telecommunication Union. 2019 World Radiocommunication Conference. ITU URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/14/02/R14020000010001MSWR.docx (accessed on 15 July 2025).
9. Bazarov Yu. I., Atamanyuk V. A. Automatic system for VHF data exchange in navigation and information support of Arctic vessels. // Marine Bulletin, № 4 (68) December 2018. URL: <http://morvest.ru/Full%20articles/MV-68%20arhiv.pdf> (date of access: 11.07.2025) (in Russian).
10. 11th session of the Subcommittee on Navigation, Communications, Search and Rescue . URL: <https://rs-class.org/upload/iblock/8ed/8ed643c1714e30e0df40cdd6b10702ec.pdf> (date of access: 10.07.2025) (in Russian).

Статья поступила 31 августа 2025 г.

Информация об авторах

Малышев Сергей Александрович – Начальник научно-исследовательского управления. АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: sam@niineptun.ru.

Годияк Андрей Васильевич – Начальник научно-исследовательского отдела АО «НИИ «Нептун». Область научных интересов: системы, сети и устройства телекоммуникаций. Тел.: +7(812)327-09-72. E-mail: ganv@niineptun.ru.

Адрес: 199178. г. Санкт-Петербург, линия 7-я Васильевского Острова, д. 80, к. 1, лит. А.

VDES technology: characteristics, development prospects in Russian shipping

S. A. Malyshev, A. V. Godiyak

Annotation: Introduction: Modern shipping is increasingly introducing digital technologies to improve the safety, efficiency and environmental friendliness of sea and river transport. The Federal Agency

for Maritime and River Fleet of the Ministry of Transport of Russia is actively developing a shipping management system, however, existing technologies, such as an automatic identification system, have restrictions on throughput, security and functionality. One of the key innovations in this area is the VHF Data Exchange System technology - a data exchange system in the ultrashort wave range, developed by the International Maritime Organization and the International Union as the development of a traditional automatic identification system. In the face of growing traffic, expansion of the Northern Sea Route and the need to modernize the infrastructure of maritime communications, the ultra-short wave data exchange system is a strategically important element of the digital transformation of the Russian fleet. **The purpose** of the work is to analyze the technical characteristics of the data exchange system in the range of ultra-short wave prospects for the introduction of this technology in the navigation management systems of the Federal Agency for Maritime and River Fleet, assess its technical and economic advantages, as well as identify key areas of practical application to improve the safety, environmental friendliness and efficiency of sea and river transportation in the Russian Federation. **Result:** The analysis showed that the data exchange system in the ultra-short wave range provides a significant increase in functionality compared to the automatic identification system: higher throughput, two-way communication, support for encrypted messages and integration with systems for automatic identification, differential correction and secure data exchange. The introduction of a data exchange system in the ultra-short wave range in Russian waters, especially on the Northern Sea Route, will improve navigation safety, reduce the risk of accidents and improve traffic management in conditions of limited communication and difficult navigation conditions. The introduction of this technology will create a single digital platform, as it integrates with e-Navigation systems, marine information services and port management systems. **Practical significance:** The results of the study can be used in the development of an innovative development program for the enterprise for the development of new popular technologies for digitalization of sea transport, the design of coastal communications and navigation infrastructure, as well as in the modernization of on-board equipment of ships. The introduction of a data exchange system in the ultra-short wave range will create the basis for building intelligent transport systems in the marine sector, increase the competitiveness of Russian shipping and ensure compliance with international safety standards.

Keywords: automatic Identification System, Safety of Navigation, Global Maritime Distress Communication System, Maritime Communication, Ultra-Short Wave Data Exchange Systems, Shipping, Digitalization, e-Navigation.

Information about authors

Sergey Aleksandrovich Malyshev – Head of the Research Department of JSC Research Institute Neptune. Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: sam@niineptun.ru.

Andrey Vasilyevich Godiyak – Head of the Research Department of JSC Research Institute Neptune. Research interests: telecommunication systems, networks and devices. Tel.: +7(812)327-09-72. E-mail: ganv@niineptun.ru.

Address: 199178, Saint-Petersburg, 7th line of Vasilyevsky Island, house 80, bild. 1, let. A.

Для цитирования:

Малышев С. А., Годиак А. В. Технология VDES: характеристики, перспективы развития в судоходстве России // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 75-85. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-75-85.

For citation:

Malyshev S. A., Godiyak A. V. VDES technology: characteristics, development prospects in Russian shipping. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 75-85 (in Russian). DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-75-85.

ПЕРЕДАЧА, ПРИЁМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.317

DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-86-96

Классификация потоков, циркулирующих в сетях связи, по признакам распределения двоичных комбинаций для решения задач оптимизации и портретизации трафика

Маркин А. В., Иванов В. А., Конышев М. Ю., Иванов И. В.

Аннотация. Представлен подход к оценке распределения комбинаций двоичных дискретных величин в потоке данных. Определено поле признаков, по которым составляется текущий образ (портрет) трафика на сегменте цифрового потока. Для повышения качества распознавания и классификации потоков обоснованы размер сегмента и введены сложные признаки распределения двоичных комбинаций. Научная новизна работы состоит в разработке нового показателя оценки – модифицированной метрики Хемминга, определения оптимальной связности цепи Маркова при аппроксимации потока для портретизации трафика и актуализации эталонных методов распознавания образов на основе комитетных конструкций для его классификации. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для составления профилей трафика, обнаружения атак в системах обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак и оптимизации трафика при перегрузках сети. Мониторинг распределений позволяет контролировать состояние сети по месту, времени и режиму работы, которые определяются некоторыми классами допустимых значений контролируемых параметров. Поэтому всегда в таких ситуациях вместе с задачей оценки параметров решается и задача классификации. При этом в работе экспериментально доказано, что для коротких цифровых последовательностей с объемом меньше 2 кбит их правильная классификация невозможна, а при объемах больше 5 кбит наступает режим насыщения с вероятностью правильной классификации в диапазоне 0,8–0,9. В тоже время при аппроксимации потока цепью Маркова со связностью больше 3, наступает режим насыщения и вероятность правильного распознавания и классификации при дальнейшем увеличении связности цепь Маркова практически не меняется.

Ключевые слова: двоичная битовая комбинация, двоичный вектор, классификация сегментов потока, модифицированная метрика Хемминга, поле признаков, распознавание образов, трафик, цифровой поток, частота появления двоичной комбинации.

Введение

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации в плане совершенствования систем специальной связи предусматривает увеличение их абонентской емкости и разветвленности действующих транспортных сетей, повышение пропускной способности и протяженности линий связи, интеграцию потоков разнородных данных на современной аппаратной основе, предоставление качественных телекоммуникационных услуг в условиях перегрузки сетей и надежную защиту от деструктивных вторжений. Для решения этих задач в первую очередь требуется оценка обслуживаемых системой связи потоков и трафика, обеспечивающая конструктивные решения по оптимизации нагрузки и ее распределения в сети.

Оценка распределения двоичных комбинаций в цифровом потоке

Проведенные авторами исследования относительно цифровых каналов магистральных сетей связи и сетей доступа, показали, что циркулирующие в них цифровые потоки (ЦП) являются нестационарными относительно распределения двоичных комбинаций [1, 2].

Вместе с тем, в ЦП наблюдаются достаточно большие по размеру и длительности участки локальной стационарности, на которых характер распределения двоичных комбинаций (векторов) остается относительно постоянным. Оценка распределения векторов осуществлялась по частным и интегральному показателям с помощью частоты появления двоичного вектора на исследуемом отрезке цифровой последовательности X_L и модифицированной метрики Хемминга, значение которых ($P_{ij,\dots}$ и M_N) рассчитывалось по формулам (1, 2).

Модификация метрики является дальнейшим развитием показателей, предложенных в работах [3,4].

$$P_{ij,\dots} = N_{ij,\dots} / N_{XLij,\dots}, \quad (1)$$

где P_{ij} – частота (частота появления двоичной комбинации (двоичного вектора) i, j на отрезке X_L ; N_{ij} – количество комбинаций i, j на отрезке X_L ; $N_{XLij,\dots}$ – общее количество комбинаций i, j на отрезке X_L .

$$M_N = \left(\sum_{k=1}^N |P_{ij,\dots}^E - P_{ij,\dots}^Q| \right) \times 2^{-(k+1)}, \quad (2)$$

где M_N – расстояние между E -й и Q -й цифровыми последовательностями, состоящими из двоичных векторов размерностью от 1 до N ; $P_{ij,\dots}^E, P_{ij,\dots}^Q$ – частоты появления одинаковых двоичных векторов в цифровых последовательностях K и Q ; N – максимальная размерность двоичного пространства, на котором осуществляется расчет модифицированной метрики Хемминга.

Очевидно, что с увеличением длины цифровых последовательностей, частоты появления двоичных векторов приобретают вероятностный характер. При длине отрезка X_L , стремящейся к бесконечности, частоты и вероятности появления двоичных векторов в последовательности будут принимать одинаковые значения.

Проведенные исследования на соответствие требованиям к метрике показали, что для полученной модифицированной метрики Хемминга выполняются требования тождества, симметрии и условия треугольника:

- $M_N(E, Q) = 0$, при $E=Q$ – (условие тождества);
- $M_N(E, Q) = M_N(Q, E)$ – (условие симметрии);
- $M_N(E, Z) \leq M_N(E, Q) + M_N(Q, Z)$ – (условие треугольника).

Очевидно, что расстояние M_N принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Для одинаковых цифровых последовательностей M_N равняется нулю, а для канонических последовательностей, состоящих из нулей или единиц – близкое к единице. Результаты расчета M_N для двух ограниченных массивов данных с нулевой и единичной последовательностями приведены в примере расчета, табл. 1.

Результаты расчета показывают, что при увеличении длины последовательности и размерности двоичного пространства N значение M_N приближается к 1, $M_N \rightarrow 1$, при $L \rightarrow \infty$ и $N \rightarrow \infty$.

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ L \rightarrow \infty}} (M_N) = 1$$

Результаты оценки чувствительности метрики Хемминга при масштабировании алфавита (мерности двоичных векторов) приведены на рис. 1.

Из графиков видно, что наблюдаемый поток состоит из последовательно сменяющих друг друга участков локальной стационарности относительно показателя M_N . С технической точки зрения размер участков и значение признаков распределения двоичных комбинаций являются исходными данными для составления в векторном формате портрета трафика на данном сегменте данных, а для оптимизации трафика – выбором оптимального архиватора. Учитывая, что изменение значения показателя M_N требует уточнения схемы сжатия, оптимизация данных при их передаче будет,

осуществляется последовательными порциями, размер которых будем ограничен требованиями к задержкам передачи данных.

Таблица 1 – Пример расчета модифицированной метрики Хемминга

Цифровые последовательности					
00000000			11111111		
Частоты появления двоичных векторов в ЦП для размерности от 1 до 3					
$P_0=1$	$P_{00}=1$	$P_{000}=1$	$P_1=0$	$P_{00}=0$	$P_{000}=1$
$P_1=0$	$P_{01}=0$	$P_{001}=0$	$P_0=1$	$P_{01}=0$	$P_{001}=0$
	$P_{10}=0$	$P_{010}=0$		$P_{10}=0$	$P_{010}=0$
	$P_{11}=0$	$P_{011}=0$		$P_{11}=1$	$P_{011}=0$
		$P_{100}=0$			$P_{100}=0$
		$P_{101}=0$			$P_{101}=0$
		$P_{110}=0$			$P_{110}=0$
		$P_{111}=0$			$P_{111}=1$
Результат оценки модифицированной метрики Хемминга					
$\left(\sum_{k=1}^1 P_i^0 - P_i^1 \right) \times 2^{-(1+1)}$					
$\frac{ 1-0 + 0-1 }{4} = 0,5$					
$\left(\sum_{k=1}^2 P_{i,j}^0 - P_{i,j}^1 \right) \times 2^{-(2+1)}$					
$\frac{ 1-0 + 0-0 + 0-0 + 0-1 }{8} = 0,25$					
$\left(\sum_{k=1}^3 P_{i,j,s}^0 - P_{i,j,s}^1 \right) \times 2^{-(3+1)}$					
$\frac{ 1-0 + 0-0 + 0-0 + 0-0 + 0-0 + 0-0 + 0-0 + 0-1 }{16} = 0,125$					
$M_3 = 0,5+0,125+0,0625 = 0,875$					

При масштабировании алфавита чувствительность метрики возрастает, помимо этого наблюдается ее зависимость от размера сегмента наблюдения, при увеличении которого график зависимости приобретает более гладкую форму.

Для цифровых последовательностей X_L разработан алгоритм расчета значений признаков распределения двоичных комбинаций, представленный на рис. 2.

На вход алгоритма подается битовая последовательность X_L длиной L и размером двоичных комбинаций от 1 до n . Во втором блоке определяется набор всех возможных битовых комбинаций длины n . В следующем блоке 3 задается позиция для считывания битовой комбинации длины n . В блоке 4 осуществляется последовательное сравнение значений из полного набора возможных комбинаций для двоичных векторов и значений из последовательности X_L .

(в дальнейшем объектов);

- количество объектов распознавания счетно и ограничено;
- описание объектов обеспечивается некоторым множеством качественных и(или) количественных признаков;
- имеется определенный, как правило, не полный объем информации о распределении признаков на множестве объектов;
- требуется определить тип объекта или класс, к которому его можно отнести.

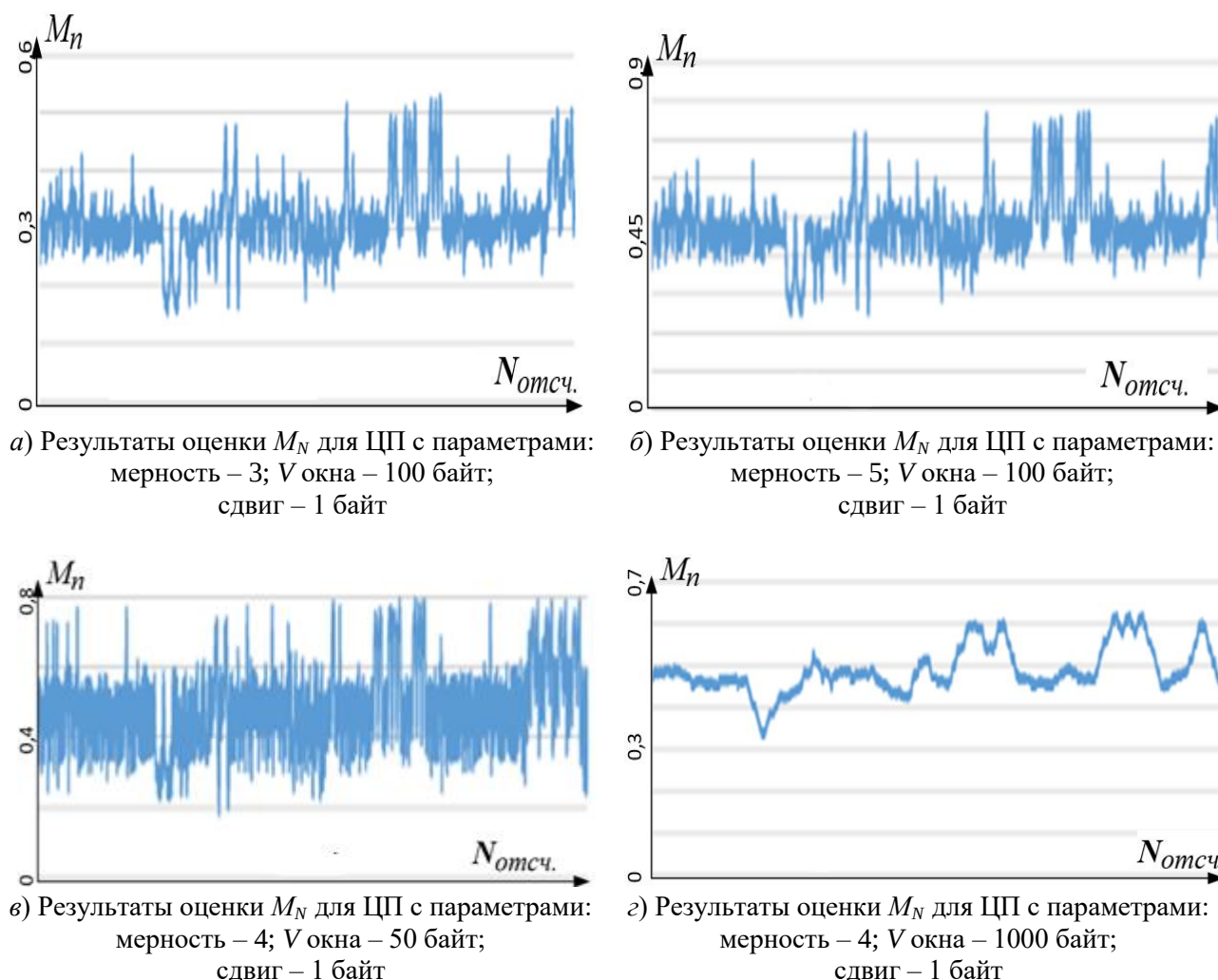


Рис. 1. Результаты оценки метрики Хемминга для цифровых последовательностей

Исходя из этих условий, решение задачи распознавания осуществляется в следующей последовательности:

- в соответствии с первым условием выбирается некоторый алфавит классов. Количество классов выбирается исходя из соображений достаточной обоснованности принимаемых решений. В случае если условие определено нечетко, то возможен предельный вариант, когда количество классов равно числу распознаваемых объектов;
- на основе второго и третьего условий формируется словарь признаков, на языке которых в формализованном виде могут быть описаны объекты и классы. Описания классов на языке признаков не должны пересекаться;
- с учетом всей информации (условия 1...3) разрабатывается решающее правило (алгоритм распознавания или классификации) отнесения объектов к тому или иному классу;
- на основе решающего правила формируется система распознавания, и на контрольной совокупности объектов осуществляется проверка ее работоспособности;
- при неудовлетворительных результатах распознавания осуществляется коррекция алгоритма на всех этапах решения задачи.

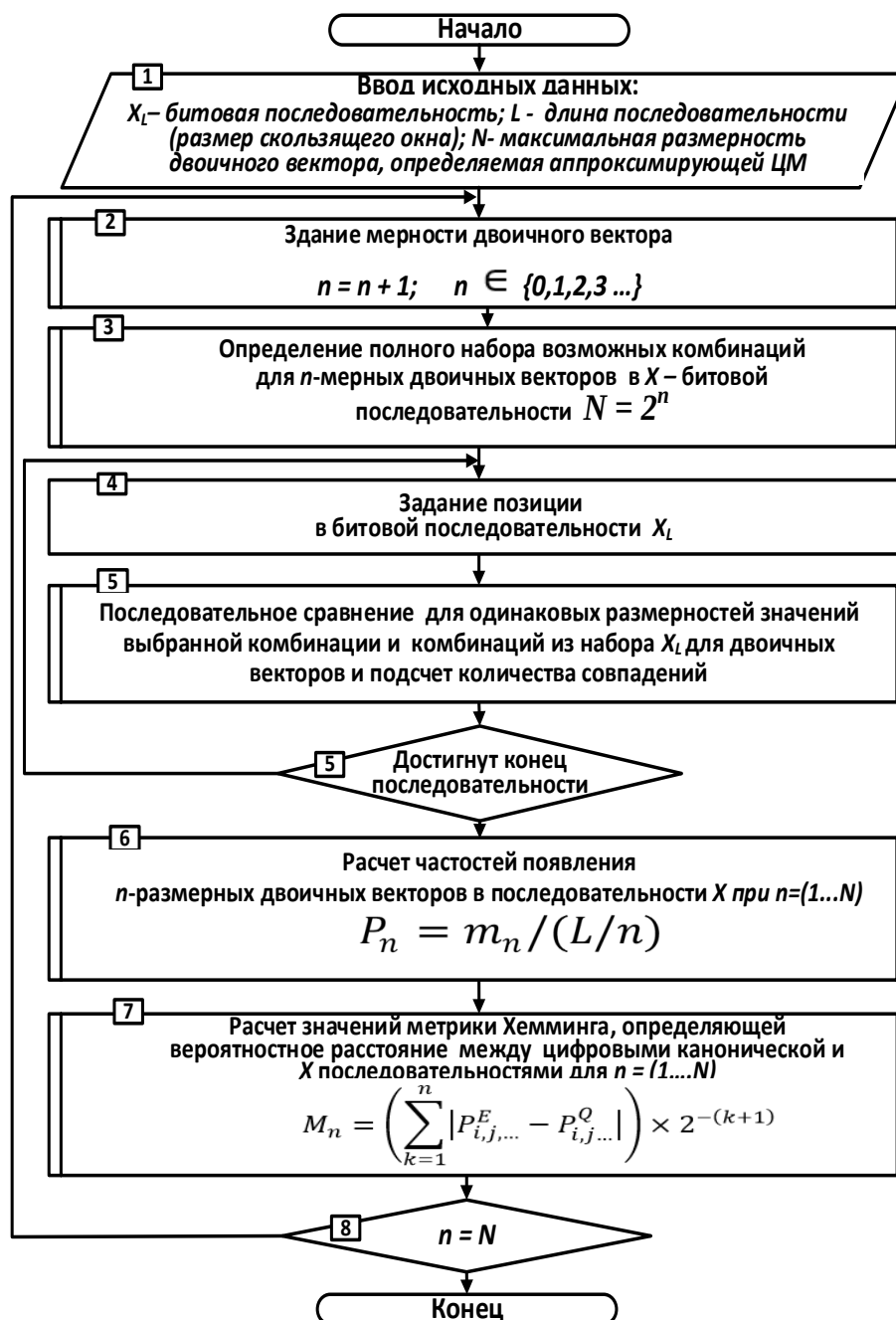


Рис. 2. Блок-схема обобщенного алгоритма расчета значений параметров распределения двоичных комбинаций в цифровой последовательности

Анализ условий применимости систем распознавания образов, представленный в работе [7], показывает, что для единичного акта распознавания последовательности X_L целесообразно использовать систему распознавания образов с обучением, так как для такой системы качественно и количественно определены классы и признаки, а их эталонное описание обеспечивается с помощью процедуры обучения.

Представляя битовый поток как последовательность двумерной случайной величины (ДСВ), его статистические свойства можно описать рядами распределения многомерных двоичных случайных величин. Сравнение и распознавание последовательностей X_L относительно распределения двоичных векторов возможно в некотором пространстве

признаков, выбор которых определяется их информативностью, достаточной для правильной классификации X_L . Например, при описании ДСВ в четырехмерном пространстве, определяемой связностью, аппроксимирующей ЦМ ($n = 3$), для классификации порции ЦП X_L используется 33 признака, из которых:

- 2 признака – частоты появления в X_L и 1;
- 4 признака – частоты появления в X_L комбинаций 00, 10, 01, 11;
- 8 признаков – частоты появления комбинаций 000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111;
- 16 признаков – частоты появления комбинаций 0000, 0001, 0010, 0100, 1000, ..., 1111;
- 3 полипризнака – значение метрики M_X , рассчитанное для X_L при $n = 0, 1, 2, 3$.

При этом метрика выступает как один из информативных признаков распределения ДСВ в порции потока X_L . В целом же общее количество признаков для X_L определяется частотой появления двоичных векторов размерностью от 1 до (n) плюс значение метрик $M_{(0, n)}$, как интегральные полипризнаки для (X_L) :

$$N_{\text{пр}} = [(2^1 + 2^2 + \dots + 2^N) + N], \quad (3)$$

где $N_{\text{пр}}$ – размерность признакового пространства, в котором оценивается положение (X_L) ; N – максимальная размерность двоичного вектора.

При этом в качестве признака метрика характеризует статистические свойства потока на всю глубину оцениваемой последовательности и не является избыточной.

Алгоритм классификации сегмента цифрового потока представлен на рис. 3. На вход алгоритма поступает трафик от источника сообщений. От входного потока отсекается битовая последовательность по размеру заданного сегмента В третьем блоке (алгоритм на рис. 2) рассчитываются координаты точки – положение X_L в признаковом пространстве (4):

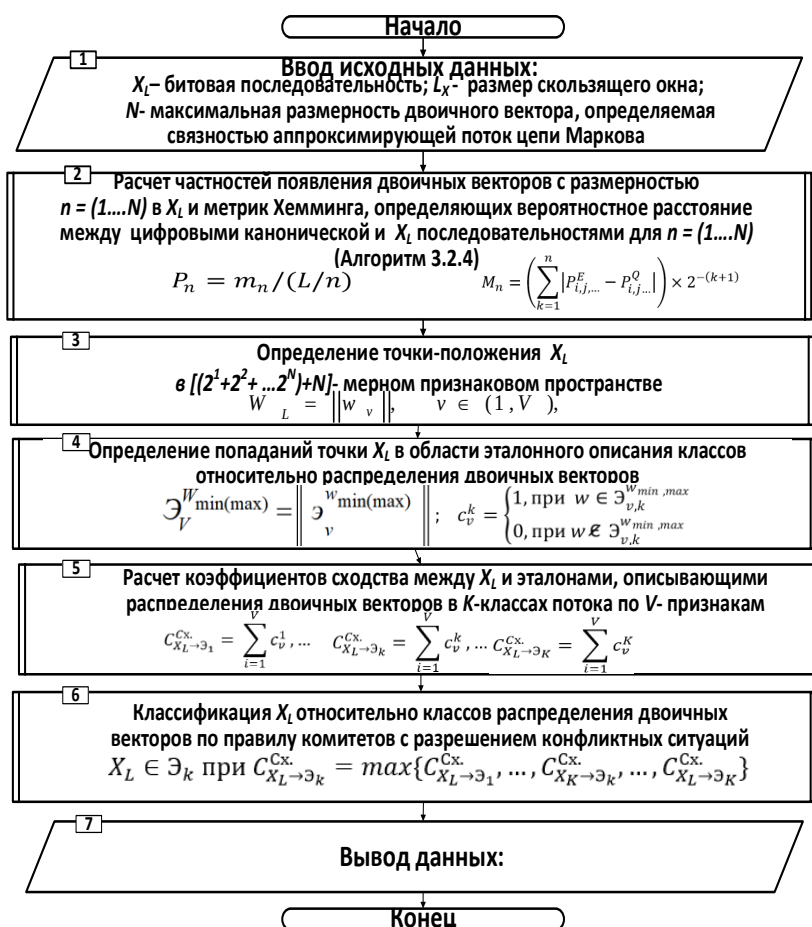


Рис. 3. Схема алгоритма классификации цифровых последовательностей по признакам распределения двоичных комбинаций в сегменте цифровой последовательности

$$W_{X_L} = \|w_{X_L}^v\|, w \in (1, V), \quad (4)$$

где W_X – точка – положение X_L в признаковом пространстве распределения двоичных векторов; $w_{X_L}^v$ – количественное значение w -го признака для X_L ; V – размерность векторного пространства.

В четвертом блоке определяется принадлежность X_L по каждому v -му признаку к эталонам, описывающим области классов оптимального сжатия цифровых последовательностей для архиваторов в k -ой паре «эталон – архиватор» – выражение (5)

$$c_v^k = \begin{cases} 1, \text{ при } w \in \mathcal{E}_{v,k}^{w_{\min, \max}} \\ 0, \text{ при } w \notin \mathcal{E}_{v,k}^{w_{\min, \max}} \end{cases}, \quad (5)$$

где c_v^k – результат попадания количественного значения (w) для v -го признака в эталон ($\mathcal{E}_{v,k}^{w_{\min, \max}}$) k -го класса.

В пятом блоке попарно рассчитываются коэффициенты сходства X_L с эталонами согласно выражению:

$$C_{X_L \rightarrow \mathcal{E}_k}^{Cx} = \sum_{v=1}^V c_v^k \quad (6)$$

В шестом блоке реализовано правило классификация X_L относительно классов распределения двоичных векторов по правилу комитетов, в том числе с разрешением конфликтных ситуаций. Правило работает следующим образом. Если все значения количественных признаков для X_L попали в один эталон, то конфликтная ситуация отсутствует и принимается однозначное решение. Если по каким-то признакам идет пересечение эталонов и признаки для X_L одновременно попали более чем в один эталон, то решение принимается по следующему правилу:

$$X_L \in \mathcal{E}_k \text{ при } C_{X_L \rightarrow \mathcal{E}_k}^{Cx} = \max\{C_{X_L \rightarrow \mathcal{E}_1}^{Cx}, \dots, C_{X_L \rightarrow \mathcal{E}_k}^{Cx}, \dots, C_{X_L \rightarrow \mathcal{E}_K}^{Cx}\}. \quad (7)$$

Решение принимается в пользу эталона, набравшего больший коэффициент сходства выражение (7). В случае если имеется несколько одинаковых коэффициентов сходства, то выбирается эталон-класс архиваторов с меньшим порядковым номером.

Важным моментом, влияющим на точность результата классификации объектов, поступающих на вход системы распознавания, является объем обучающей выборки. От объема выборки зависит достоверность, с которой можно обобщать результаты классификации определенного количества испытаний на всю генеральную совокупность экспериментов. Для решения этой задачи найдем соотношение между репрезентативностью обучающей выборки и генеральной совокупностью испытаний. Для этого воспользуемся теоремой Муавра – Лапласа [8] и методикой, предложенной в [9]. Расчёты, выполненные по двум методикам, приблизительно совпадают. При этом объем обучающей выборки составляет порядка 300-400 реализаций.

В ходе экспериментальной проверки алгоритмов выяснилось, что на точность классификации X_L прежде всего влияет их размер L_i . Зависимость вероятности правильной классификации от размера цифровой последовательности L_i представлена на рис. 4.

Эксперимент показал, что для коротких цифровых последовательностей с L_i меньше 2 кбит их правильная классификация невозможна (вероятность правильной классификации составляет менее 0,5), а при $L_i \geq 5$ кбит наступает режим насыщения с вероятностью правильной классификации в диапазоне (0,8–0,9).

Зависимость правильной классификации последовательности X_L с объемом в 5 кбит от размерности пространства признаков, группы которых определяет связность аппроксимирующей цепи Маркова (ЦМ) представлена на рис. 5.

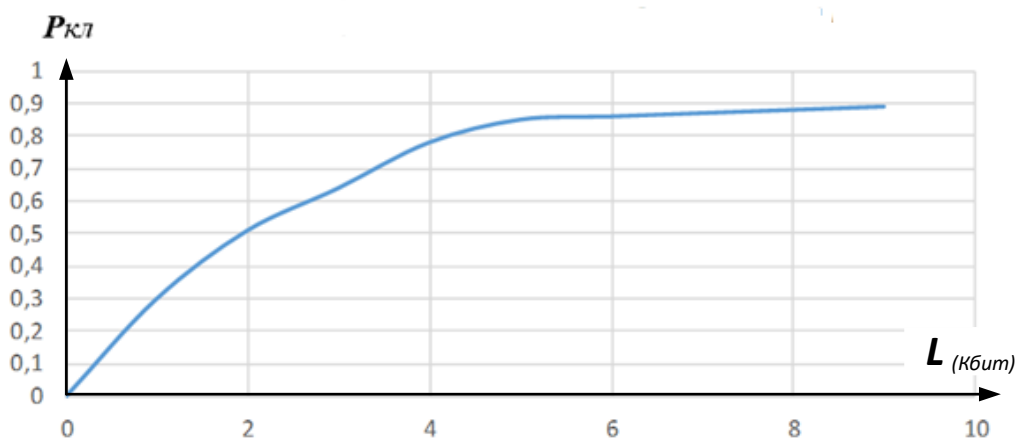


Рис. 4. Зависимость вероятности правильной классификации цифровых последовательностей от их объема при аппроксимации потока 4-связной цепи Маркова

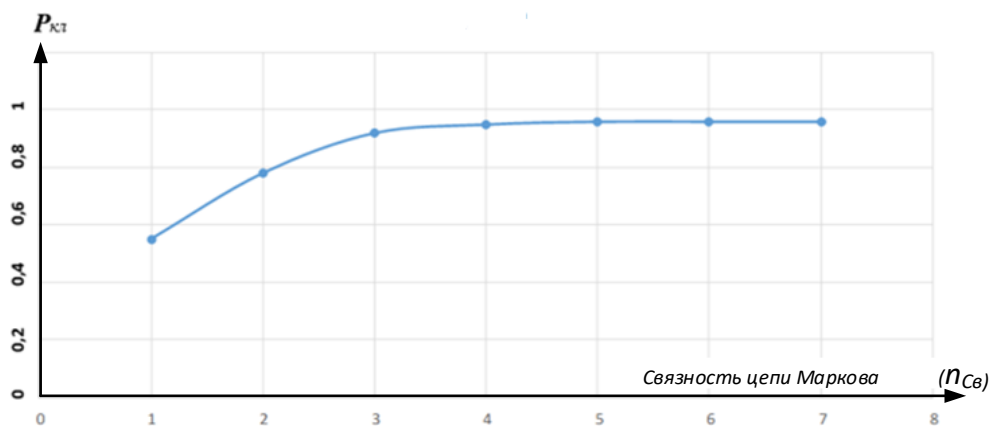


Рис. 5. Зависимость правильной классификации для цифровой последовательности X_L с $V=5$ кбайт от связности аппроксимирующей поток цепи Маркова

Из графика следует, что при связности ЦМ больше 3, наступает режим насыщения и вероятность правильного распознавания и классификации X_L при увеличении n практически не меняется. Это объясняется тем, что в многосвязной ЦМ при переходе от 3-го звена к 4-му финальные вероятности распределения ДСВ составляют десятитысячные, и информативность признаков этого уровня связности марковской цепи близка к нулю. Поэтому связность ЦМ $n = (3-4)$ является компромиссным решением по выбору признакового пространства для работы алгоритма классификации.

Выводы

Цифровые потоки, циркулирующие в сетях связи, являются нестационарными относительно распределения двоичных комбинаций. Вместе с тем, в них наблюдаются достаточно большие по размеру и длительности участки локальной стационарности, на которых характер распределения двоичных комбинаций (векторов) остается относительно постоянным.

Оценка распределения векторов в потоке осуществляется по частным и интегральным показателям с помощью частот появления двоичного вектора на исследуемом отрезке цифровой последовательности и модифицированной метрики Хемминга. При масштабировании алфавита чувствительность метрики возрастает, помимо этого наблюдается ее зависимость от размера сегмента наблюдения.

Для цифровых последовательностей предложен алгоритм расчета значений признаков распределения двоичных комбинаций в потоке.

Мониторинг распределений позволяет контролировать состояние сети по месту, времени и режиму работы, которые определяются некоторыми классами допустимых значений контролируемых параметров. Поэтому всегда в таких ситуациях вместе с задачей оценки параметров решается и задача классификации.

Для распознавания потоков целесообразно использовать систему распознавания образов с обучением, так как для такой системы качественно и количественно определены классы и признаки, а их эталонное описание обеспечивается с помощью процедуры обучения.

Экспериментально доказано, что для коротких цифровых последовательностей с объемом меньше 2 кбит их правильная классификация невозможна, а при объемах больше 5кбит наступает режим насыщения с вероятностью правильной классификации в диапазоне 0,8–0,9.

При аппроксимации потока цепью Маркова со связностью больше 3, наступает режим насыщения и вероятность правильного распознавания и классификации при дальнейшем увеличении связности ЦМ практически не меняется.

Литература

1. Иванов В. А., Маркин А. В. и др. Определение стационарности в цифровых потоках относительно распределения вероятностей двоичных векторов / Материалы и доклады XIII Всероссийской межведомственной научной конференции «Актуальные направления развития систем обеспечения безопасности объектов государственной охраны и охраняемых объектов, специальной связи для нужд органов государственной власти и специального информационного обеспечения государственных органов». Ч. 5. «Системы специальной связи». – Орел: Академия ФСО России, 2023. – С. 77-80.
2. Иванов В. А., Маркин А. В., Акимов Э. М., Программа для ЭВМ. Идентификатор участков локальной стационарности в мультиплексированном цифровом потоке «EMU_Ident_Loc_Station». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619446 от 11.05.2023. – М.: ФГУ ФИПС.
3. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. – 576 с.
4. Иванов В. А., Смирнов Д. С. Метрика для сравнения рядов распределения на множествах двоичных векторов / Материалы XI Всероссийской межведомственной конференции «Актуальные направления развития систем охраны, специальной связи и информации для нужд органов государственной власти РФ». Ч. 2. – Орел: Академия ФСО России, 2019.
5. Горелик А. Л., Гуревич И. Б., Скрипкин В. А. Современное состояние проблемы распознавания. – М.: Радио и связь, 1985. – 160 с.
6. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. – М.: Мир, 1977. – 319 с.
7. Себастиан Г. С. Процессы принятия решений при распознавании образов /Пер. с англ. – Киев: Техника, 1965. – 150 с.
8. Чернавин Ф. П. Применение метода комитетов для решения задач классификации / XII Международная конференция «Российские регионы в фокусе перемен». Екатеринбург, 16–18 ноября 2017 г. Екатеринбург: УПИ, 2018 Ч. 1. – С. 437-447.
9. Электронный ресурс: <http://www.rts-tender.ru> (дата обращения: 29.11.2024).

References

1. Ivanov V. A., Markin A. V. and others. Determination of stationarity in digital streams relative to the probability distribution of binary vectors. Materials and reports of the XIII All-Russian Interdepartmental Scientific Conference "Current trends in the development of security systems for state security facilities and protected facilities, special communications for the needs of government

authorities and special information support for government agencies." Part 5. "Special communications systems". Orel. Academy of the Federal Tax Service of Russia, 2023. Pp. 77-80 (in Russian).

2. Ivanov V. A., Markin A. V., Akimov E. M. Computer program Identifier of local stationarity sites in the multiplexed digital stream "EMU_Ident_Loc_Station". Certificate of state registration of a computer program No. 2023619446 dated 05.11.2023. Moscow: FSU FIPS. (in Russian).

3. Bleihut R. Theory and practice of error-controlling codes. Moscow. Mir Publ., 1986. 576 p. (in Russian).

4. Ivanov V. A., Smirnov D. S. and others. A metric for comparing distribution series on of binary vectors. Materials of the XI All-Russian Interdepartmental Conference "Current trends in the development of security systems, special communications and information for the needs of government authorities of the Russian Federation." Part 2. Orel. Academy of the Federal Security Service of Russia, 2019 (in Russian).

5. Gorelik A. L., Gurevich I. B., Skripkin V. A. The current state of the recognition problem. Moscow. Radio and Communications, 1985. 160 p. (in Russian).

6. Fu K. Structural methods in pattern recognition. Moscow. Mir Publ., 1977. 319 p. (in Russian).

7. Sebastian G. S. Decision-making processes in pattern recognition. Kiev. Technique Publ., 1965. 150 p. (in Russian).

8. Chernavin F. P. Application of the committee method to solve classification problems. XII International Conference "Russian regions in the focus of change". Yekaterinburg, November 16-18, 2017 Yekaterinburg: UPI, 2018, part 1, pp. 437-447. (in Russian).

9. Electronic resource: <http://www.rts-tender/ru>. (Accessed: 11.29.2024).

Статья поступила 12 мая 2025 г.

Информация об авторах

Маркин Алексей Валерьевич – директор ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: передача, прием и обработка информации. Тел: 8-495-689-03-01, E-mail: markin.a.v@fgupntcorion.ru.

Иванов Владимир Алексеевич – доктор военных наук, профессор, главный специалист ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: передача, прием и обработка информации. Тел: +7 926 474 78 12, E-mail: iva.mac@mail.ru.

Коньшев Михаил Юрьевич – доктор технических наук, доцент, начальник отдела ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: передача, прием и обработка информации. Тел: +7 953 620 48 81, E-mail: misha-kon@mail.ru.

Иванов Иван Владимирович – доктор технических наук, сотрудник ФГУП «НТЦ «ОРИОН». Область научных интересов: передача, прием и обработка информации. Тел: +7 926 474 78 12, E-mail: iva.mac@mail.ru.

Адрес: 127018, г. Москва, ул. Образцова, д. 38, стр.1.

Classification of streams circulating in communication networks according to the distribution of binary combinations for solving traffic optimization and portraiture problems

A. V. Markin, V. A. Ivanov, M. Y. Konyshchev, I. V. Ivanov

Annotation. An approach to estimating the distribution of combinations of binary discrete quantities in a data stream is presented. The field of features has been defined, according to which the current image (portrait) of traffic on the digital stream segment is compiled. To improve the quality of stream recognition and classification, the segment size is justified and complex distribution features of binary combinations are introduced. The scientific novelty of the work consists in the development of a new evaluation indicator – a modified Hamming metric, determining the optimal connectivity of the Markov chain when approximating the flow for traffic portrayal and updating reference image recognition methods based on committee structures for its classification. The practical significance of the work lies in the

possibility of using the results obtained to compile traffic profiles, detect attacks in systems for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks, and optimizing traffic during network congestion. Distribution monitoring allows you to monitor the network status by location, time, and mode of operation, which are determined by certain classes of acceptable values of the monitored parameters. Therefore, in such situations, the task of classification is always solved along with the task of estimating parameters. At the same time, it has been experimentally proven that for short digital sequences with a volume of less than 2 kbit, their correct classification is impossible, and with volumes of more than 5 kbit, saturation mode occurs with a probability of correct classification in the range of 0.8–0.9. At the same time, when the flow is approximated by a Markov chain with connectivity greater than 3, saturation mode occurs and the probability of correct recognition and classification with a further increase in connectivity, the Markov chain practically does not change.

Keywords: *binary bit pattern, binary vector, classification of stream segments, modified Hamming metric, feature field, pattern recognition, traffic, digital stream, frequency of occurrence of binary combinations.*

Information about authors

Alexey Valerievich Markin – The director of FSUE NTC ORION. Phone: 8-495-689-03-01, E-mail: markin.a.v@fgupntcorion.ru Address.

Vladimir Alekseevich Ivanov – Doctor of Military Sciences, Professor, Chief Specialist of FSUE "STC "ORION". Tel.: +7 926 474 78 12, E-mail: iva.mac@mail.ru.

Mikhail Yuryevich Konyshov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the department of FSUE "STC "ORION". Tel.: +7 953 620 48 81, E-mail: misha-kon@mail.ru.

Ivan Vladimirovich Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Eemployee, Tel.: +7 926 474 78 12, E-mail: iva.mac@mail.ru.

Address: 127018, Moscow, Obraztsova str., 38, p. 1.

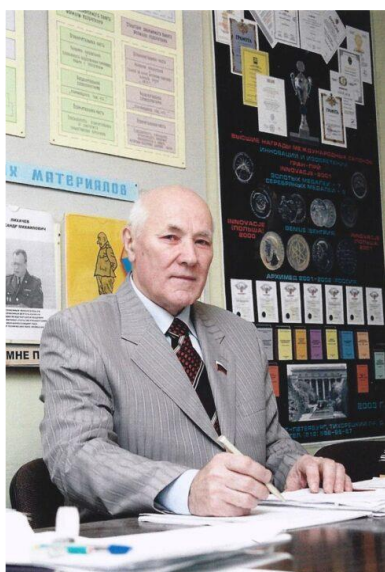
Для цитирования:

Маркин А. В., Иванов В. А., Коньшев М. Ю., Иванов И. В. Классификация потоков, циркулирующих в сетях связи, по признакам распределения двоичных комбинаций для решения задач оптимизации и портретизации трафика // Техника средств связи. 2025. № 3 (171). С. 86-96. DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-86-96.

For citation:

Markin A. V., Ivanov V. A., Konyshov M. Y., Ivanov I. V. Classification of streams circulating in communication networks according to the distribution of binary combinations for solving traffic optimization and portraiture problems. Means of communication equipment. 2025. № 3 (171). Pp. 86-96 (in Russian) DOI: 10.24412/2782-2141-2025-3-86-96.

ПОЛВЕКА НА СРЕМНИНЕ ВОЕННО-МОРСКОЙ НАУКИ



В 2025 году Заслуженный деятель науки Российской Федерации главный научный сотрудник Научно-исследовательского института оперативно-стратегических исследований строительства Военно-морского флота (НИИ ОСИС ВМФ), а также член редакционной коллегии нашего журнала «Means of communication equipment» («Техника средств связи») **Андрей Андреевич КАТАНОВИЧ** отмечает полувековой юбилей своей деятельности на благо военно-морской науки.

В НИИ ОСИС ВМФ Андрей Андреевич пришел в 1975 году по окончании Военной академии связи и за эти полвека прошел этапы становления военного ученого от младшего до главного научного сотрудника института. А до этого были 561-я мореходная школа специалистов рядового плавсостава (1959) и военное училище связи (1964), командные и инженерные должности в подразделениях специальной разведки ВМФ.

Доктор технических наук, профессор, капитан первого ранга в отставке Катанович А.А. за полувековой период жизни, всецело посвящённой науке, подготовил более 1000 научных трудов и получил 480 патентов на изобретения, является автором 28 научных монографий. В 1996 году он создал научную школу, которая вошла в реестр научных школ ВУНЦ ВМФ «ВМА» и Санкт-Петербурга, которую прошли более 60 адъюнктов и соискателей ученых степеней. В 2014 году как лучший изобретатель России награждён золотой медалью Всемирной организации интеллектуальной собственности. Участник многочисленных международных и всероссийских выставок и конференций, на которых завоевал 10 Гран-при, 113 золотых и серебряных медалей. Также Андрей Андреевич за заслуги в укреплении обороноспособности страны имеет ряд почётных званий: «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Заслуженный работник связи и информатизации Российской Федерации», «Заслуженный изобретатель Российской Федерации», «Почётный работник науки и техники Российской Федерации», «Почётный радист Российской Федерации», «Почётный изобретатель Санкт-Петербурга».

Несмотря на почтенный возраст, Катанович А.А. продолжает продуктивно и активно трудиться на благо военно-морской науки. Его энтузиазму могут позавидовать многие. В течение последних лет он ведет масштабную работу и научные изыскания, результатом которых стала научная монография «Совершенствование элементов системы связи ВМФ на основе новых технологий». В работе автор рассматривает и излагает вопросы создания элементов системы связи надводных кораблей, подводных лодок и береговых объектов ВМФ, предлагает новые принципы их построения и расчёта, а также схмотехнические решения, которые позволяют расширить функциональные возможности системы связи. Именно за этот фундаментальный труд в канун своего юбилея научной деятельности он награжден премией Конкурса на лучшую научную работу Вооружённых Сил Российской Федерации. При этом лауреатом этого престижного Конкурса военных ученых он становится уже в пятый раз (2012, 2019, 2022, 2023, 2024).

Редакция журнала «Means of communication equipment» («Техника средств связи») искренне поздравляет Катановича Андрея Андреевича с полувековым юбилеем на благо военно-морской науки, а также победой в престижном Конкурсе! Желаем крепкого здоровья, интересных проектов в его научной школе и новых творческих побед!

ЧЕЛОВЕК РОСТЕХА



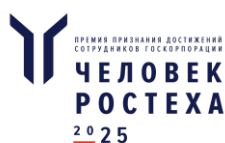
31 октября 2025 года 85-летний юбилей празднует выдающийся ученый и разработчик, стоявший у истоков зарождения системы обмена данными (СОД) нашей страны, генеральный конструктор ПАО «Интелтех», генеральный конструктор АСУ и обмена данными ВМФ (с 1994 г.), доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации **МИРОШНИКОВ Валентин Иванович**.

Трудовая биография Валентина Ивановича в ПАО «Интелтех» составляет 61 год и была всецело посвящена созданию и совершенствованию командной системы управления. Научная деятельность отмечена Государственной премией СССР (1978 г.) знаками «Почетный радист» (1985 г.) и «Изобретатель СССР» (1989 г.); Грамотой Губернатора Санкт-Петербурга (2005 г.), Премией Правительства РФ в области науки и техники (2005 г.), орденом «Знак Почета» (1981 г.). За выдающиеся

заслуги перед государством, достижения в труде по повышению эффективности морских сил сдерживания и большой вклад в дело укрепления обороноспособности России Мирошников В.И. награжден орденами «За заслуги перед Отечеством» III и IV степени.

Поистине делом всей жизни Валентина Ивановича, как одного из основных участников создания командной системы управления Вооруженными Силами РФ, стала её постоянное совершенствование с переходом на принципиально новую аппаратно-программную платформу с высокой степенью унификации, всеобъемлющим применением вычислительной техники, в том числе универсальной архитектуры, базирующейся на единой системе протоколов информационного обмена. На базе разработанных под его руководством системообразующих береговых и бортовых аппаратно-программных комплексов средств автоматизации связи и управления была создана первая в стране автоматизированная СОД ВМФ. Будучи первым заместителем, а затем и главным конструктором берегового объекта связи он впервые решил задачу автоматизированного управления подводными лодками (ПЛ) и надводными кораблями с объектов высшего звена управления. В результате на порядок удалось сократить время доведения информации от пунктов управления до сил в море. Им были завершены разработки: комплекса технических средств обработки и передачи информации на ПЛ, что позволило эффективно управлять морскими силами сдерживания в чрезвычайных условиях модернизированной СОД с высокими характеристиками, повышающими эффективность боевого применения сил ВМФ; уникального унифицированного комплекса помехозащищенной связи ВМФ, позволяющего управлять морскими силами сдерживания в условиях радиоэлектронного противодействия.

Главными особенностями характера юбиляра остаются: активная жизненная позиция, преданность избранному делу, значительный научно-технический и практический потенциал, организаторские способности, высокая внутренняя культура, осознание нравственного долга перед Родиной и подлинная причастность к событиям, происходящим в стране.



Научно-технический совет и трудовой коллектив ПАО «Интелтех», а также редакция журнала «Means of communication equipment» («Техника средств связи») сердечно поздравляет Мирошникова Валентина Ивановича со знаменательным юбилеем и вручением ему Премии признания достижений сотрудников госкорпорации **ЧЕЛОВЕК РОСТЕХА (2025)!** Желаем крепкого здоровья и исполнения всех конструкторских замыслов на благо нашей Родины!

Дорога отцов

Из русской деревни, родной Усторонье,
Отец в девятнадцать ушел на войну,
Простился поклоном он с милой сторонкой,
Оставил родительский дом и жену.

Письмо написал с Ленинградского фронта,
Наказывал сына Иваном назвать...
За месяц до родов пришла похоронка,
Что дочь родилась, не успел он узнать.

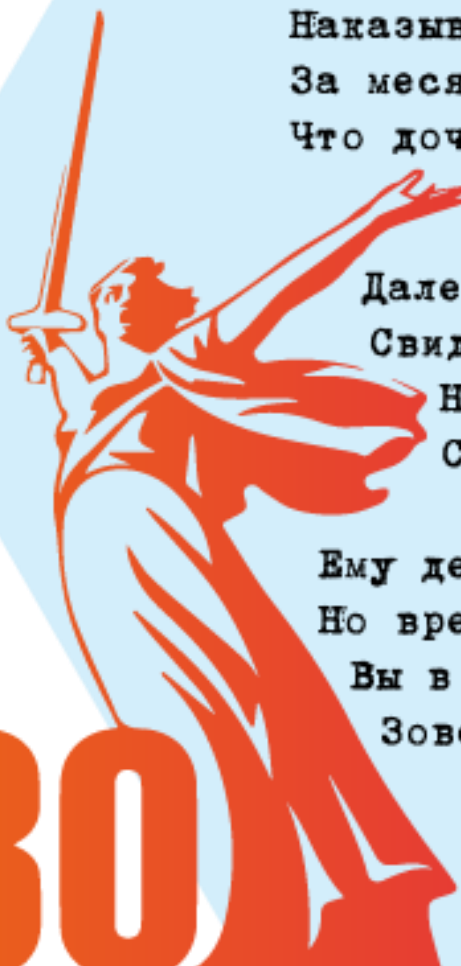
Далеким поселком с названием Дубровка*
Свидетелем боя неравного стал.

Над братской могилой, сжимая винтовку,
Скорбящий солдат занял свой пьедестал.

Ему девятнадцать, хоть жизнь быстротечна,
Но время не старит погибших юнцов.

Вы в наших сердцах прописались навечно,
Зовет нас на подвиг дорога отцов.

Галина Романова



80
ПОБЕДА!

* пос. Дубровка (Всеволожский район Ленинградской области) Место ожесточенных боев во время Великой Отечественной войны под названием «Невский пяточок»