



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

**Николашин Ю.Л.** Генеральный директор ПАО «Интелтех». Кандидат технических наук

**Nikolashin Y.L.** General Director of PJSC «Inteltech». Doctorate of Technical Sciences

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА:**

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

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

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

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

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

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:**

**Катанович А.А.** Главный научный сотрудник НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова». Д.т.н., профессор.

**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

**Кузичкин А.В.** Заместитель генерального директора Научно-исследовательского института телевидения по информационным технологиям.

**Kuzichkin A.V.** Deputy Director General of Information technology television Research Institute. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honored Science Worker of the Russian Federation.

**Курносов В.И.** Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ Заместитель генерального директора по научной работе АО «НИИ «Рубин». Д.т.н., профессор.

**Kurnosov V.I.** Director General in scientific work of JSC "NII" Rubin". Doctor of Technical Sciences, Professor.

**Лычагин Н.И.** Заслуженный работник высшей школы РФ Советник генерального конструктора ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор

**Lychagin N.I.** Higher School Honored Employee of the Russian Federation General Designer Advisor of PJSC «Inteltech». Doctor of Technical Sciences, Professor

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

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

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

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

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

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

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

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

**Яшин А.И.** Заместитель генерального директора – директор научно-технического центра ПАО «Интелтех». Д.т.н., профессор. Заслуженный деятель науки РФ

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

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

**EDITORIAL BOARD MEMBERS:**

**Бобровский В.И.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

**Bobrovskiy V.I.** PJSC «Inteltech» (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

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

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

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

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

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

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

**Жуков Г.А.** К.т.н., старший научный сотрудник Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Москва). Д.т.н., профессор

**Zhukov G.A.** PJSC «Inteltech» (St. Petersburg). Doctorate of Technical Sciences, Senior Researcher

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

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

**Легков К.Е.** Военная академия связи (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

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

**Липатников В.А.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., доцент

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

**Макаренко С.И.** АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж). Д.т.н., старший научный сотрудник

**Makarenko S.I.** Saint Petersburg State LETI Electrotechnical University of V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

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

**Makoviy V.A.** Concern Constellation JSC (Voronezh). Doctor of Technical Sciences. Senior Researcher

**Минаков В.Ф.** Череповецкое высшее военное инженерное училище радиозлектроники (г. Череповец). К.т.н.

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

**Михайлов Р.Л.** Череповецкое высшее военное инженерное училище радиозлектроники (г. Череповец). К.т.н.

**Mikhailov R.L.** Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics (Cherepovets). Doctorate of Technical Sciences

**Одоевский С.М.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

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

**Пашинцев В.П.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

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

**Путилин А.Н.** Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь). Д.т.н., профессор

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

**Федоренко В.В.** ПАО «Интелтех» (г. Санкт-Петербург). Д.т.н., профессор

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

*Периодичность выхода журнала 4 номера в год.*

*Публикация в журнале является научным печатным трудом. Основное содержание издания представляют собой научные статьи и научные обзоры.*

*Информация предназначена для детей старше 12 лет.*

*Журнал зарегистрирован как сетевое и печатное издание 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)*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

<b>Акулов В.С., Талагаев В.И., Угрик Л.Н.</b> Методология оценки влияния преднамеренных помех на радиотехнические системы Военно-морского флота.....	2
<b>Калинин А.Л.</b> Новое поколение коротковолновых радиопередающих устройств большой мощности.....	10
<b>Егоров В.В., Мингалев А.Н., Щеголова Е.Ф.</b> Многопараметрическая адаптация в коротковолновых системах передачи данных сигналами OFDM.....	18
<b>Баранов В.А., Иванцов О.В.</b> Методологические основы мягкой обработки рекуррентных последовательностей и их применение в корректирующих кодах.....	29
<b>Спивак А.И., Львов А.Е.</b> Модель системы управления телекоммуникационной сетью военного назначения.....	37
<b>Баранов В.А., Крюков О.В.</b> Аппроксимация значений параметров трафика мультисервисной сети связи смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент.....	42
<b>Молокович И.А.</b> Реализация гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в NS2.....	49
<b>Крюков О.В., Баранов В.А.</b> Метод оценивания значений класса трафика, формируемого источником мультисервисной сети связи на ограниченном интервале наблюдения.....	56

**ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

<b>Шаптала В.С.</b> Использование FBMC/OQAM в пакетном радиомодеме коротковолнового диапазона.....	62
---	----

**ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

<b>Кулешов И.А., Спивак А.И., Львов А.Е.</b> Анализ способов некриптографической защиты информации от побочных электромагнитных излучений и наводок на объектах связи.....	67
<b>Мамончикова А.С.</b> Постановка задачи на разработку методики достижения выигрыша телекоммуникационной системы в трехстороннем динамическом информационном конфликте.....	74

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

<b>Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н.</b> Интегрированная платформа анализа и исполнения блочно-структурированных бизнес-процессов.....	79
---	----

**ПОСВЯЩАЕТСЯ ЮБИЛЯРУ**

<b>Мирошников В.И.</b> Академик И.Д. Спасский и его вклад в создание и развитие средств автоматизированного управления и связи с морскими стратегическими силами сдерживания.....	91
--	----

**CONTENTS**

**COMMUNICATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

<b>Akulov V.S., Talagaev V.I., Ugrik L.N.</b> Methodology for assessing the impact of intentional interference for Navy radio engineering systems.....	2
<b>Kalinin A.L.</b> A new generation of high-power short-wave radio transmitting devices.....	10
<b>Egorov V.V., Mingalev A.N., Shcheglova E.F.</b> Multivariable adaptation of HF data transmission systems with OFDM signals.....	18
<b>Baranov V.A., Ivantsov O.V.</b> Methodological foundations of soft processing of recurrent sequences and their application in correcting codes.....	29
<b>Spivak A.I., L'vov A.E.</b> Military Telecommunications Network Management System Model.....	37
<b>Baranov V.A., Kriukov O.V.</b> Approximation of traffic parameters values of a multiservice communication network by a mixture of multivariate normal distributions with a different number of components.....	42
<b>Molokovich I.A.</b> Implementation of the hybrid wireless network routing Protocol in NS2.....	49
<b>Kriukov O.V., Baranov V.A.</b> Method for estimating the values of the traffic class generated by the source of a multiservice communication network on a limited observation interval.....	56

**TRANSMISSION, RECEPTION AND PROCESSING OF SIGNALS**

<b>Shaptala V.S.</b> FBMC/OQAM usage in packet radio modem for HF range.....	62
---	----

**INFORMATION SECURITY ISSUES**

<b>Kuleshov I.A., Spivak A.I., L'vov A.E.</b> Analysis of methods of non-cryptographic protection against PEMIN at facilities.....	67
<b>Mamonchikova A.S.</b> Setting the task for the method development of achieving the gain of the telecommunication system in a tripartite dynamic information conflict.....	74

**COMPUTING SYSTEMS**

<b>Vasiliev N.V., Yashin A.I., Dovzhikov S.N.</b> Integration platform for execution, process mining and performance analysis of business processes.....	79
---	----

**DEDICATED TO THE JUBILEE**

<b>Miroshnikov V.I.</b> Academician I.D. Spassky and his contribution to the creation and development of automated control and communication tools with marine strategic deterrence forces.....	91
--	----

**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 621.396:621.391.825

Акулов В.С., Талагаев В.И., Угрик Л.Н.

**Методология оценки влияния преднамеренных помех на радиотехнические системы Военно-морского флота**

***Аннотация.** Обеспечение устойчивости к преднамеренным помехам связных и измерительных радиотехнических систем Военно-морского флота (связи, локации, навигации и управления оружием) на протяжении последних десятилетий остается актуальной, важной и сложной научно-технической проблемой, как при их проектировании, так и при функционировании систем в реальных условиях. Цель статьи - разработка способа и методики численной оценки влияния преднамеренных помех на энергетические, временные и пространственные параметры радиотехнических систем при заданных требованиях к качеству их функционирования и зоне обслуживания. В работе использован математический метод анализа и выбора структуры и параметров радиотехнической системы, основанный на сравнительной численной оценке влияния преднамеренных воздействий на энергетические характеристики системы. Новизна предлагаемой методологии заключается в возможности абстрагироваться от заданных тактико-технических требований к системе и ее характеристикам и проведения численной оценки только её энергетических параметров в условиях преднамеренных помех. В статье разработан способ и математический аппарат оценки, приведен пример расчета по предложенной методике энергетических параметров и дальности связи длинноволновых радиоканалов систем связи, их устойчивости к преднамеренным помехам и получения её критических значений. Практическая значимость результатов работы заключается в возможности выбирать наилучшие варианты структуры радиотехнической систем для различных условий функционирования и воздействия на них сложных преднамеренных помех. Разработанная методика численной оценки может использоваться также в качестве математического обеспечения программных средств интеллектуальной поддержки проектировщиков радиотехнических систем и должностных лиц органов оперативного управления системами в условиях радиоэлектронного противодействия.*

***Ключевые слова:** радиотехническая система, радиосвязь, радиолокация, радиоуправляемое оружие, радиоэлектронное подавление, преднамеренная помеха, устойчивость к помехам, энергетические параметры, зона обслуживания, дальность связи.*

**Введение**

Создание крейсера «Изумруд» и миноносца «Громкий» в русско-японскую войну (1903-1905 гг.) помех искровой радиосвязи японских кораблей положило начало радиотехнической разведке (РТР) и радиоэлектронному подавлению (РЭП) помехами связных и измерительных радиотехнических систем: радиосвязи, радиолокации и, в дальнейшем, систем управления оружием. Цель создания преднамеренных помех – нарушение передачи управляющей информации и затруднение определения координат и параметров движения морских и воздушных объектов. На опыте первой и второй мировых войн дальнейшее развитие методы и средства РТР и РЭП радиоканалов (РК) радиотехнических систем получили в послевоенные годы [1].

В настоящее время совершенствование радиоэлектронной и вычислительной техники и бурное развитие радиоуправляемого оружия привело к существенному изменению значения и характера использования радио в боевых действиях на море. В военных доктринах ведущих стран мира первым этапом любого вооруженного конфликта становится радиоэлектронная борьба, предполагающая проведение комплекса организационно-технических мероприятий по выявлению РТР радиоэлектронных систем связи и управления силами и оружием эвентуального противника, их огневому и радиоэлектронному подавлению, а также радиоэлектронную защиту своих систем управления, радиосвязи и радиолокации от преднамеренных помех [2-4].

Поэтому в исследовательском плане актуальной и важной проблемой для разработчиков радиотехнических систем ВМФ становится создание методологии численной оценки устойчивости к помеховым воздействиям и их влияния на выбор энергетических параметров и зон обслуживания [5, 6]. В работе предложен методологический подход к сравнительной численной оценке свойства устойчивости к преднамеренным помехам и способ выбора структуры и энергетических параметров проектируемых помехоустойчивых радиотехнических систем ВМФ.

### Постановка задачи

Рассмотрим ситуацию, когда на РК радиотехнической системы, например, на РК системы связи действуют два вида помех: случайные, обусловленные естественным фоном и собственными шумами приемного устройства, и сложные преднамеренные помехи, создаваемые противоборствующей системой. Преднамеренные помехи имеют заданную мощность  $P_h$  в полосе частот сложного сигнала  $F$ . Предполагается, что полезный сигнал и преднамеренная помеха обладают равномерными спектрами. На практике это часто встречающийся случай, поскольку при этом система «постановщик помех – приемник РК» находится в динамическом равновесии, когда ни одна из сторон не получает дополнительного выигрыша в изменении помехоустойчивости [7]. Случайные естественные помехи задаются спектральной плотностью  $N_n$  и также имеют равномерный спектр.

Задачей работы является создание формального аппарата для получения численных значений энергетических параметров РК и их устойчивости к естественным и преднамеренным помехам с примером инженерного расчета.

### Методология оценки устойчивости и энергетических параметров РК

В описанной ситуации при квадратурном приеме и накоплении сигнала отношение сигнал/помеха  $h^2$  на входе приемника РК определяется выражением [8, 9]

$$h^2 = \frac{P_s}{\frac{P_h}{FT} + \frac{N_n}{T}}, \quad (1)$$

где:  $P_s$  – мощность сигнала. Значение  $h^2$  определяется требованиями к характеристикам РК и качеству доставки сигналов по РК. Далее будем считать это значение заданным.

Выражение (1) имеет ясный физический смысл. Оба члена знаменателя содержат спектральные плотности составляющих помехи. Плотность преднамеренной помехи, равномерно распределенной по полосе сигнала  $F$ , составляет  $N_h = P_h / F$ . Обе составляющие помехи обрабатываются в приемнике путем накопления энергии в течение длительности единичного сигнала  $T$ .

Для анализа энергетических характеристик системы выражение (1) удобнее переписать в виде

$$\frac{1}{h^2} = \frac{N_n/T}{P_s} + \frac{1}{B} \frac{P_h}{P_s}, \quad (2)$$

где введена база сигнала  $B = FT$ .

Будем считать, что при отсутствии преднамеренной помехи, когда  $P_h = 0$ , должно обеспечиваться такое же отношение сигнал/помеха  $h^2$ , но требуемая мощность сигнала теперь будет  $P_{s0}$

$$\frac{1}{h^2} = \frac{N_n/T}{P_{s0}}. \quad (3)$$

Исключив с помощью соотношения (3) комбинацию  $N_n/T$  из формулы (2), получим

$$P_h = K_h (P_s - P_{s0}), \tag{4}$$

где

$$K_h = B/h^2. \tag{5}$$

Поскольку равенство (4) получено непосредственно из соотношения (2), то оно обеспечивает указанное отношение  $h^2$ . Вместе с тем оно связывает значение уровня мощности помех  $P_h$  и приращение уровня сигнала  $P_s - P_{s0}$ , необходимое для сохранения требуемого значения отношения  $h^2$ .

Для анализа следствий формулу (4) удобнее преобразовать к виду, содержащему только относительные величины

$$\frac{P_s}{P_{s0}} = \frac{1}{K_h} \frac{P_h}{P_{s0}} + 1. \tag{6}$$

Для иллюстрации смысла выражения (6) рассмотрим гипотетический численный пример. Пусть  $B = 100$ , а  $h^2 = 10$ , что соответствует среднему, используемому на практике, требуемому значению отношения сигнал/помеха. В данном случае коэффициент  $K_h = 10$ .

Если  $P_h = 0$ , то требуемая для обеспечения заданного значения  $h^2$  мощность сигнала  $P_s = P_{s0}$ . При включении преднамеренной помехи  $P_h$ , 10-тикратно превышающей по мощности полезный сигнал  $P_{s0}$ , указанное отношение нарушается. Но оно восстанавливается при увеличении вдвое излученной мощности  $P_s$  передатчика РК, генерирующего сигнал. Если меры по борьбе с преднамеренными помехами не приняты, т. е.  $B = 1$ , то  $K_h = 0.1$ . В этом случае для компенсации преднамеренной помехи  $P_h$ , 10-тикратно превышающей исходный сигнал  $P_{s0}$ , потребуется не менее, чем 100-кратное увеличение мощности сигнала.

Результаты детальных расчетов по формуле (6) приведены на рис. 1.

Заметный выигрыш по мощности сигнала, требуемой для противодействия преднамеренной помехе, имеет место для значений устойчивости  $K_h \geq 10.0$ .

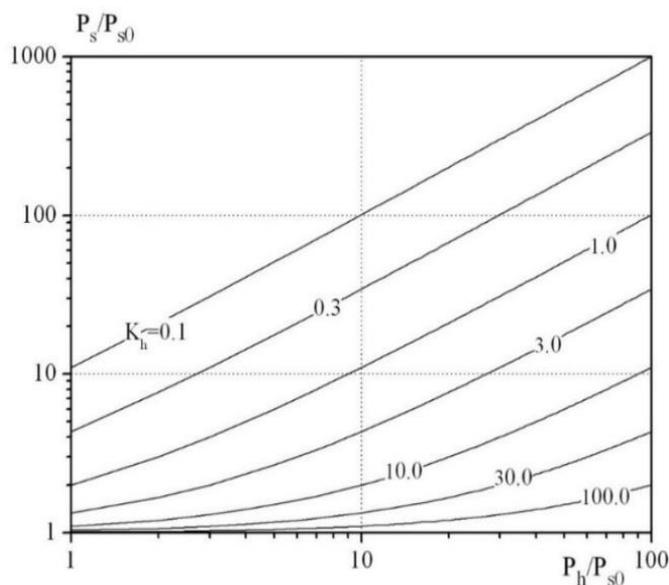


Рис. 1. Зависимости отношения мощностей полезного сигнала и преднамеренной помехи для различных значений коэффициента устойчивости РК

Напомним, что выполненный анализ основывался только на исходном отношении (1), которое записано в предположении о равномерности спектров как естественного фона, так и преднамеренной помехи. Никакие другие предположения здесь не допускались.

Определенный формулой (5) коэффициент  $K_h$ , естественно можно назвать коэффициентом устойчивости РК к преднамеренным помехам, поскольку он однозначно определяет энергетические меры по противодействию преднамеренной помехе. Здесь, однако, имеют место некоторые неудобства. Первое неудобство связано с тем, что выражения (4) и (6) не являются простой пропорцией между мощностью помехи  $P_h$  и компенсирующей мощностью сигнала  $P_s$ . Это связано с тем, что исходные выражения (1) или (2) содержат сумму помех. При выводе формулы (4) был исключен естественный фон  $N_n/T$ . Он, однако, не был приравнен нулю, а заменен на мощность сигнала  $P_{S0}$  с помощью выражения (3), поскольку предполагается, что естественный фон и отношение  $h^2$  заданы и неизменны. Второе неудобство определяется численными значениями коэффициента  $K_h$ . Было бы нагляднее, если бы при  $B=1$ , т. е. при отсутствии мер по борьбе с преднамеренными помехами, значение этого коэффициента составляло 0 или 1. Выше было показано, что в этом случае  $K_h = 1/h^2$ .

Указанные неудобства компенсируются простотой соотношений (4) – (6). Вместе с тем данные соотношения однозначно определяют эффективность мер противодействия преднамеренным помехам в РК системы.

На практике не всегда существует возможность повысить энергию сигнала для обеспечения требуемой защиты от преднамеренных помех. В таких случаях приходится идти на контролируемое ухудшение других параметров РК. Проанализируем возможное уменьшение дальности качественной передачи сигнала при наличии преднамеренной помехи. Для этого рассмотрим ситуацию, схематично показанную на рис. 2.

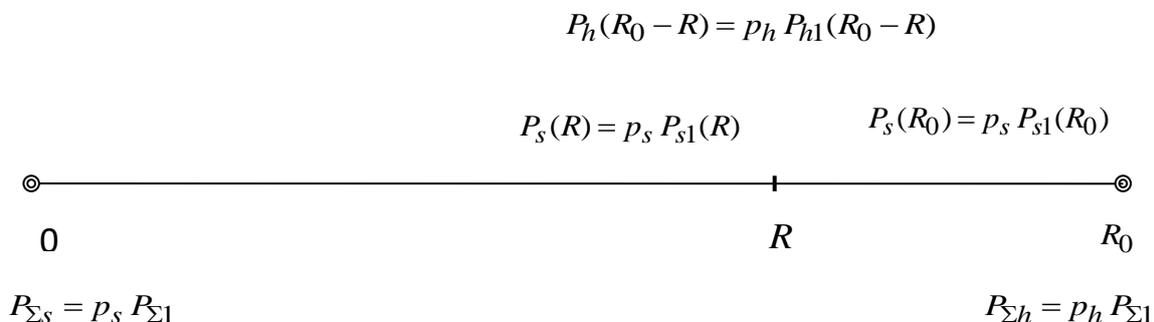


Рис. 2. Схема противоборства радиотехнической системы со средствами РЭП

На рис. 2 в точке «0» находится источник сигнала с излученной мощностью  $P_{\Sigma s} = p_s P_{s1}$ , а в точке « $R_0$ » – источник преднамеренной помехи с излученной мощностью  $P_{\Sigma h} = p_h P_{h1}$ , где  $P_{s1}$  – единичная излученная мощность. Смысл безразмерных коэффициентов  $p_s$  и  $p_h$  ясен из приведенных представлений.

Мощности сигнала и преднамеренной помехи на расстоянии  $R$  от источника соответственно составляют

$$P_s(R) = p_s P_{s1}(R); \tag{7}$$

$$P_h(R_0 - R) = p_h P_{h1}(R_0 - R), \tag{8}$$

где  $P_{s1}$  и  $P_{h1}$  – мощности сигнала и помехи в этой же точке для единичной излученной мощности их источников. С учетом выражений (7) и (8) отношение (2) для этой точки в данном случае примет вид

$$\frac{1}{h^2} = \frac{N_n/T}{p_s P_{s1}(R)} + \frac{1}{B} \frac{p_h P_{h1}(R_0 - R)}{p_s P_{s1}(R)}. \quad (9)$$

Для точки « $R_0$ » при отсутствии преднамеренной помехи отношение (14) составит

$$\frac{1}{h^2} = \frac{N_n/T}{p_s P_{s1}(R_0)}. \quad (10)$$

С помощью равенства (10) исключим отношение  $N_n/T/p_s$  из выражения (9)

$$\frac{1}{h^2} \left[ 1 - \frac{P_{s1}(R_0)}{P_{s1}(R)} \right] = \frac{1}{B} \frac{p_h P_{h1}(R_0 - R)}{p_s P_{s1}(R)}. \quad (11)$$

Здесь подобрано соотношение шумовой помехи  $N_n/T$  и излученной мощности сигнала  $p_s$  таким образом, чтобы при отсутствии преднамеренной помехи заданное отношение  $h^2$  выполнялось при  $R = R_0$ . Это и означает последнее преобразование.

Выражения (11) и (6) получены из исходного отношения (2) с помощью похожих рассуждений. В обоих случаях для исключения естественного фона  $N_n/T$  выполнена нормировка к ситуации отсутствия преднамеренных помех. Однако, в соотношении (11) присутствует дополнительный параметр  $R$ , поэтому оно не может следовать непосредственно из формулы (6).

При практических расчетах мощность сигнала и преднамеренной помехи определяется через напряженность поля в заданной точке. Примем, что законы распространения электромагнитных волн полезного сигнала и преднамеренной помехи совпадают, т. е.

$$P_{s1}(R) = P_{h1}(R) = E_1^2(R), \quad (12)$$

где  $E_1(R)$  – напряженность поля для единичной излученной мощности  $P_{\Sigma 1}$ .

С учетом предположения (12) из соотношения (11) следует уравнение относительно расстояния  $R$

$$K_h \left[ 1 - \frac{E_1^2(R_0)}{E_1^2(R)} \right] - \frac{p_h E_1^2(R_0 - R)}{p_s E_1^2(R)} = 0. \quad (13)$$

Нетрудно убедиться, что при  $p_h = 0$  решением уравнения (13) является расстояние  $R = R_0$ . Это расстояние, в соответствии с нашим предположением, является границей возможной зоны обслуживания системы, например дальностью связи. При воздействии преднамеренной помехи эта граница «отжимается» от источника помех, т. е. решением данного уравнения оказывается значение  $R < R_0$ . Этот эффект тем больше, чем больше значение  $p_h$  и меньше коэффициент устойчивости к преднамеренным помехам  $K_h$ . Это иллюстрируется приводимыми ниже результатами расчетов.

### Пример расчета

В качестве зависимости  $E_1(R)$  примем зависимость, определяемую формулой Остина [10]. Считается, что эта формула справедлива для дневных условий в диапазонах длинных (ДВ) и сверхдлинных (СДВ) волн, используемых в системах морской радиосвязи. Формула Остина в настоящее время не применяется для практических расчетов поля ввиду ее недостаточной точности. Однако она может быть использована для сравнительных оценок, поскольку удовлетворительно описывает основные зависимости напряженности поля в ДВ и СДВ РК от дистанции связи.

Результаты иллюстративных расчетов с помощью численного решения уравнения (13) для частоты 20 кГц представлены на рис. 3. Естественно, что искомое значение расстояния  $R$

уменьшается с ростом уровня помехи  $p_h / p_s$  и с уменьшением коэффициента устойчивости РК к преднамеренным помехам  $K_h$ .

Разумеется, что приведенные результаты расчетов по возможному сокращению дальности связи вследствие действия преднамеренных помех в РК, нельзя непосредственно использовать при проектировании радиотехнических систем, поскольку для этого необходимо более детально и строго учитывать также законы распространения электромагнитных волн различных диапазонов. При проектировании широкополосной радиотехнической системы для выбора базы полезного сигнала  $B = FT$ , а точнее коэффициента устойчивости РК к преднамеренным помехам  $K_h$ , нужно руководствоваться не только приведенными рассуждениями. Чаще полоса  $F$  определяется полосой пропускания передающей антенны и дисперсионными свойствами РК, а длительность единичного сигнала  $T$  существенно зависит от требований к скорости передачи. Эти параметры необходимо учитывать особым способом дополнительно. В данной работе они считаются заданными.

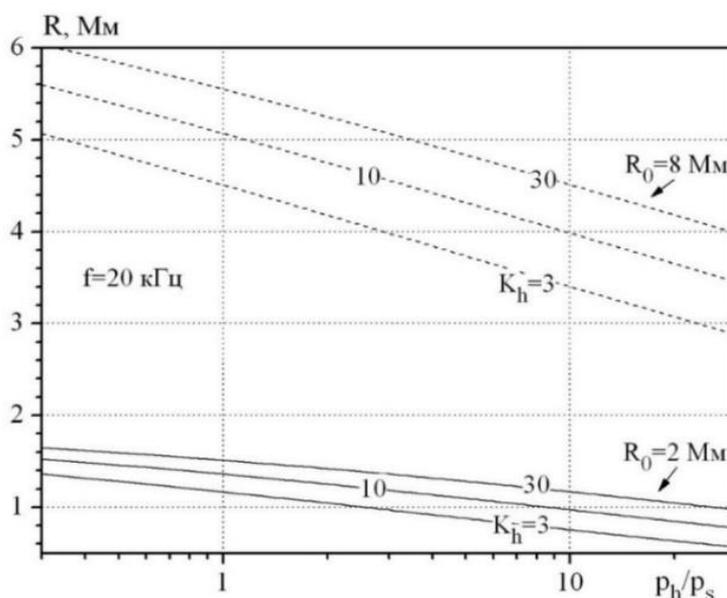


Рис. 3. Зависимости дальности связи от отношения сигнал/помеха в точке приема при различных значениях коэффициента устойчивости системы

### Заключение

Представленная методология оценки влияния преднамеренных помех на энергетические характеристики РК радиотехнических систем ВМФ доведена до инженерных формул. Проведенные с их помощью расчеты могут оказаться полезными, поскольку они прямо связаны с физическими свойствами РК радиотехнических систем различного назначения. Можно, например, получить возможные граничные значения коэффициента устойчивости радиотехнической системы к широкополосным преднамеренным помехам с учетом которых можно сделать заключение о целесообразности проведения её проектирования и разработки. Способ оценки может быть использован также при выборе структуры проектируемых систем и энергетических параметров РК, при расчете помехоустойчивости и дальности обслуживания систем, функционирующих в условиях естественного шума и преднамеренных помех.

### Литература

1. Рачков В.К., Михедько М.С., Макаров Д.М. Развитие способов радиопротиводействия в войне на море // Морской сборник. 1971. № 5. С. 27-31.
2. Таманский В. Радиоэлектронная борьба в планах США и НАТО // Зарубежное военное обозрение. 1985. № 7. С. 10-12.
3. Гранкин В.Я. Создание, задачи и способы РЭБ // Военная мысль. 1978. № 11. С. 41-42.
4. Памей А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1981. 152 с.
5. Талагаев В.И. Методологический подход к анализу и обеспечению устойчивости систем морской радиосвязи // Техника средств связи. 2015. № 4(143). С. 86-91.
6. Талагаев В.И. Управление системой связи и обмена данными ВМФ в условиях радиоэлектронного подавления // Техника средств связи. 2018. № 4 (144). С.130-134.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. С. 384.
8. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. С. 375.
9. Харкевич А.А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. С. 275.
10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. С. 336.

### References

1. Rachkov V.K., Mikhedko M.S., Makarov D.M. Development of methods of radio warfare in the war at sea. Marine collection. 1971. No. 5. Pp. 27-31.
2. Taman V. Electronic warfare in the plans of the USA and NATO. Foreign military review. 1985. No. 7. Pp. 10-12.
3. Grankin V.Ya. Creation, tasks and methods of electronic warfare. Military thought. 1978. No. 11. Pp. 41-42.
4. Pamey A.I. Electronic warfare. Military building. 1981. Pp. 3-4, 152.
5. Talagaev V.I. Methodological approach to analysis and ensuring the stability of marine radio communication systems. Communications technology. 2015. No. 4 (143). Pp. 86-91.
6. Talagaev V.I. Management of the Navy communication and data exchange system in the conditions of electronic suppression. Communications equipment. 2018. No. 4 (144). P. 130-134.
7. Varakin L.E. Communication systems with noise-like signals. Moscow. Radio and communications. 1985. Pp. 384.
8. Varakin L.E. Complex signal theory. Moscow. Sov. radio. 1970. Pp. 375.
9. Kharkevich A.A. The fight against interference. Moscow. Science. 1965, Pp.275. Pp. 336.
10. Dolukhanov M.P. Distribution of radio waves. Moscow. Communication. 1972.

Статья поступила 05 августа 2021 г.

### Информация об авторах

Акулов Валерий Семёнович – Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ КК и СОИ и Р. Тел.: +7(812)542-90-54. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Талагаев Владимир Иванович – Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор Академии военных наук. Ведущий научный сотрудник ПАО «Интелтех». Тел. +7(812) 448-96-50. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Угрик Лариса Николаевна – Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Старший научный сотрудник НИЦ ТТ ВМФ КК и СОИ и Р. Тел.: +7(812)542-90-54. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

### Methodology for assessing the impact of intentional interference for Navy radio engineering systems

V.S. Akulov, V.I. Talagaev, L.N. Ugrik

**Annotation.** *Setting the task: ensuring resistance to deliberate interference of communication and measuring navy radio engineering systems (communications, locations and weapons control) over the past decades remains an urgent, important and complex scientific and technical problem, both in their design and in the functioning of systems in real conditions. The purpose of the article is to develop a method and a mathematical apparatus for numerical assessment of the effect of intentional interference on the energy, time and spatial parameters of radio systems at given requirements for their quality of operation and service area. Methods used: a mathematical method of analyzing and choosing the structure and parameters of a radio engineering system, based on a comparative numerical assessment of the effect of deliberate effects on the energy characteristics of the system. Novelty: the novelty of the proposed methodology lies in the ability to abstract from the given tactical and technical requirements for the system and its characteristics and to conduct a numerical assessment of only its energy parameters in conditions of deliberate interference. Results: Method and mathematical apparatus of estimation is developed, example of calculation of long-wave radio channels of communication systems, their resistance to intentional interference and obtaining its critical values is given according to proposed method of energy parameters and communication range. Practical significance: the practical significance of the work results is the ability to choose the best options for the structure of radio systems for various operating conditions and the impact on them of complex intentional interference. The developed numerical evaluation technique can also be used as a mathematical support for software tools for intelligent support of designers of radio engineering systems and officials of operational systems control bodies in radio electronic countermeasures.*

**Keywords:** *radio system, radio communication, radar, radio-controlled weapons, electronic suppression, intentional interference, resistance to interference, energy parameters, service area, communication range.*

#### Information about Authors

Valery Semenovich Akulov – Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher at the Research Center TT Navy KK and SOI and R. Tel.: +7 (812) 542-90-54. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8, Kantemirovskaya St.

Vladimir Ivanovich Talagaev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Academy of Military Sciences. Leading researcher at PJSC «Inteltech». Tel. +7 (812) 448-96-50. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8, Kantemirovskaya St.

Larisa Nikolaevna Ugrik – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Senior Researcher at the Research Center TT Navy KK and SOI and R. Tel.: +7 (812) 542-90-54. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8, Kantemirovskaya St.

**Для цитирования:** Акулов В.С., Талагаев В.И., Угрик Л.Н. Методология оценки влияния преднамеренных помех на радиотехнические системы военно-морского флота // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 2-9.

**For citation:** Akulov V.S., Talagaev V.I., Ugrik L.N. Methodology for assessing the impact of intentional interference for Navy radio engineering systems. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 2-9 (in Russian).

УДК 007.51

**Новое поколение коротковолновых радиопередающих устройств большой мощности**

Калинин А.Л.

***Аннотация.** В статье рассмотрены пути создания, варианты построения транзисторных передатчиков коротковолнового диапазона нового поколения мощностью 20 кВт и более. Подробно описаны варианты построения высокочастотного тракта радиопередающего устройства, особенности, которые должны учитываться при эксплуатации, а именно – наличие или отсутствие в составе изделия антенно-согласующих устройств, их влияние на выходные параметры изделия; приведены принципы построения модульных усилителей мощности. Приведена информация о разработанных и серийно изготавливаемых АО «РИМР» транзисторных передающих устройствах коротковолнового диапазона; проведено сравнение серийных радиопередающих устройств мощностью 5 кВт по ряду показателей. Особое внимание уделено вновь разработанному передающему модулю мощностью 20 кВт. Приведены его характеристики, рассмотрены его устройство и принципы работы. Показаны преимущества данного радиопередающего устройства в сравнении с аналогом, выпускаемым другим производителем.*

***Ключевые слова:** коротковолновое радиопередающее устройство, антенно-согласующее устройство, коэффициент бегущей волны, высокочастотный тракт.*

**Введение**

При создании передатчиков мощностью 20 кВт и более коллектив акционерного общества «Российский институт мощного радиостроения» (АО «РИМР») нашел технические решения для обеспечения существующих требований к параметрам разрабатываемых устройств. Найденные решения, реализованные с применением современной элементной базы и программного обеспечения, позволили создать транзисторный передатчик коротковолнового (КВ) диапазона нового поколения.

**1 Два варианта построения высокочастотного тракта радиопередающего устройства**

При разработке радиопередающих устройств (РПДУ) мощностью 20 кВт применяются два варианта построения мощного высокочастотного (ВЧ) тракта. Первый вариант с использованием одного или нескольких антенно-согласующих устройств (АнСУ) на разных ступенях сложения мощности, второй вариант без применения АнСУ [1].

Вариант с применением АнСУ обеспечивает гарантированный уровень выходной мощности 20 кВт при ухудшении КБВ антенны с 1 вплоть до значения 0,25 (рис. 1). Вариант без АнСУ обеспечивает гарантированный уровень выходной мощности 20 кВт при ухудшении КБВ антенны от 1 до 0,7 при работе с антеннами с КБВ ниже 0,7 уровень выходной мощности может снижаться в 2-3 раза в зависимости от значения коэффициента бегущей волны (КБВ) и особенностей передатчика (его запаса по мощности, что сказывается на его габаритах, энергопотреблении и цене).

Обычно используемые антенны имеют КБВ на уровне 0,5-0,25, поэтому реальная излучаемая мощность с использованием передатчиков без АнСУ находится на уровне 10 кВт, а в некоторых случаях снижается и более.

Дополнительным преимуществом РПДУ с АнСУ по сравнению с РПДУ без АнСУ являются меньшее энергопотребление (большой КПД), меньшие габариты, меньшая себестоимость.

Для обеспечения мощности 20 кВт в передатчике «Водопад 20» были применены 6 мощных радиочастотных ламп, включенных параллельно, и АнСУ со ступенчатой настройкой с помощью переключаемых цепей коррекции. Внедрение ступенчатой настройки с использованием мощных вакуумных реле позволило сократить время настройки с 30 с при механической настройке до 5 с.

Недостатком РПДУ с АнСУ по сравнению с РПДУ без АнСУ является большее время выхода на рабочую частоту (время настройки), невозможность использования РПДУ в режимах работы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ).



Рис. 1. Передатчик «ВОДОПАД 20». Во втором слева шкафу на переднем плане блок АнСУ с согласующими длинными линиями, в третьем слева шкафу блок усиления мощности с радиолампами с жидкостным охлаждением

В ходе разработки передатчика, размещаемого на автомобильном шасси, был найден вариант создания модульного усилителя мощности. В качестве модулей усиления использовались четыре независимых усилителя высокой частоты на двух мощных радиолампах мощностью 5 кВт каждый.

ВЧ мощность от них складывалась в устройстве сложения. Все эти устройства удалось скомпоновать в кузове автомобиля. Для обеспечения быстрого переключения по частоте от АнСУ пришлось отказаться, и при низких КБВ антенн мощность снижалась.

### 1.1 Серийные образцы двух типов РПДУ, изготавливаемые АО «РИМР»

Использование радиочастотных ламп в конструкции передатчиков требовало обеспечения высоковольтного питания до 2500 В, усложняло конструкцию, кроме того, надежность самих устройств и их взаимозаменяемость начали уступать твердотельным устройствам нового поколения.

В рамках повышения надежности и долговечности изделий и замены радиоламп с малым сроком наработки на отказ на транзисторы АО «РИМР» разработало и серийно изготавливает транзисторные передатчики КВ диапазона мощностью 5 кВт с АнСУ и без АнСУ в составе (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Транзисторные передатчики 5 кВт: а) РПДУ без АнСУ, время переключения по частоте 50 мс; б) РПДУ с АнСУ, время переключения по частоте 5с в режиме настройки

При сравнении характеристик серийных РПДУ 5 кВт наиболее предпочтительным для применения в составе передатчика 20 кВт является транзисторный вариант с АнСУ [2] (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение серийных РПДУ 5 кВт

Параметр	Ламповый РПДУ 5 кВт без АнСУ	Транзисторный РПДУ 5 кВт с АнСУ	Транзисторный 5 кВт без Ансу
Мощность излучения при КБВ антенны 0,3	3 кВт	5 кВт	3кВт
Объем	0,79 м <sup>3</sup>	0,85м <sup>3</sup>	2.2 м <sup>3</sup>
Количество воздуха для охлаждения	2000 м <sup>3</sup> /ч	1400 м <sup>3</sup> /ч	2000 м <sup>3</sup> /ч
Время наработки на отказ оконечного усилителя мощности	750 ч (2 лампы)	>19000 ч (расчетная по статистике эксплуатации транзисторных блоков прототипов)	>19000 ч
КПД(%)	20	>38	25
Напряжение питания оконечных элементов усиления (безопасность эксплуатации)	До 2400 В	48 В	48 В
Устойчивость при передаче сигналов с особо высоким пик-фактором	высокая	средняя	высокая
Время настройки на частоту	50мс	5 с с АнСУ предыдущего поколения 150 мс АнСУ нового поколения	50мс
Возможность блочной замены	Частичная, при замене ламп требуется дополнительное жестчение	Да	Да
Возможность экономного режима с отключением части усилителей и экономии электроэнергии	нет	нет	Есть, работа на четверти мощности.
Наличие нескольких поставщиков мощных элементов усиления, их надежность.	Единственный поставщик ПАО «Светлана», малые возобновляемые серии.	Несколько иностранных поставщиков, большие постоянные серии поставок.	Несколько иностранных поставщиков, большие постоянные серии поставок

Исходя из требований по эксплуатации и развития элементной базы, при разработке передатчика 20 кВт могут быть предложены рекомендации:

- использование в качестве оконечных элементов усиления транзисторов;
- модульное построение, упрощающее эксплуатацию, регулировку, ремонт изделия;
- обеспечение режимов работы как на полную мощность на одном из выходов передатчика, так и одновременную работу с пониженной мощностью на нескольких выходах в разных родах работ на разных частотах;
- воздушное охлаждение;
- обеспечение номинальной выходной мощности при КБВ антенны равно 0,3 и более;
- время перестройки по частоте во всем рабочем диапазоне 2,9999 – 29,99999 МГц не более 200 мс;
- электропитание изделия от промышленной сети напряжением 380 В, частотой (50 ±2) Гц;
- потребляемая от сети мощность – не более 80 кВт (КПД 25 %).

## 2 Новая разработка – передающий модуль 20 кВт

В ходе дальнейшей модернизации парка изготавливаемых передатчиков КВ диапазона АО «РИМР» провело разработку АнСУ нового поколения, в котором решение о выборе согласующих элементов принималось на основе расчета после измерения параметров антенны. Это решение обеспечило время настройки не более 150 мс. Также была проведена модернизация устройства сложения 20 кВт. Проведенные работы позволили создать транзисторный передающий модуль КВ диапазона. Модуль имеет воздушное охлаждение и обеспечивает выходную мощность 20 кВт при КБВ антенны не хуже 0,25, с временем настройки не более 150 мс.

Дополнительно модуль обеспечивает возможность автономной работы каждого из входящих в его состав 4-х 5-киловаттных транзисторных передатчиков, а также их попарное сложение. Габариты модуля сравнимы с габаритами передатчика на автомобильном шасси, что обеспечивает возможность создания мобильного транзисторного передатчика нового поколения. Промышленно изготовленный макет модуля проходит испытания на стенде предприятия. Внешний вид модуля приведен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид макета передающего модуля КВ диапазона мощностью 20 кВт

При необходимости создания средства связи с обеспечением режимов ППРЧ, можно использовать возможность АнСУ нового поколения обеспечивать согласование с антенной в более широком диапазоне. Дополнительно вместо передатчиков с АнСУ в модуле возможно применение 4-х передатчиков без АнСУ, но это приведет к увеличению габаритов не менее чем в 1,5 раза.

### 2.1 Назначение передающего модуля 20 кВт

Изделие может использоваться при организации сетей или линий связи в симплексном режиме и дуплексном режиме с приемом информации с помощью отдельного приемника, обеспечивающего прием сигналов в классах излучения, аналогичных классам излучения изделия, а также для передачи цифровой информации в режиме передачи данных.

Изделие может работать в режиме дистанционного управления (ДУ) с автоматизированного рабочего места комплекса или в режиме местного управления (МУ) с лицевой панели блока управления (БУ).

## 2.2 Характеристики передающего модуля 20 кВт

Изделие обеспечивает работу в диапазоне частот от 3,00000 до 29,99999 МГц с шагом перестройки частоты 10 Гц.

Относительное отклонение рабочей частоты – не более  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$  в рабочем диапазоне частот в нормальных условиях после 3-х минут прогрева опорного генератора.

Номинальная мощность в режиме излучения в телеграфных режимах работы и номинальная мощность в режиме излучения в телефонных режимах работы на активную нагрузку ( $75 \pm 5$ ) Ом составляет 20 кВт ( $\pm 1$  дБ), в диапазоне от 20,00000 до 29,99999 МГц допускается снижение мощности до 18 кВт ( $\pm 1$  дБ).

В изделии реализована возможность установки выходной мощности на уровне 50 % и 25 % от номинального значения при точности установки  $\pm 2$  дБ.

При работе на антенный фидер с коэффициентом бегущей волны (КБВ) не ниже 0,25 выходная мощность изменяется по отношению к номинальному значению не более чем на  $\pm 1$  дБ.

В случае возникновения рассогласования нагрузки, в том числе в результате обрыва или короткого замыкания в антенном тракте, обеспечивается плавное снижение выходной мощности до значения, гарантирующего безаварийную работу изделия без его выключения. Выходная мощность при этом не нормируется.

Изделие обеспечивает формирование режимов излучения *НЗЕ, РЗЕ, ЖЗЕ, АЗЕ, А1А, F1В, G1В, J7В, J2D*.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе однополосного тракта не превышает 3 дБ относительно максимального уровня.

Вход телефонного канала – симметричный с сопротивлением ( $600 \pm 30$ ) Ом.

Номинальное значение напряжения сигнала частотой 1000 Гц на входе телефонного канала, обеспечивающее номинальное значение выходной мощности, составляет 0,775 В (0 дБ).

Номинальный уровень входного телеграфного сигнала составляет от 14 до 25 В – «посылка» и от минус 14 до минус 25 В – «пауза».

Уровень нелинейных комбинационных искажений в классе излучения ЖЗЕ составляет не более минус 30 дБ при измерении двухтоновым равноамплитудным испытательным сигналом и работе на согласованную нагрузку с номинальной мощностью.

Ослабление гармоник рабочей частоты (выше третьей) составляет не менее 60 дБ; ослабление второй и третьей гармоник – не менее 50 дБ.

Уровень дискретных побочных составляющих в выходном сигнале – не более значений, указанных в табл. 2.

Табл. 2. Уровень дискретных побочных составляющих в выходном сигнале

Отстройка относительно рабочей частоты	Норма относительно номинального уровня сигнала, дБ, не более
От 6 кГц до $\pm 25$ кГц	Минус 70
От $\pm 25$ кГц до $\pm 0,03f_n$	Минус 75
от $\pm 0,03f_n$ до $\pm 0,1f_n$	Минус 90
От $\pm 0,1f_n$ до плюс $1f_n$ и до минус $0,5f_n$	Минус 110
Примечание: $f_n$ – несущая частота	

Уровень излучения на рабочей частоте при запирации изделия – не более минус 150 дБ.

Относительный уровень шума в выходном сигнале изделия в диапазоне частот от 1,5 до 6,0 МГц при отстройке от частоты основного излучения на  $\pm 500$  кГц не превышает

минус 165 дБ/Гц и в диапазоне от 6,00000 до 29,99999 МГц при отстройке на  $\pm 10\%$  не превышает минус 165 дБ/Гц.

Уровень фоновых составляющих (отношение фон/сигнал), измеренный в полосе частот отстройки от 50 до 300 Гц относительно несущей, не превышает минус 50 дБ.

Охлаждение изделия принудительное воздушное.

Электропитание изделия осуществляется от трехфазной сети переменного тока частотой  $(50,0 \pm 5,0)$  Гц и напряжением  $380 \frac{+10\%}{-15\%}$  В).

Изделие имеет местное управление с лицевой панели БУ со следующими функциями:

- переключение режима управления (ДУ/МУ);
- включение/отключение изделия;
- включение/выключение излучения;
- контроль исправности изделия;
- контроль проходящей мощности и КБВ;
- настройка параметров;
- установка рабочей частоты;
- установка градаций мощности;
- установка класса излучения;
- установка сдвига частоты и скорости телеграфирования;
- установка состояния антенно-согласующего устройства (АнСУ) (включение в тракт/выключение);
- перестройка на фиксированный канал;
- вызов *SELCAL* (если эта функция активирована на заводе изготовителе).

Время автоматической настройки на любую частоту и антенну (настройка канала) не превышает 150 мс.

Время перестройки изделия на заранее подготовленный канал, включая время перестройки АнСУ, не превышает 100 мс (пауза в излучении высокочастотного (ВЧ) сигнала). Количество заранее программируемых каналов – не менее 1000.

Дистанционное управление изделием осуществляется по одному из возможных интерфейсов: *RS-232*, интерфейс радиально-последовательный (ИРПС), *Ethernet* по протоколу информационно-технического сопряжения изделия с аппаратурой дистанционного управления.

### 2.3 Устройство и работа передающего модуля 20 кВт

Модуль состоит из 4-х транзисторных РПДУ с АнСУ, стойки сложения мощности и стойки управления и питания, в которой располагается главный блок управления (БУ), задающий режимы работы как стойки сложения, так и каждого передатчика 5 кВт.

В зависимости от режима работы ВЧ сигнал может формироваться в блоке управления для дальнейшего усиления в каждом из РПДУ 5 кВт, либо при автономной работе ВЧ сигналы формируются непосредственно возбудителями из состава РПДУ 5 кВт. Усиленные в каждом из РПДУ 5 кВт сигналы поступают на 4 входа стойки сложения и с помощью ВЧ коммутатора направляются либо в устройство сложения и после устройства сложения мощный ВЧ сигнал направляется в АнСУ 20 кВт, либо на соответствующие выходы стойки. Возможны режимы с выходной мощностью 20 кВт на одном из выходов стойки, либо два ВЧ сигнала с мощностью по 10 кВт на двух выходах стойки, либо один сигнал 10 кВт и два сигнала по 5 кВт, либо 4 сигнала мощностью по 5 кВт каждый.

Комплексное управление РПДУ 5 кВт, устройством сложения мощности, АнСУ 20 кВт, выходным коммутатором в стойке сложения, контакторами силового питания стоек, системой охлаждения (СО) с рециркуляцией (при наличии в составе) осуществляет БУ. Информационные сигналы, сигналы ДУ и контроля поступают в БУ, где

обрабатываются и коммутируются по заданным алгоритмам для формирования в соответствии с режимами работы.

### 3 Преимущества передатчика нового поколения

К преимуществам передатчика нового поколения можно отнести: высокую надежность, безопасность работы, уменьшение энергопотребления, уменьшение стоимости оборудования, высокую ремонтпригодность за счет использования транзисторных РПДУ, имеющих в составе АнСУ.

Структура построения РПДУ 20 кВт с использованием 4-х РПДУ 5 кВт с АнСУ с воздушным охлаждением обеспечивает:

- номинальную выходную мощность ВЧ при КБВ антенн равно 0,3 или более;
- возможность одновременной работы на четыре выхода;
- возможность автономной работы каждого из 4-х передатчиков с выходной мощностью 5 кВт при КБВ антенн не хуже 0,3 при возникновении нештатной ситуации;
- упрощение ремонтных и регламентных работ;
- возможность использовать типовой вариант установки в кунге на автомобильном базовом шасси;
- возможность применять передатчик без дополнительной системы рециркуляции в помещениях, имеющих свою систему охлаждения, обеспечивающую необходимый объем охлаждающего воздуха.

Применение в составе передатчика расчетных АнСУ нового поколения обеспечивает:

- время переключения частоты не более 150 мс;
- полную скрытность настройки при использовании алгоритма настройки по соседним частотам;
- согласование антенны с РПДУ в диапазоне частот 1 МГц до уровня КБВ не хуже 0,65 при использовании алгоритма настройки в диапазоне, что обеспечивает работу в режимах ППРЧ без дополнительных переключений АнСУ при изменении частоты в указанном диапазоне;
- быстрое (на уровне 1 мин.) определение настроек АнСУ для заданной таблицы частот для работы по заранее запрограммированным частотам.

### Заключение

Разработанная АО «РИМР» структура построения твердотельного передающего модуля 20 кВт с воздушным охлаждением позволяет конфигурировать состав изделия в соответствии с конкретными задачами, поставленными при разработке радиопередающего комплекса, обеспечивая максимальную унификацию применяемых устройств и возможность использования в качестве усилительных модулей устройства с различным типом согласования с антенной.

Применение АнСУ в каждом из модулей 5 кВт и на выходе устройства сложения 20 кВт обеспечивает выходную мощность в каждом из формируемых модулем каналов на уровне номинальной при КБВ подключенных антенн, начиная с 0,3.

Примененное в модуле воздушное охлаждение позволяет использовать модуль на объектах заказчика с различной организацией СО, в том числе с размещением на автомобильном шасси.

### Литература

1. Лузан Ю.С., Петров Е.Н., Щеков П.В., Юрков А.С. Особенности работы КВ радиопередатчиков на несогласованную нагрузку // Техника радиосвязи. 2003. Вып 8. С. 70-83.
2. Головин О.В. Декаметровая радиосвязь. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.

### References

1. Luzan Yu.S., Petrov E.N., Schekov P.V., Yurkov A.S. Osobennosti raboty KV radioperedatchikov na nesoglasovannuyu nagruzku [Operational aspects of HF radio transmitters with unbalanced load]. Tehnika radiosvâzi 2003 Issue 8. Pp. 70-83.
2. Golovin OV Dekametrovaja radiosvjaz' [Decameter radio communication]. Moscow.: Radio i svjaz', 1990. 240 p. (in Russian)

Статья поступила 11 августа 2021 г.

### Информация об авторах

Калинин Андрей Леонардович – Начальник научно-технической лаборатории Акционерного общества «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: мощные устройства сложения мощностей КВ диапазона. Тел.: 8(812)328-46-35, доб. 402. E-mail: andei021966@yandex.ru.

Адрес: 199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 11-я линия В.О., д. 66.

### A new generation of high-power short-wave radio transmitting devices

Kalinin A.L.

**Annotation.** *The article discusses the ways of development and design of a new generation of HF transistor transmitters for 20 kW and above. The article provides a detailed description of design options of radio-frequency transmission line for radio transmitting device, the article underlines features that must be taken into account in device operation, in particular whether or not the antenna tuning units are present in the device, their effect on device output parameters; the article sets out design principles for power amplifier units. It contains information on HF transistor transmitters developed and serially produced by JSC "RIMR"; The article provides comparison of 5 kW radio transmitting devices for a number of figures. Particular attention has been paid to the newly developed 20 kW transmitting unit, which characteristics, design and operation principles have been examined in the article. The advantages of this transmitter are shown in comparison with an analogue devices produced by another manufacturer.*

**Keywords:** *shortwave radio transmitting device, antenna matching device, travelling wave coefficient, high-frequency path.*

### Information about Authors

Andrey Leonardovich Kalinin – Head of Research and Technology Laboratory «Russian Institute for Power Radioengineering», JSC. Research interests: Power HF combining electronic devices. Tel.: 8(812) 328-46-35, ext. 402. E-mail: andei021966@yandex.ru.

Postal address: 66, 11 Liniya V.I., St. Petersburg, Russia, 199178.

**Для цитирования:** Калинин А.Л. Новое поколение коротковолновых радиопередающих устройств большой мощности // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 10-17.

**For citation:** Kalinin A.L. A new generation of high-power short-wave radio transmitting devices. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 10-17 (in Russian).

УДК 621.396

## Многопараметрическая адаптация в коротковолновых системах передачи данных сигналами OFDM

Егоров В.В., Мингалев А.Н., Щеглова Е.Ф.

**Аннотация.** Рассматриваются задачи адаптивного выбора параметров коротковолновой системы передачи данных, таких, как вид информационных сигналов, вид и параметры помехоустойчивых кодов, рабочая частота, при пошаговом управлении процессом передачи при динамически изменяющихся условиях распространения радиоволн и помеховой обстановки. Сформированы в явном виде целевые функции для достижения максимальной информационной скорости передачи данных и максимума вероятности безошибочной доставки сообщения за время не больше заданного. Отличительной особенностью сформированных целевых функций является тот факт, что они не зависят от субъективно назначаемых пороговых значений. Конструктивность разработанных алгоритмов обеспечивается тем, что все необходимые для адаптации исходные данные формируются с заданной точностью в процессе информационного обмена путем анализа рабочих сигналов и вторичных продуктов декодирования.

**Ключевые слова:** нестационарный радиоканал, передача данных, оценивание параметров канала связи, адаптивное управление параметрами системы.

### Введение

Системы коротковолновой (КВ) радиосвязи функционируют в условиях воздействия разнообразных помех, что усложняет задачу достоверной и своевременной доставки сообщений. Сигнал на входе приемника представляет собой сумму сигналов, пришедших по различным путям распространения, что приводит к межсимвольной интерференции и проявлению частотно-селективных свойств канала [1, 2]. Это не позволяет передавать с высокой скоростью и достоверностью большие объемы данных при использовании традиционных методов передачи сообщений. Одним из способов повышения эффективности систем передачи данных, работающих в КВ диапазоне, является использование методов многопараметрической адаптации [3], включающих в себя непрерывный анализ состояния канала связи и целенаправленное изменение параметров системы связи в реальном масштабе времени в соответствии с текущей сигнально-помеховой обстановкой.

### Анализ состояния КВ радиоканала

При функционировании адаптивных систем КВ радиосвязи возникает задача контроля состояния радиоканала, в процессе которого оцениваются характеристики канала связи, используемые устройством адаптации для выбора оптимальных параметров системы. Актуальной является задача разработки методов оценки статистических параметров КВ радиоканала на основе анализа информационных сигналов и продуктов декодирования без использования тестовых последовательностей.

Знание статистических характеристик канала связи позволяет установить функциональную связь между вероятностью ошибки на бит для любых сигналов и способов их обработки с параметрами закона распределения отношения сигнал/помеха на входе приемника [3]. Известный закон распределения отношения сигнал/помеха позволяет определять вероятность ошибки на бит не только для используемого вида сигнала, но и для всех возможных сигналов. Поэтому актуальной является задача определения вида закона распределения отношения сигнал/помеха (ОСП) и оценка его параметров путем анализа информационных сигналов. Сложность задачи усугубляется тем, что в каналах с переменными параметрами сигнал, поступающий на вход

демодулятора, подвергается обработке автоматической регулировкой усиления (АРУ) приемника. Это не позволяет в явном виде использовать его в качестве элемента выборки для оценки вида закона распределения и его параметров, отсчетов огибающей или мощности элементарного сигнала.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что замирания огибающей сигнала в КВ радиоканале хорошо описываются распределениями Накагами и Райса [4]. Эти законы характеризуются только двумя параметрами, что позволяет создать конструктивные методы их оперативной оценки. Возможность практического использования существующих методов ограничена из-за допущений о том, что коэффициент усиления АРУ приемника на интервале анализа не изменяется, а также о том, что выборка формируется из отсчетов огибающей сигнала, в то время как на практике удается получить только отсчеты огибающей смеси сигнал + помеха. Кроме того, в проведенных исследованиях оцениваются обычно только характеристики огибающей одночастотного сигнала, в то время как для оценки и прогнозирования помехоустойчивости передачи данных *OFDM* (*Orthogonal frequency-division multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) сигналами [5, 6] необходимо формировать статистические характеристики ОСП по сложным многочастотным сигналам. Поэтому возникает задача разработки методов оценки параметров законов распределения отношения сигнал/помеха по рабочим *OFDM* сигналам с учетом неизвестного коэффициента усиления АРУ приемника.

Одним из наиболее широко используемых статистических законов, описывающих замирания огибающей сигнала на входе радиоприемного устройства, является распределение Накагами [4]:

$$W(u; m, u_0^2) = \frac{2m^m u^{2m-1}}{\Gamma(m) u_0^{2m}} \exp\left(-\frac{mu^2}{u_0^2}\right),$$

где  $u \geq 0$  – значение огибающей,  $u_0^2, m \geq 0,5$  – параметры распределения,  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция.

Чтобы воспользоваться известными зависимостями для оценки прогнозируемой вероятности ошибки на бит, необходимо оценить параметры плотности распределения ОСП. Следует отметить, что практически все известные работы, посвященные оцениванию параметров закона Накагами, фактически рассматривают задачу оценки параметров распределения огибающей смеси сигнал + шум, а не распределение огибающей сигнала, поэтому задача продолжает оставаться актуальной.

При использовании *OFDM* сигналов в каналах с замираниями следует учитывать, что на приемной стороне сигнал перед обработкой проходит через устройство автоматической регулировки усиления (АРУ). Поскольку коэффициент усиления АРУ неизвестен и динамически меняется в процессе измерений, статистические характеристики выборочной плотности распределения амплитуды сигнала значительно меняются, и восстановить истинную плотность распределения огибающей оказывается невозможным. Избавиться от указанной проблемы при приеме многочастотного сигнала с использованием АРУ можно, используя выборку случайных величин, инвариантную к значению коэффициента усиления АРУ. Исходная выборка, используемая для оценки параметров закона распределения, формируется путем вычисления случайных величин, получаемых как отношение значений огибающих смеси сигнал + шум  $A_i$  и  $A_j$ , измеренных на длительности одной и той же элементарной посылки на различных субчастотах  $i$  и  $j$  [7]:

$$\xi = \frac{A_i}{A_j}.$$

Для получения конструктивных результатов следует использовать такую структуру OFDM сигнала, когда выделенная для связи частотная полоса разбита на две группы субчастот. При этом информация передается только на одной группе субчастот. Тогда на вход приемника одновременно поступают сигналы частотных субканалов, одни из которых представляют собой смесь полезного сигнала с шумом, а другие только шум. При этом, если шум является гауссовским, то плотность распределения его огибающей на длительности одного элементарного сигнала подчиняется закону распределения Релея.

Тогда в качестве  $A_i$  можно использовать измеренное значение огибающей шума, а в качестве  $A_j$  – значение огибающей смеси сигнал + шум.

В случае постоянного уровня полезного сигнала  $A$  на соответствующих субчастотах для модели гауссовского шума функцию распределения случайной величины  $\xi$  можно представить следующим образом:

$$F_{\xi}(x, A, \sigma^2) = 1 - \frac{1}{1-x^2} \exp\left(-\frac{A^2 x^2}{2\sigma^2(1+x^2)}\right).$$

Если уровень полезного сигнала  $A$  не постоянен, а подвержен замираниям, и его плотность распределения  $W_A(x)$  подчиняется закону Накагами, то в этом случае функция распределения случайной величины  $\xi$  задается выражением:

$$F_{\xi}(x; m, h_0^2) = 1 - \frac{1}{x^2 + 1} \left(1 + \frac{x^2 A_0^2}{2\sigma^2(1+x^2)m}\right)^{-m}.$$

При этом величина  $\frac{A_0^2}{\sigma^2} = h_0^2$  представляет собой среднее значение отношения сигнал/помеха.

Плотность распределения  $W_{\xi}(x; m, h_0^2)$  определяется выражением:

$$W_{\xi}(x; m, h_0^2) = \frac{2x}{(x^2 + 1)^2} \left(1 + \frac{h_0^2}{2(1+x^2)m}\right)^{-m} \left(1 + \frac{x^2 m h_0^2}{2m(x^2 + 1) + h_0^2}\right).$$

Удается получить в замкнутом виде выражения для плотностей распределения, введенных выше измеряемых случайных величин  $\xi$ . Сформировав выборку случайных величин  $\xi_i$  объемом  $N$  и имея аналитическое выражение для ее плотности распределения, воспользуемся методом максимального правдоподобия [8, 9] для оценки неизвестных параметров распределения Накагами, таких, как среднее значение отношения сигнал/помеха  $-h_0^2$  и глубина замираний  $-m$ . Для нахождения максимума можно воспользоваться численным методом движения по градиенту.

Другой широко используемой двухпараметрической статистической моделью распределения, описывающей замирания огибающей на входе радиоприемного устройства, является распределение Райса [4]:

$$W(u; A, u_0^2) = \frac{u}{u_0^2} \exp\left(-\frac{(u^2 + A^2)}{2u_0^2}\right) I_0\left(\frac{uA}{u_0^2}\right),$$

где  $u \geq 0$  – значение огибающей,  $A, u_0^2 > 0$  – параметры распределения,  $I_0(\cdot)$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Данная модель хорошо описывает гладкие замирания в КВ каналах связи, а также в каналах связи, где присутствует регулярная составляющая сигнала или же соблюдается условие, что фазы входящих лучей группируются около среднего значения. Также как и для рассмотренного выше распределения Накагами, для распределения Райса имеется

функциональная зависимость параметров распределения и соответствующей вероятности ошибки на бит.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных оцениванию параметров закона Райса, задача остается актуальной при построении адаптивных КВ радиолиний, поскольку задача оценивания параметров закона распределения ОСП для *OFDM* сигналов в литературе практически не освещена.

Оценка параметров закона Райса на основе той же выборочной совокупности производится по аналогии с оценкой параметров закона Накагами.

Использование известных выражений для связи вероятности ошибки на бит с параметрами радиоканала позволяет оценить характеристики достоверности для всех возможных видов сигналов.

### **Оценка вероятности ошибки на бит по результатам анализа продуктов декодирования кодовой комбинации**

Исследование возможности использования продуктов декодирования для оценки качества канала связи проводилось в достаточно большом количестве работ. Однако, полученные результаты в большинстве своем не выходят за рамки определения количества ошибок, полученных в процессе успешного синдромного декодирования, что приводит к завышенным показателям помехоустойчивости.

Перспективные кодовые конструкции, предлагаемые для использования в адаптивных системах КВ радиосвязи, представляют собой каскадные конструкции, состоящие, например, из внешнего кода Рида-Соломона и внутреннего блочного кода [10].

При использовании двоичного блочного кода  $(n, k, d)$  установлена явная аналитическая связь между появлением синдрома, соответствующего  $i$  обнаруженным ошибкам в кодовом слове, и вероятностью ошибки бит [11]:

$$P_i(p) = \sum_{m=0}^n \rho_m \sum_{r=0}^i (C_m^r C_{n-m}^{i-r} p^{m-2r+i} (1-p)^{n-m+2r-i}),$$

где  $\rho_m$  – спектральные коэффициенты кода,  $p$  – вероятность ошибки на бит.

При этом не важно, правильно ли произошло декодирование, т. е. количество ошибок может быть более исправляющей способности кода [12].

Наиболее существенным является тот факт, что искомую оценку можно получить, передавая только полезную закодированную информацию, т.е. без передачи теста. Стоит отметить, что для вероятности ошибок на бит в диапазоне  $[0,01; 0,1]$  точность получаемой оценки практически совпадает с максимально достижимой точностью, которая может быть получена, если все сообщение целиком представляет собой тест.

### **Выбор параметров сигналов, помехоустойчивых кодов и рабочей частоты**

Наиболее адекватным показателем эффективности КВ радиолиний передачи данных является время доставки сообщения заданного объема при допустимой вероятности необнаруженной ошибки на бит сообщения. Такой показатель однозначно связан с объемом сообщения. Поэтому более удобно при построении алгоритмов адаптивного управления использовать в качестве показателя эффективности среднюю информационную скорость передачи сообщений, однозначно связанную с временем доставки сообщения заданного объема. Требования по достоверности определяются возможностями алгоритмов сжатия сообщений и аппаратуры криптографической защиты файловых сообщений.

Алгоритм работы адаптивной многопараметрической КВ радиолинии заключается в выборе совокупности параметров, таких, как рабочая частота, вид и параметры кода, вид информационного сигнала. Как правило, количество значений каждого из этих параметров ограничено. Тогда каждая совокупность информационных параметров представляет собой

состояние системы, которой можно сопоставить целое число  $j$  – порядковый номер состояния.

Процесс функционирования адаптивной КВ радиолинии в полудуплексном режиме сводится к циклическому чередованию интервалов передачи канального блока  $T_{кб}$  и передачи квитанции по обратному каналу  $T_{ок}$ . С учетом переменной скорости передачи сообщений канальный блок содержит  $n_k$  кодовых блоков, которое может быть переменным. На интервале  $T_{ок}$  по обратному каналу передается квитанция на принятый канальный блок, содержащая информацию о номерах обнаруженных искаженных кодовых блоков, и управляющую информацию об изменении параметров адаптивной радиолинии передачи данных.

В работе предложен критерий выбора информационной скорости с учетом временных затрат на переспрос искаженных блоков как максимум информационной скорости, которая определяется выражением [13]:

$$V_{Иj} = V_{Tj} R_j \frac{T_{кб}}{T_{кб} + T_{ок}} (1 - P_j),$$

где  $P_j$  – вероятность неприема одного кодового блока,  $V_{Tj}, R_j$  – техническая и кодовая скорости в состоянии  $j$ .

Значение  $P_j$  является функцией вероятности ошибки на бит, тогда критерием вида нового рабочего состояния является выполнение условия:

$$\max_j V_{Tj} R_j \frac{T_{кб}}{T_{кб} + T_{ок}} (1 - P_j(p_{ош./битj})).$$

Фактически сформированный критерий можно трактовать как выбор состояния, в котором кодовый блок, содержащий несколько информационных квантов, передается с максимальной информационной скоростью. Следует отметить, что отличительной особенностью такого критерия является то, что он свободен от обычно субъективно назначаемого показателя допустимой вероятности ошибки на бит и полностью соответствует конечной цели управления адаптивной КВ радиолинией.

В качестве критерия эффективности систем связи также часто используется вероятность безошибочного доведения сообщения определенного объема за время не больше заданного. В нестационарных КВ радиоканалах использование режима с неизменными параметрами передачи не позволяет достигнуть высокого значения названного критерия. Вместе с тем, при использовании методов адаптации возникает возможность максимизации этого показателя за счет выбора оптимальных параметров сигналов и помехоустойчивых кодов – сигнально-кодовой конструкции (СКК) на каждом временном интервале (такте) в условиях динамически изменяющихся характеристик канала связи. Для обеспечения безошибочного доведения сообщения по КВ радиоканалу необходимо использовать помехоустойчивые коды с контролем достоверности и осуществлять переспрос неприятых или искаженных информационных блоков. Для организации возможности переспроса необходимо, чтобы кодовые блоки содержали одинаковое количество информационных бит, при этом количество проверочных бит помехоустойчивого кода может адаптивно изменяться. Также адаптивно может изменяться техническая скорость передачи за счет изменения позиционности модуляции и количества субчастот *OFDM* сигнала. Будем также считать, что временные интервалы, в течение которых осуществляется передача информации с выбранными параметрами СКК, имеют одинаковую длительность. В этом случае на длительности одного такта

может передаться несколько информационных блоков, количество которых зависит от технической скорости и кодовой избыточности.

Для построения алгоритма выбора оптимальной СКК на каждом шаге сделаем допущение, что сообщение разбивается на  $n$  одинаковых информационных блоков, каждый из которых на длительности одного такта передается с использованием одной из разрешенных СКК. Выделенное для передачи сообщения время разбивается на  $m$  одинаковых тактов. Непринятые или отбракованные информационные блоки передаются заново, в общем случае с другими параметрами СКК.

Тогда оптимальная стратегия передачи сообщения с целью достижения максимума вероятности безошибочного доведения сообщения не более чем за  $m$  тактов строится на методах пошагового управления по мере получения необходимой информации для выработки управляющего воздействия [14].

На первом шаге вычисляются вероятности доставки  $n$  информационных блоков не более чем за  $m$  тактов для всех возможных режимов, при условии, что характеристики достоверности приема для каждого из информационных сигналов остаются неизменными в течение всех  $m$  тактов передачи. При использовании СКК, характеризуемой текущим номером  $j$ , в течение одного такта можно передать  $n_j$  информационных блоков. Тогда условная вероятность безошибочной доставки всего сообщения в  $j$ -м режиме на первом шаге определяется выражением:

$$P_l(1) = \sum_{t=n}^{mn_j} C_{mn_j}^t Q_j^t (1 - Q_j(1))^{mn_j - t},$$

где  $Q_j$  – оценка вероятности безошибочного декодирования кодового блока на первом такте при использовании для передачи сообщения СКК с номером  $j$ . Выражение для  $Q_j$  определяется вероятностью ошибки на бит для используемого в  $j$ -м режиме сигнала и параметрами помехоустойчивого кода [15]. Тогда в качестве рабочего выбирается режим с номером, для которого выполняется условие:  $\max_j P_j$ .

После приема сегмента сообщения, содержащего  $n_j$  информационных блоков, производится подсчет количества безошибочно принятых на первом такте информационных блоков –  $s_1$ . Также на длительности первого такта определяется вектор уточненных текущих значений вероятностей ошибки на бит для всех возможных сигналов, используемый для выработки решения на втором такте.

На втором шаге на основе полученных в течение первого такта сведений о достоверности приема в канале связи и количестве принятых информационных блоков вычисляются условные вероятности безошибочной доставки сообщения не более чем за  $(m-1)$  тактов для всех возможных СКК в предположении, что на  $(m-1)$  такте характеристики радиоканала остаются неизменными, в соответствии с выражением:

$$P_l(2) = \sum_{t=n-s_1}^{(m-1)n_j} C_{(m-1)n_j}^t Q_j^t (1 - Q_j(2))^{(m-1)n_j - t},$$

где  $Q_j$  – оценка вероятности безошибочного декодирования кодового блока на втором такте при использовании для передачи сообщения СКК с номером  $j$ , при его расчете используется новое значение оценки вероятности ошибки на бит, сформированной на первом такте передачи. Тогда в качестве рабочего выбирается режим с номером, для которого выполняется условие:  $\max_j P_j$ .

По аналогии на  $k$ -м такте передачи при выработке решения о выборе оптимальной СКК используется вектор вероятностей ошибки на бит, сформированный на  $(k-1)$ -м такте, а также сведения о количестве безошибочно принятых информационных блоков за  $(k-1)$  такт передачи. Выражение для условных вероятностей безошибочного доведения сообщения в  $l$ -м режиме не более чем за  $(m-k+1)$  тактов имеет вид:

$$P_j(k) = \sum_{t=n-s_1-s_2-\dots-s_{k-1}}^{(m-k+1)n_j} C_{(m-k+1)n_j}^t Q_j^k(k) (1-Q_j(k))^{(m-k+1)n_j-t},$$

где  $Q_j(k)$  – вероятность безошибочного приема информационного блока на  $k$ -м такте при использовании СКК с номером  $j$ .

Номер оптимального режима для передачи на  $k$ -м такте определяется из условия:  $\max_j P_j(k)$ .

Приведенный алгоритм пошагового управления передачей сообщения на каждом шаге полностью описывается достоверностью передачи сообщения в каждом из режимов и общим количеством уже принятых кодовых блоков. Таким образом процесс оптимизации передачи сообщения сводится к задаче управления марковским случайным процессом [14].

Предложенный алгоритм является конструктивным, поскольку все необходимые исходные данные для его реализации известны к началу очередного временного такта. Вектор вероятностей ошибки на бит для всех возможных режимов может быть получен в процессе передачи сегмента сообщения путем анализа информационных сигналов и продуктов декодирования. Исключение составляет первый шаг. Для него необходимые выборочные данные для оценки вектора вероятностей ошибки на бит формируются путем обработки вызывного сигнала, поскольку его структура идентична информационному сигналу и его параметры заранее оговорены. Решение о рабочем режиме на каждом шаге вырабатывается на приемной стороне системы передачи данных, так как только она обладает всеми необходимыми для выработки управляющего воздействия исходными данными, и по каналу обратной связи доводится до передающей стороны методами, при которых ошибки при передаче команд управления не приводят к обрыву связи.

Рассмотренный метод предполагает на каждом шаге адаптацию по виду сигнально-кодовой конструкции. Вместе с тем, сущность метода принципиально не изменится, если на каждом такте в число изменяемых параметров включить рабочую частоту. В этом случае произойдет увеличение количества возможных сочетаний параметров передачи. Один из возможных подходов к оцениванию векторов вероятностей ошибки на бит для всех возможных видов информационных сигналов на всех рабочих частотах без обрыва процесса передачи информации приведен в [13].

Очевидно, что для практического использования такого критерия все необходимые исходные данные должны быть доступны для устройства принятия решения. Исходными данными для выбора нового состояния для передачи канального блока является вероятность ошибки на бит для информационных сигналов, используемых для передачи блока данных, полученная при демодуляции, декодировании и прогнозировании значений вероятностей ошибки на бит как для сигналов с позиционностью, используемой в текущий момент времени, так и для всех возможных позиционностей. Разработанные методы оценивания текущей вероятности ошибки на бит и методы прогнозирования вероятностей ошибки на бит для позиционностей сигналов, отличающихся от текущей, приведены выше.

#### Адаптивное управление видом модуляции

##### и мощностью отдельных поднесущих при передаче OFDM сигналов

Многолучевость приводит также к искажению передаточной функции канала связи, так что ОСП на отдельных субчастотах сильно различается, и, как следствие, достоверность

передачи информации в различных субканалах также резко отличается. Поэтому для повышения достоверности передачи сообщений при сохранении заданной технической скорости представляется целесообразным адаптивное управление мощностью и позиционностью модуляции в каждом из отдельных субканалов при сохранении средней мощности излучаемого передатчиком сигнала. Тогда задача адаптивного управления мощностью и видом сигналов сводится к максимизации пропускной способности канала связи с *OFDM* сигналами.

Пропускную способность канала связи с использованием сигналов *OFDM* можно представить в следующем виде [16]:

$$C' = \sum_{k=1}^N \Delta F \log_2 \left[ 1 - \frac{P_k C_k^2}{G_k \Delta F} \right],$$

где  $P_k$ ,  $C_k$ , и  $G_k$  – мощность сигнала, коэффициент передачи по амплитуде и спектральная плотность мощности шума для субканала с индексом  $k$  соответственно,  $\Delta F$  – ширина полосы отдельного частотного субканала.

Суммарная мощность сигналов во всех субканалах на передающей стороне равна заданной мощности радиопередающего устройства, что определяет следующее равенство:

$$\sum_{k=1}^N P_k = P_{\Sigma},$$

где  $P_{\Sigma}$  – мощность радиопередающего устройства.

Используя для решения задачи нахождения экстремума метод множителей Лагранжа, получим квазиоптимальное распределение мощности по субканалам [17]:

$$P_k = \frac{C_k^2 / G_k}{\sum_{k=1}^N C_k^2 / G_k} P_{\Sigma}.$$

Полученное выражение однозначно определяет перераспределение мощности радиопередающего устройства по субканалам *OFDM* сигнала с целью достижения максимальной пропускной способности.

Однако перераспределение мощности не указывает в явном виде способ достижения максимальной пропускной способности. Будем считать, что для обеспечения в многоканальной *OFDM* системе постоянной скорости передачи необходимо выполнение условия:

$$\sum_{k=1}^N x_k = n,$$

где  $n$  – общее количество бит, передаваемых во всех субканалах,  $x_k$  – количество бит, передаваемых в  $k$ -м субканале.

Тогда задача адаптивного перераспределения информационных потоков между субканалами может быть сведена к поиску минимума функции, представляющей собой математическое ожидание количества искаженных бит при передаче  $n$  бит с помощью *OFDM* сигнала за счет оптимального распределения передаваемых бит между субканалами:

$$\min_{x_k} \sum_{k=1}^N p_{\text{ош}}^{(k)}(x_k) \cdot x_k,$$

где  $p_{\text{ош}}^{(k)}(x_k)$  – вероятность ошибки на бит в  $k$ -м субканале при передаче  $x_k$  бит.

Вероятности ошибки на бит в каждом из субканалов для всех возможных позиционностей парциального сигнала определяются в процессе передачи данных описанными выше методами.

Решение задачи оптимизации методом перебора при сравнительно высоких значениях количества субчастот и передаваемых на них бит приводит к значительным вычислительным затратам. Поэтому предлагается искать экстремум приведенной функции методом динамического программирования. Алгоритм решения данной задачи приведен в работе [17], где показано, что адаптивное перераспределение количества передаваемых бит по субканалам может приводить к снижению вероятности ошибки на бит в среднем в 1,5-2 раза.

Передача по обратному каналу относительно большого объема информации о распределении количества бит по субканалам оправдана значительным повышением достоверности передачи сообщений.

### Вывод

Рассмотренные в настоящей работе методы оценивания параметров канала связи по информационным сигналам *OFDM* сигналам и кодовым конструкциям позволяют отказаться от использования тестовых сигналов. Такой подход позволяет полностью использовать частотно-временной и энергетический ресурсы радиоканала, что приводит к повышению информационной скорости и устойчивости функционирования системы передачи данных в каналах с замираниями.

### Литература

1. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
2. Головин О.В. Дециметровая радиосвязь. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
4. Муха В.С. Статистические методы обработки данных. – Минск: «Издательский центр БГУ», 2009. – 183 с.
5. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 352 с.
6. Rohling H. OFDM: concepts for future communication systems. Berlin : Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 266 p.
7. Егоров В.В., Зайченко К.В., Михайлов В.Ф., Смаль М.С. Оценка параметров нестационарного канала связи по информационным сигналам // Датчики и системы. 2015. № 2(189). С. 57-60.
8. Матальщкий М.А., Хацкевич Г.А. Теория вероятностей и математическая статистика. – Минск: «Высшая школа», 2017. – 591 с.
9. Харин Ю.С., Жук Е.Е. Математическая и прикладная статистика. – Минск: БГУ, 2005. – 279 с.
10. Justensen J, Høholdt T. A Course in Error-Correction Codes. India: Hindustan Book Agency, 2012. 194 p.
11. Егоров В.В., Смаль М.С. Оценка вероятности ошибки на бит по результатам декодирования кодовых слов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. — URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf>.
12. Tomlinson M. Error-Correction Coding and Decoding: Bounds, Codes, Decoders, Analysis and Applications (Signals and Communication Technology). Berlin: Springer, 2017. 542 p.
13. Егоров В.В. Адаптивное управление параметрами коротковолновых систем передачи данных // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 47-52.
14. Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Управляемые марковские процессы и их приложения. Москва: Наука, 1975. 341 с.
15. Анисимов В.В. Случайные процессы с дискретной компонентой. Киев: Вища шк., 1988. 184 с.
16. Stone J. Information Theory. London: Sebtel Press, 2015. 260 p.
17. Morse Ph. Methods of Operation Research. London: Andesite Press, 2017. 174 p.

### References

1. Komarov V.F., Sosunov V.N. Sluchajnye radiopomehi i nadezhnost' KV svjazi. [Accidental radio interference and reliability of HF communication]. Moscow. Svjaz' Publ., 1977. 136 p. (in Russian).
2. Golovin O.V. Dekametrovaja radiosvjaz'. [Decameter radio communication]. Moscow. Radio i svjaz', 1990. 240 p. (in Russian)
3. Feer K. Besprovodnaya tsifrovaya svjaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra. [Wireless digital communication. Modulation and spectrum spreading techniques]. Moscow. Radio i svjaz', 2000. 520 p. (in Russian)
4. Muha V.S. Statisticheskie metody obrabotki dannyh. [Statistical data processing methods]. Minsk, 2009. 183p. (in Russian)
5. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. Tehnologija OFDM. Uchebnoe posobie dlja vuzov. [Technology OFDM. Textbook for universities]. Moscow. Gorjachaja linija. Telekom, 2016. 352 p. (in Russian)
6. Rohling H. OFDM: concepts for future communication systems. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 266 p.
7. Egorov V.V., Zaichenko K.V., Mikhailov V.F., Smal M.S. Ocenka parametrov nestacionarnogo kanala svjazi po informacionnym signalam [Estimation of the time varying communication channel parameters based on data signals]. Datchiki i sistemy. № 2(189). Pp. 57-60 (in Russian)
8. Matalytsky M.A., Khatskevich G.A. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika. [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Minsk. Vyshejschaja shkola Publ., 2017. 591 p. (in Russian)
9. Kharin Yu.S., Zhuk E.E. Matematicheskaja i prikladnaja statistika [Mathematical and Applied Statistics]. Minsk. Belarusian State University Publ., 2005. 279 p. (in Russian)
10. Justensen J, Hoholdt T.A Course in Error-Correction Codes. India. Hindustan Book Agency, 2012. 194 p.
11. Egorov V.V., Smal M.S. Otsenka veroyatnosti oshibki na bit po rezul'tatam dekodirovaniya kodovykh slov [Estimation of the bit error probability based on the results of decoding of code words]. Zhurnal radioelektroniki: elektronnyy zhurnal. Journal of Radioelectronics: electronic journal. – Moscow, 2014. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf>. (in Russian)
12. Tomlinson M. Error-Correction Coding and Decoding: Bounds, Codes, Decoders, Analysis and Applications (Signals and Communication Technology). Berlin. Springer, 2017. 542 p.
13. Egorov V.V. Adaptivnoye upravleniye parametrami korotkovolnovykh sistem peredachi dannykh [Adaptive control of parameters of short-wave data transmission systems]. Izvestiya Vuzov Rossii. Radioelektronika [Radioelectronics]. 2017. No. 2. Pp. 47-52 (in Russian)
14. Dynkin E.B., Yushkevich A.A. Upravljaemye markovskie processy i ih prilozhenija [Controlled Markov processes and their applications]. Moscow. Nauka Publ., 1975. 341 p. (in Russian)
15. Anisimov V.V. Sluchajnye processy s diskretnoj komponentoj [Random processes with a discrete component]. Kiev. Vischa shk. Publ., 1988. 184 p. (in Russian)
16. Stone J. Information Theory. London. Sebtel Press, 2015. 260 p.
17. Morse Ph. Methods of Operation Research. London. Andesite Press, 2017. 174 p.

Статья поступила 13 августа 2021 г.

### Информация об авторах

Егоров Владимир Викторович – Д.т.н., с.н.с. Главный научный сотрудник АО «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: адаптивные системы передачи информации; цифровая обработка сигналов. Тел.: +78123284550. E-mail: egorovrimr@mail.ru.

Мингалев Андрей Николаевич – К.т.н. Заместитель технического директора АО «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: адаптивные системы передачи информации; цифровая обработка сигналов. Тел.: +78123284550. E-mail: ming@list.ru.

Щеглова Елена Федоровна – К.т.н., с.н.с. Ведущий научный сотрудник АО «Российский институт мощного радиостроения». Область научных интересов: адаптивные системы передачи информации; цифровая обработка сигналов. Тел.: +78123284550.

Адрес: 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 11-я линия В.О., д. 66.

### **Multivariable adaptation of HF data transmission systems with OFDM signals**

V.V. Egorov, A.N. Mingalev, E.F. Shcheglova

***Annotation.** The problems of adaptive parameter selection for the HF data transmission system, such as data signals types, noise-immune code types and parameters, operating frequency, are considered for step-by-step control of the transmission process under dynamically changing conditions of radio wave propagation and interference. Objective functions have been formulated in an explicit form to achieve the maximum data transmission rate and the maximum probability for error-free message delivery in a preset time. A distinctive feature of the formed target functions is the fact that they do not depend on subjectively assigned threshold values. The value of the developed algorithms is ensured by the fact that all the necessary initial data for adaptation are formed with a given accuracy in the process of data exchange via analyzing of operating signals and secondary decoding products.*

***Keywords:** Non-stationary radio channel, data transmission, communication channel parameters estimation, system parameters adaptive control.*

#### **Information about Authors**

Vladimir Viktorovich Egorov – Doctor of Engineering, Chief Researcher of the “Russian Institute for Power Radioengineering”, JSC. Research interests: adaptive data transmission systems; digital signal processing. Tel.: +78123284550. E-mail: egorovrimr@mail.ru

Andrey Nikolaevich Mingalev – Ph.D. of Engineering Sciences, Deputy Technical Director of the “Russian Institute for Power Radioengineering”, JSC. Research interests: adaptive data transmission systems; digital signal processing. Tel.: +78123284550. E-mail: ming@list.ru

Elena Fedorovna Shcheglova – Ph.D. of Engineering Sciences, senior researcher, Leading researcher of the “Russian Institute for Power Radioengineering JSC. Research interests: adaptive data transmission systems; digital signal processing. Tel.: +78123284550.

Address: 66, 11 Liniya V.I., St. Petersburg, Russia, 199178.

**Для цитирования:** Егоров В.В., Мингалев А.Н., Щеглова Е.Ф. Многопараметрическая адаптация в коротковолновых системах передачи данных сигналами OFDM // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 18-28.

**For citation:** Egorov V.V., Mingalev A.N., Shcheglova E.F. Multivariable adaptation of HF data transmission systems with OFDM signals. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 18-28 (in Russian).

УДК 004.722

## Методологические основы мягкой обработки рекуррентных последовательностей и их применение в корректирующих кодах

Баранов В.А., Иванцов О.В.

**Аннотация.** В статье рассмотрено одно из направлений повышения устойчивости системы передачи данных, в котором решаются задачи защиты от деструктивного воздействия помех. Приводятся методологические принципы построения корректирующих кодов и примеры реализации устройств кодирования, обеспечивающих повышение устойчивости системы передачи данных. Реализация сформулированных методологических принципов позволяет эффективно бороться как с независимыми, так и с группированными ошибками большой кратности в канале связи и определять оптимальность приемника обнаружения сегментов линейных рекуррентных последовательностей по критерию Неймана-Пирсона.

**Ключевые слова:** устойчивость системы передачи данных, система радиоэлектронной защиты, корректирующий код, цикловая синхронизация, пропускная способность канала.

### Введение

Проблема обеспечения устойчивости системы передачи данных в условиях деструктивного воздействия помех является сложной и многомерной. Специфика проблемы заключается в неоднозначности предсказания возможного деструктивного воздействия помех различного вида канал связи.

Одним из действенных способов защиты, обеспечивающим устойчивое функционирование системы передачи данных является создание эффективной системы радиоэлектронной защиты (СРЗ) канала.

Применение и выполнение СРЗ функции универсального корректирующего кода одинаково эффективного в борьбе с любыми видами ошибок большой плотности и использовании его в различных системах цикловой синхронизации и передачи данных повысит устойчивость в условиях деструктивного воздействия помех.

Наличие непрерывного контроля качества приема сигналов канала в процессе передачи позволит СРЗ в случае прекращения деструктивного воздействия помех и своевременно восстановить пропускную способность канала.

### Основная часть

Основой создания СРЗ является разработка корректирующего кода, который в условиях интенсивных помех должен обеспечить устойчивый прием  $P_{\text{пд}}$  (правильное декодирование) сигналов, а значит уменьшить вероятность ложного декодирования  $P_{\text{лд}}$ , вероятность пропуска сигнала  $P_{\text{пр}}$  (ошибка второго рода) и вероятность ложного декодирования шумового сигнала  $P_{\text{ло}}$  (ошибки первого рода).

Исходя из предъявляемых требований к корректирующему коду, можно составить полную группу несовместных событий при условии передачи сообщений по каналу с высокой плотностью помех

$$P_{\text{пд}} + P_{\text{пр}} + P_{\text{лд}} + P_{\text{ло}} = 1. \quad (1)$$

К псевдослучайным последовательностям (ПСП) можно отнести  $M$ -последовательности, составные последовательности, Голда и т. д.

Данные последовательности являются линейными рекуррентными последовательностями (ЛРП), так как на участках ЛРП  $k$ -го порядка длиной большей, чем  $2k + 1$  наблюдается свойство линейности. Несмотря на существующее свойство линейности у ПСП, оно не может служить препятствием для применения в системе передачи данных.

Разрушение линейности ПСП может быть реализовано различными методами, например, используя перемежитель (интерливер) или вводя предварительные искажения на передаче с помощью инвертора, управляемого генератором случайных чисел (ГСЧ).

Введение предварительных искажений на передаче может быть оправдано только в случае большой исправляющей способности, которой должен обладать создаваемый корректирующий код, т. е. его показатели должны асимптотически близко приближаться к пределам Шеннона для дискретных каналов с шумами.

Кроме того,  $M$ -последовательности  $k$ -го порядка с определенным успехом достаточно давно применяются в системах цикловой синхронизации.

Исходя из вышеперечисленных аргументов в качестве кодовых слов корректирующего кода выбраны участки (сегменты) ЛРП с изменяемой фазой.

Сравнительный анализ существующих и разработанных методов обработки ЛРП показал, что для эффективного решения комплекса задач: помехоустойчивого кодирования, циклового фазирования в условиях деструктивного воздействия помех обработка должна базироваться на комбинированном применении двойственного базиса  $GF(2^k)$  [1], алгоритмов выделения зачетного участка с возможностью децимации и следующих методологических основ:

а) *Универсальности фрагментов кодовых слов*, позволяющие использовать их символы как информационные или проверочные.

Формирование кодовых слов генераторами элементов поля  $GF(2^k)$  как сегментов заданной длины ЛРП максимального периода (МП), начальные фазы которых определяются информационными блоками, содержат сведения о его информационной части на любых его фрагментах, включая децимированные.

б) *Пропорциональности размера проверочной части* максимально допустимому количеству ошибок в канале.

Выбор размера избыточной части кодового слова, как дополнительного участка в сегменте ЛРП МП, определяется пропорционально коэффициенту децимации [1] и допустимому пакету ошибок в канале за счет совокупного использования минимального кодового расстояния [2] в соответствии с избыточностью выделяемого зачетного участка и свойств алгебраической структуры кодового слова в целом.

в) *Порогового декодирования* на основе выделения зачетных импульсов в «скользящем окне» [3], реализующего полный перебор возможных фрагментов в кодовом слове.

Пороговое декодирование производится на основе опознавания анализаторами ЛРП, создающих условия синхронного функционирования местных генераторов с принимаемыми символами кодового слова по определению цикла обработки и восстановления его информационной части на основе двойственного базиса  $GF(2^k)$  и алгоритмов выделения зачетного участка в условиях воздействия на канал группированных ошибок большой кратности.

г) *Параллельной обработки* децимированных фрагментов в кодовом слове.

Одновременное пороговое декодирование участков кодового слова как децимированных фрагментов неканонической  $M$ -последовательности с различными коэффициентами децимации в соответствии с ожидаемыми воздействиями на канал независимых одиночных, смежных, двойных тройных и т. д. ошибок высокой частоты, позволяющие восстанавливать информационную его часть.

д) *Автономной адаптации* пропускной способности канала к интенсивности помех, возникающих в канале.

Адаптация к интенсивности помех в канале за счет автономного изменения избыточной части кодового слова и цикла его обработки.

Разработанные методологические принципы отвечают требованиям наблюдаемости, простоты, соответствия, инвариантности, системности.

В этом случае критерием устойчивости корректирующего кода, построенного в соответствии с методологическими принципами, является значение  $P_{\text{пд}}$  (1).

Определяющим правилом в основе комбинированной обработки сегментов ЛРП по методу выделения зачетного участка является правильное обнаружение анализаторами сегмента ЛРП среди других сигналов в канале, выражающееся в правильной синхронизации местного генератора с принимаемыми символами кодового слова. Таким образом,  $P_{\text{пд}}$  тождественна вероятности правильной синхронизации приемника  $P_{\text{пс}}$  с принимаемым сегментом ЛРП по методу выделения зачетного участка. В этом случае выражение (1) примет вид [4]

$$P_{\text{пс}} + P_{\text{пр}} + P_{\text{лс}} + P_{\text{ло}} = 1. \tag{2}$$

Реализация методологических принципов позволяет эффективно бороться как с независимыми, так и с группированными ошибками большой кратности в канале связи и определять оптимальность приемника обнаружения сегментов ЛРП по критерию Неймана-Пирсона (3).

$$\begin{cases} P_{\text{пс}} = \max, (P_{\text{лс}} = \min); \\ P_{\text{пр}} = \text{const}, (P_{\text{ло}} = \text{const}). \end{cases} \tag{3}$$

Вероятность ложной синхронизации  $P_{\text{лс}}$  имеет минимальное значение за счет использования в приемнике двойственного базиса  $GF(2^k)$  на этапе безошибочного заполнения регистра анализатора ЛРП, алгоритм которого оценивает состояние регистра в целом на каждом такте приема символов сегмента.

Вероятность ложного обнаружения и синхронизации по сигналу помехи  $P_{\text{ло}}$  имеет минимальное нормированное значение, которое определяется выбором величины зачетного участка  $n_0 \geq 30 \div 40$ , т. е. для двоичного канала  $P_{\text{ло}} = 2^{-(30 \div 40)}$ .

Вероятность пропуска сегмента ЛРП  $P_{\text{пр}}$  приемником существенно снижена и нормирована за счет применения алгоритма выделения зачетных импульсов на зачетном участке и применения этого алгоритма на децимированных участках сегмента, допускающего наличие ошибок на местах четных или нечетных символов сегмента ЛРП.

Если же в канале преобладают группированные ошибки, то «скользящий» зачетный участок, в котором выделяются зачетные импульсы, обнаруживает при обработке сегмента, разреженное место от ошибок, не превышающее заданного порога ошибок  $d - 1$  [5].

Вероятность правильного декодирования сегментов определяется известным выражением выделения безошибочного зачетного участка на рекуррентной последовательности по формуле Козлова [1]:

$$P_{\text{пд}} = - \sum_{i=1}^{\frac{k+1}{n_0+1}} (-1)^i p^{i-1} \cdot q^{in_0} \left[ q - pn_0 + \frac{p(n+1)}{i} \right] C_{n-in_0}^{i-1}, \tag{4}$$

где  $[x]$  – наименьшее целое число, превосходящее  $x$ ;  $n_0 = k + m$  – длина «зачетного отрезка»;  $k$  – длина ЛРП;  $m$  – величина счетчика совпадений на  $m$  «0»;  $p$  – вероятность ошибки (при биномиальном распределении) в канале связи;  $q$  – противоположное событие по отношению к  $p$ ,  $q = 1 - p$ .

Тогда вероятность выделения зачетного участка с исправлением ошибок на  $m$ -ой его части вычисляется как сумма совместных событий и определяется выражением [5]:

$$P_{\text{пдл}} = 1 - \left[ - \sum_{i=1}^{\frac{N+1-d}{k+c+1}} (-1)^i p^{i-1} \cdot q^{i(k+c)} \left[ q - p(k+c) + \frac{p(n+1-d)}{i} \right] C_{n-i(k+c)}^{i-1} \cdot P_m(x \leq d-1) \right], \tag{5}$$

где  $n_0$  – длина зачетного отрезка;  $k$  – длина ЛРП;  $m$  – величина счетчика на  $m$  совпадений;  $c$  – величина счетчика на  $c$  совпадений;  $P_m(x \leq d_0 - 1)$  – вероятность выделения второй части зачетного отрезка величиной  $m \geq 2n$  с количеством исправленных искажений, не превышающим  $d - 1$ .

По формуле Бернулли вероятность выделения второй части зачетного отрезка величиной  $m \geq 2n$  с количеством исправленных искажений, не превышающим  $d - 1$  определяется выражением [3]:

$$P_m(x \leq d - 1) = \sum_{j=0}^{d-1} C_m^j p^j (1-p)^{m-j} . \quad (6)$$

Тогда, подставив выражение (6) в выражение (5) получим выражение определяющее вероятность правильного декодирования сегментов ЛРП методом выделения зачетного участка с исправлением ошибок равно [5]

$$P_{\text{пдн}} = 1 - \left[ - \sum_{i=1}^{\frac{n+1-d}{k+c+1}} (-1)^i p^{i-1} \cdot q^{i(k+c)} \left[ q - p(k+c) + \frac{p(n+1-d)}{i} \right] C_{n-i(k+c)}^{i-1} \cdot \sum_{j=0}^{d-1} C_m^j p^j (1-p)^{m-j} \right], \quad (7)$$

Механизм декодирования децимированных сегментов ничем не отличается от декодирования сегментов ЛРП и для вычисления вероятности декодирования децимированных сегментов  $P_{\text{пдци}}$  в выражение (7) добавляется индекс децимации  $\sigma$ , пропорционально уменьшающий величину разреженного сегмента, на котором происходит поиск зачетного участка

$$P_{\text{пдци}} = 1 - \left[ - \sum_{i=1}^{\frac{n+1-d}{(k+c+1)2^\sigma}} (-1)^i p^{i-1} \cdot q^{i(k+c)} \left[ q - p(k+c) + \frac{p\left(\frac{n}{2^\sigma} + 1 - d\right)}{i} \right] C_{\frac{n}{2^\sigma} - i(k+c)}^{i-1} \cdot \sum_{j=0}^{d-1} C_m^j p^j (1-p)^{m-j} \right]. \quad (8)$$

Параллельная обработка сегментов на приеме  $2^\sigma + 1$  анализаторами позволяют повысить устойчивость этого процесса с вероятностью правильного декодирования сегмента  $P_{\text{пд}}$  при различных видах ошибок определяемая следующим выражением

$$P_{\text{пд}} = 1 - (1 - P_{\text{пдци}}) \cdot (1 - P_{\text{пдци}})^{2^\sigma} . \quad (9)$$

Границей допустимого количества ошибок  $t_{\text{ош}}$  на сегменте  $n$  М-последовательности  $k$ -го порядка независимо от значения индекса децимации  $\sigma$ , при которых обеспечивается правильное декодирование, определяется следующей формулой

$$t_{\text{ош}} \leq n - (n_0 - (d - 1)). \quad (10)$$

Тогда, коэффициент ошибок на приеме из канала связи не должен превышать следующего значения

$$k_{\text{ош}} \leq 1 - \frac{n_0 - (d - 1)}{n} . \quad (11)$$

Таким образом, количество ошибок, обнаруживаемых и исправляемых с учетом исключенных при децимации независимо от индекса децимации не меняется. Индекс децимации, применяемый в декодере, определяет только лишь кратность независимых ошибок, которые могут быть обнаружены и исправлены с частотой следования 0,5. Так, например, если декодер содержит один анализатор, то индекс децимации  $\sigma = 0$ . В этом случае декодер эффективно обнаруживает группированные ошибки, величина пакета ошибок в которых не превышает  $n - (n_0 - (d - 1))$ , и независимые одиночные ошибки, интервал следования которых не выше  $n_0 - (d - 1)$ .

Если индекс децимации  $\sigma = 1$  (пример на рис.1), то частота следования независимых одиночных, смежных ошибок не должен быть выше 0,5.

При индексе децимации  $\sigma = 2$  интервал следования одиночных, смежных, двойных и тройных ошибок не должен превышать 0,5 и т. д.

На рис. 1 в качестве примера приведена логическая схема устройства цикловой синхронизации приема, в состав которой входят три анализатора  $M$ -последовательности  $k$ -го порядка. Первый анализатор выделяет зачетный участок с обнаружением и исправлением ошибок и тем самым обеспечивает защиту принимаемой синхропосылки от группированных ошибок. Анализаторы № 2 и № 3 выделяют зачетные участки с обнаружением и исправлением ошибок на  $M$ -последовательности с индексом децимации  $\sigma = 1$ . Один из анализаторов принимает все четные символы синхропосылки, другой – все нечетные.

К недостаткам разработанного корректирующего кода на основе методологических принципов следует отнести увеличение сложности схемы приема при повышении индекса децимации за счет включения в параллельную работу  $2^\sigma + 1$  анализаторов ЛРП. Повышение индекса децимации ведет к увеличению длины сегмента  $n$ , а это возможно в случае применения  $M$ -последовательности большего порядка.

Полученные результаты не противоречат теореме Шеннона о границе пропускной способности дискретных каналов с шумами и утверждению, что существуют корректирующие коды, показатели которых асимптотически близко приближаются к границе Шеннона для дискретных каналов с шумами при кодировании достаточно длинных последовательностей сообщений. Рассмотрим пример.

**Пример.** Необходимо рассчитать границу помехоустойчивости устройства приема цикловой синхронизации, использующей в качестве синхропосылки  $M$ -последовательность 7-порядка с характеристическим многочленом  $P(x) = x^7 + x^6 + 1$  и комбинированный метод обработки рекуррентной последовательности на основе выделения зачетного участка, если длина зачетного участка  $n_0 = 47$ , а индекс децимации  $\sigma = 1$ .

**Решение.** Границей помехоустойчивости можно считать допустимый коэффициент ошибки на приеме из канала связи, который может быть получен с помощью выражения (11).

Для зачетного участка  $n_0 = 47$  минимальное кодовое расстояние  $d = 17$ , которое может быть получено аналитически [2] и эмпирическим путем.

Величина сегмента  $n = 2^k - 1 = 127$ . Подставим полученные значения в выражение (11) и проведем вычисление  $k_{\text{ош}} \leq 0,35$ .

Таким образом, применение децимации с индексом  $\sigma = 1$  в обработке синхропосылки позволяет бороться с группированными ошибками, независимыми одиночными и смежными ошибками при  $k_{\text{ош}} \leq 0,35$ . Структурная схема устройства приема синхропосылки приведена на рис. 1.

Для реализации методологического принципа автономной адаптации пропускной способности канала шифрованной документальной связи к интенсивности помех, возникающих в канале, предлагается вариант структурной схемы СРЗ для использования в системах передачи с фиксированной фазовой точкой представлен на рис. 2.

Принцип работы предлагаемого устройства заключается в автоматическом включении его в работу в случае возникновения ошибок на приеме превышающий порог ошибок  $t_{\text{ош}} \geq 1 \cdot 10^{-2}$  (или ручном режиме) с отражением состояния закрытого канала связи по световой индикации. Сигналы управления «Нет канала», «Нет приема» от контрольно-решающего устройства (КРУ) средства линейного шифрования данных по цепям управления включают в работу дополнительное устройство защиты от помех.

Данное устройство предполагается использовать до тех пор, пока количество ошибок в канале связи не снизится до  $t_{\text{ош}} < 1 \cdot 10^{-2}$ . В случае снижения ошибок до установленного порога за определенный период времени счетчик 1 выключает устройство и переводит его в дежурный режим работы. Счетчик 2 входит в состав системы обнаружения и восстановления синхронизации устройства защиты от помех и настроен заданное количество подряд циклов работы декодера, обнаруживающего ошибки, количество которых  $t_{\text{ош}} > d_0$ .

Если после нескольких подряд идущих попыток перезапуска восстановления синхронизации не произойдет, то счетчик 3 отключит устройство и вернет систему передачи шифрованной информации в исходное состояние.

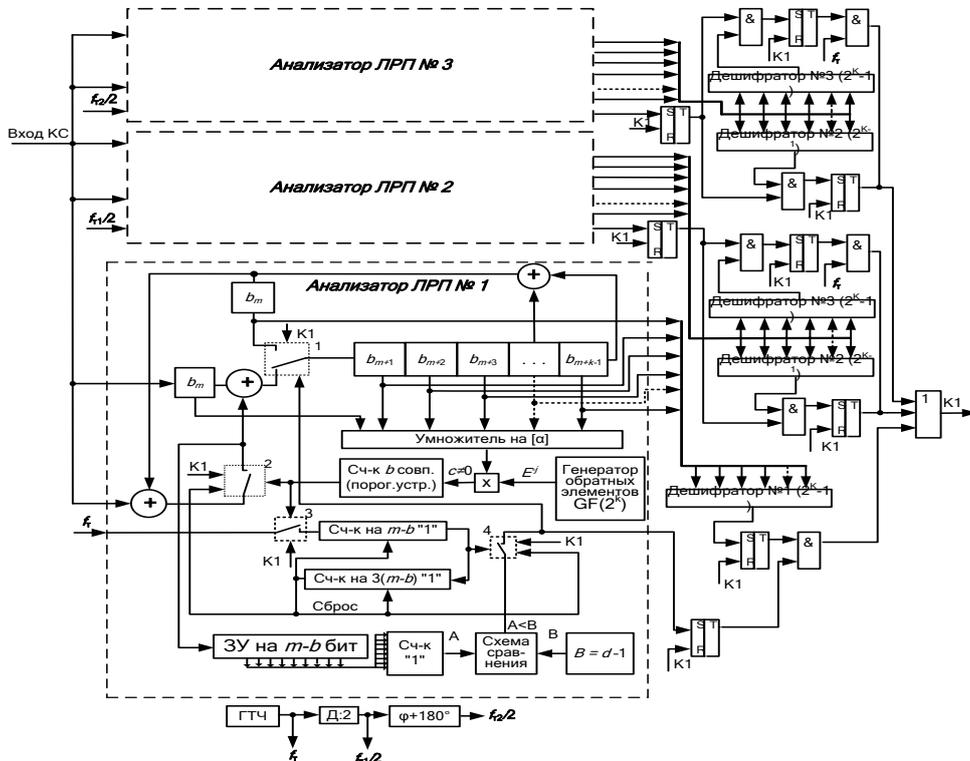


Рис. 1. Схема устройства цикловой синхронизации приема с индексом децимации  $\sigma = 1$

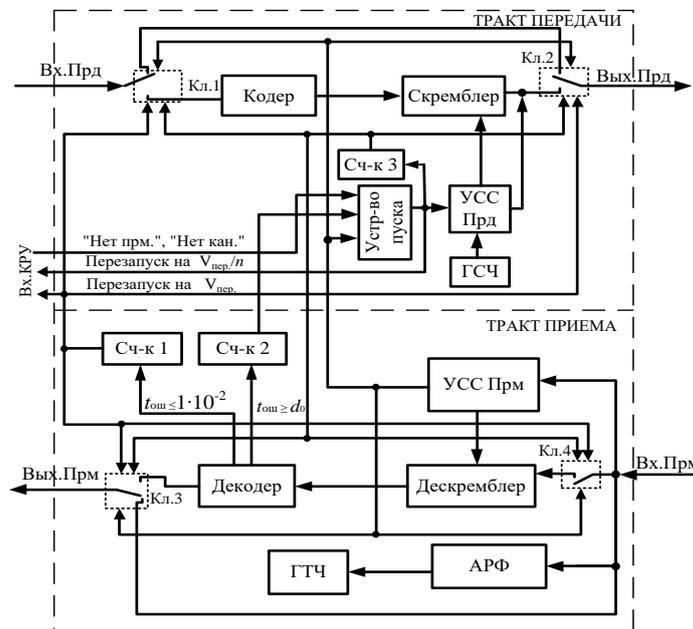


Рис. 2. Устройство CP3 для систем передачи с фиксированной фазовой точкой

С помощью скремблера обеспечивается маскировка включения в тракт передачи шифрованной информации устройства защиты от помех. Устройства системы синхронизации передачи и приема обеспечивают согласованную работу скремблера и дескремблера, соответственно.

Включение устройства защиты от помех в тракт передачи ведет к внесению дополнительной избыточности в передаваемую информацию, поэтому для обеспечения маскировки включения в тракт передачи дополнительного устройства по цепям управления (или вручную) скорость передачи информации снижается в несколько раз в зависимости внесенной избыточности. В случае выключения устройства информационная скорость передачи восстанавливается.

Устройство СРЗ для систем передачи с фиксированной фазовой точкой не только выполняет свою основную функцию защиты от воздействия средств радиоэлектронного противодействия (РЭП), но и обеспечивает маскировку включения и выключения в тракт передачи и приема шифрованной информации за счет сохранения нелинейности на его выходе и постоянной скорости передачи в линию.

Второй вариант структурной схемы устройства СРЗ для систем передачи с «незакрепленной» фазовой точкой представлен на рис. 3.

Отличительной особенностью работы второго устройства от первого заключается в использовании на приеме самосинхронизирующего декодера, алгоритм работы которого описан выше и инвертирующего устройства на передаче, разрушающего рекуррентность на выходе кодера, что существенно упрощает схему.

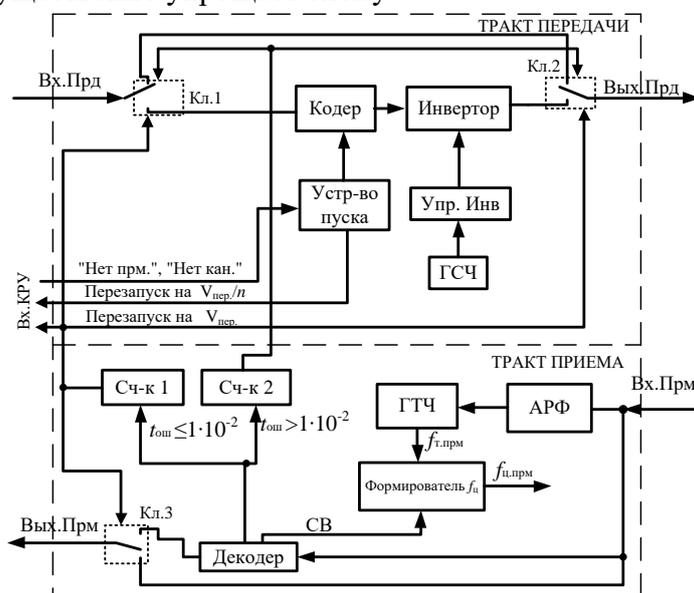


Рис. 3. Устройство СРЗ для систем передачи с «незакрепленной» фазовой точкой

### Заключение

Таким образом, предложенные варианты устройств СРЗ, построенные на основе методологических принципов обеспечивают эффективную защиту от деструктивного воздействия помех и возможность маскировки системы передачи данных, сохраняя, при этом параметры выходного сигнала: псевдослучайность, скорость передачи, вид модуляции и т.д.

### Литература

1. Когновицкий О.С. Теория, методы и алгоритмы решения задач в телекоммуникациях на основе двойственного базиса и рекуррентных последовательностей. Монография. СПбГУТ. 2011. – 427 с.
2. Сайтов И.А., Иванцов О.В. Границы минимального кодового расстояния для некоторой блоковой длины сегмента двоичного кода линейной рекуррентной последовательности // Труды Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. 2014. Вып. 4(35). –С.15-32.
3. Патент РФ № 2553089 (RU 2553089 С1) Устройство синхронизации рекуррентной последовательностью с функцией выделения зачетных импульсов в скользящем окне / О.В. Иванцов, Д.Е. Горохов, О.В. Романюк, Я.Ю. Стрелков, 10.06.2015. Заявка № 2013118501/08 от 22.04.2013.
4. Иванцов, О.В. Помехоустойчивые способы циклового фазирования в непрерывном дискретном канале // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. №1. С. 25-31.

5. Патент РФ № 2486682 (RU 2486682 C1) Устройство синхронизации псевдослучайной последовательности с функцией исправления ошибок / О.В. Иванцов, Д.Е. Горохов, А.Н. Цибуля, И.Ю. Гагарин, А.А. Кузькин, 27.06.2013. Заявка № 2011131431/08 от 26.07.2011.

#### References

1. Kognovitsky O.S. Theory, methods and algorithms for solving problems in telecommunications based on a dual basis and recurrent sequences. Monograph. SPbSUT. 2011. 427 p. (in Russian).

2. Saitov I.A., Ivantsov O.V. Boundaries of the minimum code distance for some block length of a segment of a binary code of a linear recurrent sequence. Scientific journal "Trudy SPIIRAS" St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences Issue 4 (35). - St. Petersburg: FGBUN "SPIIRAN", 2014. P.15-32 (in Russian).

3. Pat. RF No. 2553089 (RU 2553089 C1) Device for synchronization with a recurrent sequence with the function of allocating test pulses in a sliding window. O.V. Ivantsov, D.E. Gorokhov, O.V. Romanyuk, Ya.Yu. Strelkov, 05.15.2015 (in Russian).

4. Ivantsov, O. V. Noise-resistant methods of cyclic phasing in a continuous discrete channel. Vestnik RGRTU. 2013. No 1. Pp/25-31 (in Russian).

5. Pat. RF No. 2486682 (RU 2486682 C1) Pseudo-random sequence synchronization device with error correction function. O.V. Ivantsov, D.E. Gorokhov, A.N. Tsibulya, I. Yu. Gagarin, A.A. Kuzkin, 27.06.2013 (in Russian).

Статья поступила 18 августа 2021 г.

#### Информация об авторах

Баранов Владимир Александрович – Доктор технических наук, доцент. Сотрудник Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез сигналов. Тел.: +7 9606426946. E-mail: baranov.va@mail.ru.

Иванцов Олег Владимирович – Кандидат технических наук, доцент. Сотрудник Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез сигналов. Тел.: +7 9606426946. E-mail: iowwaa@mail.ru.

Адрес: 302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35.

#### Methodological foundations of soft processing of recurrent sequences and their application in correcting codes

V.A. Baranov, O.V. Ivantsov

**Annotation.** The article considers one of the directions of increasing the stability of the data transmission system, which solves the problems of protection against destructive interference. Methodological principles for constructing corrective codes and examples of implementation of coding devices providing increased stability of the data transmission system are given. The implementation of the formulated methodological principles allows you to effectively combat both independent and grouped errors of great multiplicity in the communication channel and determine the optimality of the receiver for detecting LRP segments according to the Neumann-Pearson criterion.

**Keywords:** stability of data transmission system, electronic protection system, correcting code, cycle synchronization, channel capacity.

#### Information about Authors

Vladimir Alexandrovich Baranov – Doctor of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, employee. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel.: +7 9606426946. E-mail: baranovva@mail.ru.

Oleg Vladimirovich Ivantsov – Candidate of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, employee. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel.: +7 9606426946. E-mail: iowwaa@mail.ru.

Address: 302034, Russian Federation, Orel, Priborostroitelnaya str., 35.

**Для цитирования:** Баранов В.А., Иванцов О.В. Методологические основы мягкой обработки рекуррентных последовательностей и их применение в корректирующих кодах // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 29-36.

**For citation:** Baranov V.A., Ivantsov O.V. Methodological foundations of soft processing of recurrent sequences and their application in correcting codes. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 29-36 (in Russian).

УДК 623.624

**Модель системы управления телекоммуникационной сетью военного назначения**

Спивак А.И., Львов А.Е.

***Аннотация.** Рассматриваются функции, возложенные на управление связью в Вооруженных Силах Российской Федерации, преимущество телекоммуникационной сети, в которой реализована автоматизированная централизованная система управления. Описывается алгоритм технологического управления телекоммуникационной сетью военного назначения, на основании которого строится математическая модель. Для подготовки статьи были использованы подходы, применяемые при разработке автоматизированной централизованной системы управления сетью. Материалы статьи будут интересны широкому кругу читателей, интересующихся данной проблематикой.*

***Ключевые слова:** система управления, телекоммуникационная сеть военного назначения.*

**Введение**

В современных вооруженных силах любой страны связь и сетевые услуги являются ключевыми элементами планирования военных операций, достижения информационного превосходства над противником, формирования единого боевого пространства и проведения решительных операций. Это обуславливает необходимость обеспечивать своевременный и надежный обмен информацией между территориально разнесенными объектами Вооруженных Сил (ВС) Российской Федерации (РФ) в мирное время, мобилизационный период и военное время в условиях ведения противником информационной, разведывательно-диверсионной и радиоэлектронной борьбы.

Отсутствие единой, централизованной автоматизированной системы управления осложняет обеспечение требуемого качества связи и оперативного перестроения ВС при изменении окружающей обстановки.

На управление связью в ВС РФ возложены следующие основные функции:

- передача (прием) сообщений – процесс доставки сообщений, содержащих управляющую информацию до объектов управления и информацию о состоянии объектов управления и выполнении управляющих воздействий от объектов управления;
- регулирование – обеспечение поддержания или необходимого изменения характеристик и параметров, существенных для функционирования объекта управления;
- координация – обеспечение необходимой согласованности действий исполнителей (объектов управления);
- оценка обстановки – процесс изучения и анализа факторов и условий, влияющих на выполнение задачи и достижения цели функционирования телекоммуникационной сети (ТКС) военного назначения;
- выработка и принятие решения – процесс определения наилучшего способа действий по планированию, подготовке и применению войск связи и элементов ТКС;
- планирование – процесс детализации принятого решения, определение конкретных задач по реализации принятого решения, разработки планирующих документов;
- прогнозирование – процесс формирования научно-обоснованного вероятностного суждения о возможных состояниях объекта управления к определенному моменту будущего;
- организация – процесс определения соотношений между структурными элементами ТКС и их взаимодействия;
- мониторинг – процесс сбора данных о состоянии, положении и функционировании объектов управления с возможностью их визуализации;
- учет – фиксация состояния объекта управления;
- контроль – сравнение фактического состояния объекта с заданным;

– анализ – выявление причин отклонений фактического состояния объекта управления от заданного.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что разработка систем централизованного управления связью является довольно сложной наукоемкой задачей.

### Основная часть

В данной статье будет рассмотрена модель технологического управления ТКС военного назначения. Система управления телекоммуникационной сетью военного назначения предназначена для управления качеством услуг связи, предоставляемых должностным лицам органов и пунктов управления. Она должна позволять автоматизировано поддерживать на необходимом уровне тактико-технические характеристики телекоммуникационной сети, рационально распределять ее ресурсы и обеспечивать безопасность связи и информации.

Техническая основа системы управления ТКС военного назначения должна обеспечивать:

- управление своевременным и скрытым развертыванием (свертыванием) элементов ТКС военного назначения, ее перестроением и наращиванием в ходе выполнения задач по связи в любых условиях окружающей обстановки;
- устойчивость и непрерывность работы элементов ТКС, необходимый уровень ее пропускной способности;
- осуществление гибкого маневра ресурсом ТКС в соответствии со складывающейся обстановкой;
- своевременное прохождение всех видов информации в системах управления войсками и управление доступом к ресурсам ТКС;
- управление оперативным восстановлением элементов ТКС;
- управление обеспечением безопасности связи.

Для наиболее эффективного выполнения вышеперечисленных задач необходимо разработать иерархическую систему управления ТКС военного назначения с единым центром управления всеми ее элементами. Это позволит обеспечить необходимую оперативность управления ТКС, соответствующую требованиям системы управления войсками, при условии необслуживаемости оборудования связи. Общий вид централизованной иерархической системы управления ТКС военного назначения представлен на рис. 1.

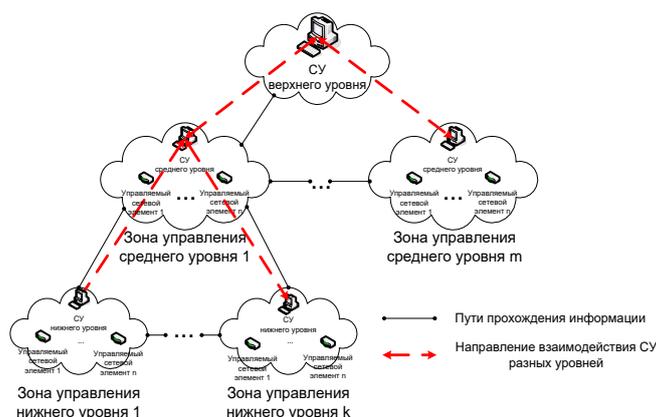


Рис. 1. Централизованная иерархическая система управления ТКС

Обязательным условием реализации системы централизованного иерархического управления является наличие предусмотренного на стадии разработки оборудования связи и защиты информации сетей доступа, так называемого агента управления, который обеспечивает возможность управления (рис. 2).

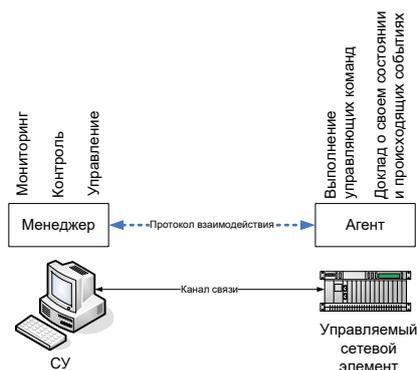


Рис. 2. Управление по принципу «Агент-Менеджер»

Принципы управления, положенные в основу центров («менеджер») и агентов управления, должны учитывать требования оперативности управления ТКС военного назначения.

Оперативность управления ТКС определяется временем реакции ТКС военного назначения на различные виды изменений, вносимые в ее состав, конфигурацию или режимы функционирования, вызванные, например, внешними разрушающими воздействиями или переходом с мирного времени на мобилизационный период или военное время. Чем меньше время реакции, тем быстрее происходит адаптация системы связи к новым требованиям боевой обстановки и эффективнее решаются функциональные задачи системы управления войсками.

Характеристики оперативности развертывания, конфигурирования и реконфигурирования системы связи под изменяющиеся требования боевой обстановки во многом определяются, с одной стороны, уровнем автоматизации всей совокупности процессов сетевого управления, а с другой – самими принципами организации управления, закладываемыми при разработке телекоммуникационного оборудования.

Для реализации мониторинга состояния отдельных сетевых элементов и ТКС в целом необходимо обеспечить возможность взаимодействия «агентов» с «менеджером». Агенты должны собирать статистическую информацию, выявлять аварийные ситуации и факты несанкционированных действий (НСД) и передавать их менеджеру. Менеджер в свою очередь должен обобщать всю полученную от всех агентов информацию и доводить ее до администратора сети в удобном для восприятия виде. В зависимости от сложившейся ситуации администратор может принимать решение о необходимости проведения конфигурационных изменений в работе телекоммуникационного оборудования. Конфигурационные изменения применяются агентом сразу после приема от менеджера соответствующего управляющего воздействия.

В связи с вышеописанным алгоритмом взаимодействия агентов с менеджером, весь трафик системы управления можно разделить на следующие группы: периодические и непериодические сообщения.

Периодические сообщения необходимы для уведомления управляющего устройства о состоянии управляемого оборудования.

Непериодические сообщения:

- сообщения, генерируемые агентом управляемого сетевого элемента о выявленных авариях;
- сообщения, генерируемые агентом управляемого сетевого элемента о фактах НСД;
- передача статистической информации, собранной агентом в процессе функционирования, на управляющее устройство;
- трафик, инициализированный управляющими воздействиями со стороны менеджера.

Рассмотрим эти группы управляющего трафика с математической точки зрения. Сообщения о состоянии управляемого сетевого элемента, носят периодический характер, они фиксированного размера и поэтому не представляют трудности для описания:

$$R_{yc} = \frac{n \times L_{yc}}{t}, \quad (1)$$

где  $R_{yc}$  – ширина полосы, занимаемая передачей уведомляющих сообщений,  $L_{yc}$  – длина уведомляющего сообщения,  $n$  – количество уведомляющих сообщений, переданных за время  $t$ .

Уведомляющие сообщения о состоянии управляемого сетевого элемента передаются на управляющее устройство, с целью отображения состояния ТКС, в целом. Чем чаще передаются уведомления, тем реальнее отображение состояния телекоммуникационной сети.

Непериодический трафик системы управления: сообщения о выявленных авариях, сообщения о фактах НСД, статистическая информация, трафик управляющих воздействий можно охарактеризовать следующим образом:

– число событий (аварии, НСД, передача статистики, поступление управляющих воздействий) не зависит от выбранного момента времени;

– события независимы между собой и распределены со средней плотностью на выбранном промежутке времени.

Таким образом, можно предположить, что каждый поток событий происходит с интенсивностью  $\lambda_i$ , а вероятность совершения какого либо события  $n$  раз за промежуток времени  $t$  равна [1, 2]:

$$P_i(n) = \frac{(\lambda_i t)^n}{n!} e^{-\lambda_i t}. \quad (2)$$

Формат сообщений об авариях и НСД заранее известен, а значит, известен размер передаваемого пакета. Следовательно, можно предположить, что одно сообщение о произошедшей аварии займет полосу  $R_{авар.}$ :

$$R_{авар.} = \frac{L_{авар.}}{t}, \quad (3)$$

где  $L_{авар.}$  – длина пакета в битах.

Для фактов НСД математическая модель схожа с моделью аварий. Математическая модель передачи статистической информации и управляющих воздействий выглядит немного иначе. Размер пакетов данной группы трафика переменной длины, поэтому выражение (3) преобразуется в следующий вид:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{t}, \quad (4)$$

где  $L_i$  – длина пакета в битах,  $i = \overline{1, n}$  – количество пакетов в единице передачи статистической информации и в управляющем воздействии.

Соответствующая данному моменту времени  $t$  занимаемая ширина полосы будет описываться выражением:  $R = R_{yc} + n_{авар.} \cdot R_{авар.} + n_{НСД} \cdot R_{НСД} + n_{стат.} \cdot R_{стат.} + n_{ув.} \cdot R_{ув.}$ , где  $n_{авар.}, n_{НСД}, n_{стат.}, n_{ув.}$  – число аварий, фактов НСД, передач статистической информации и управляющих воздействий соответственно.

Обобщив полученные выше результаты, можно оценить среднюю ширину полосы, которую будет занимать под свои нужды система управления ТКС военного назначения (ВН):  $M[R] = R_{yc} + \lambda_{авар.} + \lambda_{НСД} + \lambda_{стат.} + \lambda_{ув.}$ , где  $\lambda_{авар.}$  – величина среднего значения ширины полосы канала, занимаемая передачей сообщений о выявленных авариях;

$\lambda_{\text{НСД}}$  – величина среднего значения ширины полосы канала, занимаемая передачей сообщений о произошедших фактах НСД;  $\lambda_{\text{стат.}}$  – величина среднего значения ширины полосы канала, занимаемая передачей статистической информации;  $\lambda_{\text{ув}}$  – величина среднего значения ширины полосы канала, занимаемая передачей управляющих воздействий.

Зная ширину полосы, занимаемую каждым видом сообщений системы управления, интенсивность данных сообщений, и имея возможность изменять критерии докладов управляемых сетевых элементов о произошедших событиях, предоставляется возможность уменьшения занимаемой автоматизированной системой управления ТКС ВН ширины полосы за счет снижения оперативности и/или детализации состояния ТКС.

#### Литература

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Издательство ФМЛ, 1962. – 564 с.
2. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. Изд. 4-е, испр. М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 400 с.

#### References

1. Ventzel E.S. Probability theory. M.: FML Publishing House, 1962. 564 p. (in Russian).
2. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Introduction to the theory of mass service. Ed. 4th. Moscow. LKI Publishing House, 2007. 400 p. (in Russian).

Статья поступила 24 августа 2021 г.

#### Информация об авторах

Спивак Андрей Игоревич – Начальник отдела Центра защиты Государственной тайны НЦУО МО РФ. E-mail: intelteh@inteltech.ru. Тел.: +7(812) 313-12-51.

Львов Андрей Евгеньевич – Начальник отдела Спецсвязи ФСО России. Тел.: +7 (812) 313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

#### Military Telecommunication Network Management System Model

A.I. Spivak, A.E. L'vov

**Annotation.** *The functions assigned to communication management in the armed forces of the Russian Federation, the advantage of the telecommunication network, in which an automated centralized control system is implemented, are considered. An algorithm for technological control of a military telecommunication network is described, on the basis of which a mathematical model is built. For the preparation of the article, the approaches used in PJSC «Inteltech» were used in the development of an automated centralized network management system. The materials of the article will be interesting to a wide range of readers interested in this issue.*

**Keywords:** *management system, military telecommunications network.*

#### Information about Authors

Andrey Igorevich Spivak – Head of the Department of the Center for the Protection of State Secrets of the NCUO of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Tel.: +7(812)313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Andrey Evgen'evich L'vov – Head of the Special Communications Department of the FSO of Russia. Tel.: +7 (812) 313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

**Для цитирования:** Спивак А.И., Львов А.Е. Модель системы управления телекоммуникационной сетью военного назначения // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 37-41.

**For citation:** Spivak A.I., L'vov A.E. Military Telecommunication Network Management System Model. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 37-41 (in Russian).

УДК 004.722

### **Аппроксимация значений параметров трафика мультисервисной сети связи смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент**

Баранов В.А., Крюков О.В.

***Аннотация.** Для решения задачи представления многомерной функции распределения плотности вероятности, характеризующей наблюдаемые процессы в мультисервисной сети связи рассмотрен вариант ее аппроксимации смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент. Это позволяет более точно аппроксимировать эмпирические распределения характеризующие наблюдения.*

***Ключевые слова:** мультисервисная сеть связи, скрытая Марковская модель, многомерные случайные наблюдения, гауссовская плотность распределения, теорема Вейерштасса, полиномы Бернштейна.*

#### **Введение**

В ряде случаев, характеризуя процесс управления инфокоммуникационными системами можно выделить две его особенности: уменьшение времени на принятие решения по управлению ресурсами высокоскоростных сетей; слабая наблюдаемость инфокоммуникационных процессов, протекающих в арендуемом сегменте сети, в случае задействования ресурса операторов связи, предоставляющих услуги по переносу трафика. Примером может служить мультисервисная сеть связи (МСС), использующая в качестве транспортной составляющей арендуемый ресурс MPLS сети. В то же время для моделей интегрированного и дифференцированного обслуживания использующихся в МСС основными исходными данными для принятия решения по управлению является класс формируемого трафика.

Для определения класса трафика, формируемого источником МСС предлагается использовать статистические закономерности между типом открываемого приложения и характеристиками пакетов, формируемых данным приложением. Получить обоснованные оценки типа сервиса на меньшем интервале наблюдения возможно при наблюдении длин пакетов и интервалов времени между пакетами, представленными в виде многомерной функции распределения плотности вероятности (ФРПВ) [1].

#### **Формальная постановка задачи**

Выдвинем гипотезу о том, что получить эффективные оценки основного информационного процесса возможно на основе получения оценок многомерной функции распределения плотности вероятности, характеризующей второстепенные процессы, связанные с основным, например, изменение длин пакетов и времени между пакетами. При этом на начальном этапе необходимо получить ФРПВ наблюдаемых параметров, представленную в рассматриваемой задаче многомерной.

#### **Аппроксимация известными распределениями, параметрический случай**

Рассмотрим возможные пути формирования многомерной функции распределения на основе наблюдений. Здесь возможны два варианта: аппроксимация известными распределениями – параметрический случай, и использование оценок Розенблатта-Парзена или полиномиальных оценок – непараметрический случай [2].

Остановимся на рассмотрении параметрического случая. В работе [3] непрерывная ФРПВ представлена эллиптическим симметричным распределением  $b_i(y)$ . Каждый  $b_i(y)$  имеет форму

$$b(y) = h_i \cdot q_i(y) \cdot \left| \Sigma_i^{-1/2} \right|, \quad (1)$$

где  $q_i(y)$  положительно определенная квадратичная форма:

$$q_i(y) = (y - m_i)^* \cdot \Sigma_i^{-1} (y - m_i). \quad (2)$$

Звездочка означает транспонированный вектор или матрицу. Эллипсы имеют общий центр  $(m_x; m_y)$  и являются масштабированными копиями друг друга. Многомерная ФРПВ, характеризующая наблюдения, представлена эллиптическим симметричным распределением.

Несмотря на то, что результаты, представленные в работе [4], являются значительными в области получения оценок с использованием скрытых Марковских моделей (СММ) при наличии нескольких наблюдений, однако условие, связанное с тем, что ФРПВ наблюдений должны быть эллиптически симметричными во многих ситуациях не выполняется. На практике ФРПВ имеют сложный вид и далеко не всегда представляется возможным использовать эллиптически симметричное распределение. Как правило, плотности распределения характеристик трафика для всех типов приложения, аппроксимирующие представленные полигоны частот, имеют сложные формы и не могут быть описаны каким-либо известным законом распределения.

Если функцию плотности  $f(y)$  не удаётся смоделировать параметрическим распределением, её следует описать смесью нескольких распределений. В работе [4] рассмотрен частный случай, когда многомерная функция сложной формы  $f_i(y)$  представлена смесью логарифмически вогнутых или эллиптически симметричных плотностей  $B_{ik}(Y)$ :

$$f_i(y) = \sum_{k=1}^K w_k B_{ik}(Y). \quad (3)$$

Здесь:  $K$  – количество компонент смеси;  $w_k$  – весовой коэффициент  $i$ -той компоненты смеси,  $w_k \geq 0$ .

Многомерная смесь  $B_{ik}(Y)$  – удовлетворяет условиям согласованности Колмогорова, таким образом, что  $B_{ik}(y)$  представлено в следующем виде:

$$B_{ik}(y) = \int_0^{\infty} \psi(y; \mu_i^k; l \Sigma_i^k) dG(l), \quad (4)$$

где:  $\Sigma_i^k$  – ковариационная матрица;  $k$  – число компонент смеси;  $l$  – мерность пространства;  $\mu_i^k$  – вектор математических ожиданий по количеству компонентов смеси  $k$ .

Для смеси эллиптически симметричных ФРПВ  $b_{ik}(y)$  примет вид:

$$B_{ik}(y) = h_{ik} \cdot q_{ik}(y) \cdot \left| \Sigma_{ik}^{-1/2} \right|, \quad (5)$$

где:  $q_{ik}(y) = (y - m_{ik})^* \cdot \Sigma_{ik}^{-1} (y - m_{ik})$ .

Следует отметить, что на практике получить оценки смеси эллиптически симметричных ФРПВ  $f_i(y)$  многомерных функций распределения достаточно сложно. Трудности прежде всего возникают с обратимостью ковариационной матрицы  $\Sigma_i^{-1}$ . Кроме того, данный метод предполагает использование одинакового числа компонент для  $L$ -мерных пространств, что оказывает негативное влияние на точность аппроксимации.

### Аппроксимация смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент

По аналогии с теоремой Вейерштрасса [5] возьмем максимальное число компонент для более точной аппроксимации отдельных наблюдаемых параметров. Вследствие этого, число компонент, представляющих отдельные функции распределения плотности вероятности, и характеризующие наблюдаемые параметры отличаются. На основе выражения (5) запишем

$$B_i(y^1) = \sum_{k_1=1}^{K_1} w_i^{1,k_1} \psi(y^1; \mu_i^{1,k_1}, (\sigma_i^{1,k_1})^2), \tag{6}$$

где:  $\mu_i^{1,k_1}, (\sigma_i^{1,k_1})^2$  – являются элементами сдвиг/масштабной смеси без смешивающего распределения [6]. Математическое ожидание представляет собой параметр сдвига компоненты, дисперсия – параметр масштаба компоненты. В рамках работы рассмотрим вопрос, какое количество компонент смеси нормальных распределений необходимо взять для более точной аппроксимации. Казалось бы, по аналогии с теоремой Вейерштрасса необходимо взять максимальное число компонент для более точной аппроксимации отдельных наблюдаемых параметров

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left\| F(Y) - B_i(Y^{Lk}) \right\| \rightarrow 0.$$

Однако анализ работ в области формирования сдвиг/масштабных моделей показывает, что простое увеличение числа компонент не всегда приводит к возрастанию точности аппроксимации [6]. При использовании двух параметров сдвига и масштаба и увеличения числа компонент, модели типа смесей превращаются во все более точные непараметрические оценки плотности, аналогичные ядерным оценкам.

Для устранения трудоёмкого обращения матриц  $\Sigma_i^{-1}$  примем гипотезу, что в каждой компоненте смеси наблюдаемые параметры некоррелированы. В этом случае выражения, представляющие гауссианы упрощаются, оставаясь, тем не менее, универсальными аппроксиматорами плотности. Многомерную функцию распределения выразим в виде произведения одномерных плотностей по наблюдаемым параметрам. В этом случае одномерные распределения, характеризующие отдельные признаки могут быть, как и в выражении (4) эллиптическими, эллипсоиды рассеивания которых вытянуты вдоль осей координат.

Вероятностная смесь таких компонент позволят аппроксимировать сколь угодно сложную функцию. Такой подход в отличие от ядерных оценок Парзена-Розенблатта предпочтительней, поскольку последний на практике имеет слабое место, связанное определением значения параметра гладкости оценок «ширины окна», в то время как при использовании смеси распределений параметр дисперсии не один, а представлен вектором. Второе достоинство, предложенного подхода, заключается в том, что значения дисперсий выбираются не произвольно, а оценивается автоматически. Однако предложенный метод зависим от качества оценок, полученных с использованием ЕМ алгоритма. Таким образом, введя допущение о независимости наблюдаемых параметров в соответствии с [7]  $L$ -мерная плотность распределения системы может быть задана как произведение одномерных плотностей наблюдаемых величин  $y^1, y^2, \dots, y^L$ :

$$B_i(y^1, y^2, \dots, y^L) = b_i^1(y^1) \cdot b_i^2(y^2) \cdot \dots \cdot b_i^L(y^L). \tag{7}$$

Запишем выражение для  $B_i(Y^{K,L})$  при наличии  $L$  признаков и разного числа компонент

$$B_i(Y^{Lk_L}) = \sum_{k_1=1}^{K_1} w_i^{1,k_1} \psi(y^1; \mu_i^{1,k_1}, (\sigma_i^{1,k_1})^2) \times \sum_{k_2=1}^{K_2} w_i^{2,k_2} \psi(y^2; \mu_i^{2,k_2}, (\sigma_i^{2,k_2})^2) \cdot \sum_{k_L=1}^{K_L} w_i^{L,k_L} \psi(y^L; \mu_i^{L,k_L}, (\sigma_i^{L,k_L})^2). \tag{8}$$

Упростим выражение (8)

$$B_i(Y^{LK_L}) = \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} \dots \sum_{k_L=1}^{K_L} \left( \prod_{l=1}^L \left( w_i^{l,k_l}; \Psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2) \right) \right). \quad (9)$$

Произведение  $\prod_{l=1}^L \Psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2)$  в формуле (9) является гауссовской (нормальной)

плотностью распределения в  $L$ -мерном пространстве, представленной в виде произведения одномерных нормальных распределений.

Обозначим

$$\Psi_i(y^1, y^2, \dots, y^L; k_1, k_2, \dots, k_L) = \prod_{l=1}^L \Psi(y^l; \mu_i^{l,k_l}, (\sigma_i^{l,k_l})^2).$$

Здесь  $\Psi_i(y^1, y^2, \dots, y^L; k_1, k_2, \dots, k_L)$  – компонента  $L$ -мерной плотности распределения системы наблюдений СММ для  $i$ -го скрытого состояния.

Выражение (9) отличается от известных, представленных в работах [3, 4] наличием разного числа компонентов в наблюдаемых параметрах. Это позволяет более точно аппроксимировать эмпирические распределения характеризующие наблюдения, избежать вычислительные проблемы, связанные с обратимостью матриц и получить функцию, связывающую скрытые и многомерные наблюдения, представленные смесью нормальных распределений.

Рассмотрим вопрос сходимости выражения (9) к многомерному эмпирическому распределению. Сформулируем следующую теорему.

**Теорема 1.** Пусть  $L$  наблюдаемых параметров, представленные в виде смеси многомерной функции распределения плотности вероятности определяют состояния скрытой Марковской модели. Тогда смесь многомерного нормального распределения, представленная в виде произведения смесей одномерных нормальных распределений с разным числом компонент, сводится, в основном, к эмпирической многомерной функции распределения:

$$B_i(Y^{LK_L}) \Rightarrow F(Y^L), \quad (10)$$

где  $F(Y^L)$  – многомерная ФРПВ.

*Доказательство.*

Для доказательства теоремы о сходимости смеси многомерных нормальных распределений, представленной в виде произведения смесей одномерных нормальных распределений с разным числом компонент к эмпирической многомерной функции распределения воспользуемся *теоремой непрерывности* соответствия распределений и их характеристической функции [6]. Пусть исходная эмпирическая функция  $F(Y^L)$  является непрерывной и представлена одномерными ФРПВ  $F(Y^L) = (f_1(y_1) \dots f_L(y_L))$ . Запишем ее характеристическую функцию, как  $L$  мерное преобразование Фурье-Лебега по мере  $d\mu_l(y^l) = d\mu_1(y_1) \dots d\mu_l(y_l)$

$$\zeta(F(Y^L)) = E(e^{i(t^L; Y^L)}) = \int_{R^L} e^{i \sum_{l=1}^L t_l y_l} (f_l(y^l) d\mu_l(y^l)).$$

Используя следствие для многомерного случая из теоремы замены запишем

$$\zeta(F(Y^L)) = E(e^{i \sum_{l=1}^L t_l y_l}). \quad (11)$$

Представим характеристическую функцию  $B_i(Y^{LK_L})$ , выразив ее через смесь

нормальных распределений  $f_i(y) = \sum_{k=1}^K w_{ik} B_{ik}(Y)$ .

Аналогично выражению (11) для  $L$  пространства получим.

$$\zeta \left( B \left( Y^{LK_L} \right) \right) = E \left( e^{i \left( t_1 w^{1,k_1} \sum_{k_1=1}^{k_1} Y^{1,k_1} \right) + \dots + \left( t_L w^{L,k_L} \sum_{k_L=1}^{k_L} Y^{L,k_L} \right)} \right). \quad (12)$$

При этом выражения (11) и (12) представляют собой идентичные аддитивные свертки по  $L$  одномерных плотностей. Это позволяет перейти к рассмотрению одномерного случая. Для аппроксимации одномерной эмпирической функции  $f(y)$  выберем некоторую систему базисных функций  $\{f_k(y), k \geq 1\}$ . Согласно теореме непрерывности  $f_k(y) \rightarrow f(y)$ , если последовательность характеристических функций  $\{\xi_k(y), k \geq 1\}$  сходится к некоторой непрерывной функции  $\xi(y)$

$$\xi_k(y) \rightarrow \xi(y). \quad (13)$$

Выражение (13), основанное на ряде вспомогательных утверждений, характеризует слабую сходимость функций  $f_k(y) \rightarrow f(y)$ .

Тогда для того, чтобы доказать, что имеет место сходимость  $B_i(Y^{LK_L}) \Rightarrow F(Y^L)$ , необходимо доказать, что существует слабо компактная последовательность функций распределения  $\{\psi_k(x; \mathcal{G}_k)\}_{k \geq 1}$ , принадлежащая множеству  $M(f(y)/f_k(y))$

$$\psi_k(y; \mathcal{G}_k) \in M(f(y)/f_k(y)). \quad (14)$$

При этом необходимым условием является условие идентифицируемости семейства функций  $\psi_k(y; \mathcal{G}_k)$ . На основании работ Г. Тейчера [6], можно однозначно утверждать, что семейство конечных смесей нормальных законов является идентифицируемым.

Достаточным условием является слабая компактность последовательности функций распределения  $\{\psi_k(x; \mathcal{G}_k)\}_{k \geq 1}$ .

Раскроем выражение (12)

$$\zeta \left( B_i \left( Y^{LK_L} \right) \right) = e^{\sum_{k_1=1}^{k_1} i \cdot (w_i^{1,k_1} \cdot (\mu_i^{1,k_1} \cdot t - (\sigma_i^{1,k_1})^2 \cdot t^2 / 2))} + e^{\sum_{k_2=1}^{k_2} i \cdot (w_i^{2,k_2} \cdot (\mu_i^{2,k_2} \cdot t - (\sigma_i^{2,k_2})^2 \cdot t^2 / 2))} + \dots + e^{\sum_{k_L=1}^{k_L} i \cdot (w_i^{L,k_L} \cdot (\mu_i^{L,k_L} \cdot t - (\sigma_i^{L,k_L})^2 \cdot t^2 / 2))}. \quad (15)$$

Согласно теореме Прохорова, семейство функций распределения слабо компактно тогда и только тогда, когда оно плотно. Плотное множество – подмножество пространств, точками которого можно сколь угодно хорошо приблизить точку объемлющего пространства,  $\psi_k(y; \mathcal{G}_k)$  плотно в  $f(y)$ , если всякая окрестность любой точки  $y$  содержит

элемент из  $\mathcal{G}_k$ . В выражении (16)  $\sum_{k_i=1}^{K_i} w_i^{1,k_i} \psi(y^1; \mu^{1,k_i}, (\sigma^{1,k_i})^2)$  – представляет собой аддитивно

замкнутое семейство нормальных законов с различными математическими ожиданиями и дисперсиями. Смесь нормальных распределений в этом случае образует плотное подмножество в пространстве  $[0; y_{\max}^1]$  для  $L = 1$ , одномерного пространства.

Характеристическая функция эмпирического распределения  $f_k(y)$  фигурирующая в определении множества  $M(Y^L/H)$  соответствует характеристической функции компонента смеси  $e^{i \cdot (w_i^{L,k_L} \cdot (\mu_i^{L,k_L} \cdot t - (\sigma_i^{L,k_L})^2 \cdot t^2 / 2))}$ . Тогда выполняются условия сходимости смеси распределений

$\left\{ e^{\sum_{k=1}^{k_l} i \cdot (w_i^{l,k_l} \cdot (\mu_i^{l,k_l} - t - (\sigma_i^{l,k_l})^2 \cdot t^2 / 2))} \right\} \rightarrow f(y)$ , а множество  $M(f(y)/b(y))$  содержит не более одного

элемента. В свою очередь соответствие характеристических функций позволяет сделать вывод о сходимости распределений  $B_i(Y^{LK_L}) \Rightarrow F(Y^L)$ .

*Теорема доказана.*

Таким образом, в работе было получено выражение, позволяющее аппроксимировать многомерную эмпирическую ФРПВ произведением смеси гауссиан с разным числом компонент. Такой подход позволяет использовать достоинства параметрических и непараметрических методов оценивания. Доказана слабая сходимость такой аппроксимации.

### Заключение

В статье с использованием подходов непараметрического оценивания многомерная функция распределения плотности вероятности представлена смесью нормальных распределений. Получено выражение, содержащее максимальное число компонент и позволяющее более точно аппроксимировать многомерную ФРПВ. В дальнейшем данные результаты используются при решении задачи идентификации параметров СММ  $\lambda^L = (A, \{b_1, b_2, \dots, b_N\}, \pi)$ , использующей несколько наблюдаемых второстепенных процессов, протекающих в МСС.

### Литература

1. Dainotti A. et al. Internet traffic modeling by means of Hidden Markov Models. Computer Networks. 2008. Т. 52. No. 14. P. 2645-2662.
2. Расин, Джеффри. Непараметрическая эконометрика: вводный курс. 2008. № 4, С. 7-56.
3. Louis A. Liporace. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources. IEEE transactions on information theory, Vol. IT-28, No. 5, September 1982, pp. 729-734.
4. В.-Н. Juang. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains. AT&T Technical Journal, Vol. 64, No. 6, July-August 1985, pp. 1235-1248.
5. Голик Ф.В. Аппроксимация эмпирических распределений вероятностей полиномами Бернштейна // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. С. 1-22.
6. Королев В.Ю. Вероятностно-статистический анализ хаотических процессов с помощью смешанных гауссовских моделей. Декомпозиция волатильности финансовых индексов и турбулентной плазмы. – М.: Издательство ИПИ РАН, 2007. – 390 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

### References

1. Dainotti A. et al. Internet traffic modeling by means of Hidden Markov Models. Computer Networks. 2008. Т. 52. No. 14. P. 2645-2662.
2. Racine, Jeffrey S. Nonparametric econometrics: a primer. 2008. No.4, pp. 7-56. (in Russian).
3. Louis A. Liporace. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources. IEEE transactions on information theory, Vol. IT-28, No. 5, September 1982, pp. 729-734.
4. В.-Н. Juang. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains. AT&T Technical Journal, Vol. 64, No. 6, July-August 1985, pp. 1235-1248.
5. F.V. Golik. Approximation of empirical probability distributions by Bernstein polynomials. Radio Electronics Journal [electronic journal]. 2018. No. 7. Pp. 1-22. (in Russian).
6. Korolev V. Yu. Probabilistic-statistical analysis of chaotic processes using mixed Gaussian models. Decomposition of volatility of financial indices and turbulent plasma. Moscow: IPI RAN, 2007. 390 p. (in Russian).
7. E.S. Wentzel Probability theory. Moscow.: Higher. shk., 1998. 576 p. (in Russian).

Статья поступила 31 августа 2021 г.

### Информация об авторах

Баранов Владимир Александрович – Доктор технических наук, доцент. ФГКВООУ ВО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, сотрудник. Область научных интересов: сетевые технологии, современные системы и сети передачи данных, обеспечение информационной безопасности сетевого взаимодействия. Тел.: +7 9606426946. E-mail: baranovva@mail.com.

Крюков Олег Витальевич – Кандидат технических наук, доцент. ФГКВООУ ВО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, сотрудник. Область научных интересов: сетевые технологии, современные системы и сети передачи данных, обеспечение информационной безопасности сетевого взаимодействия. Тел.: +74862549838. E-mail: oleghooker@gmail.com.

Адрес: 302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35.

### Approximation of traffic parameters values of a multiservice communication network by a mixture of multivariate normal distributions with a different number of components

V.A. Baranov, O.V. Kriukov

**Annotation.** *To solve the problem of representing a multidimensional probability density distribution function characterizing the observed processes in a multiservice communication network, a variant of its approximation by a mixture of multidimensional normal distributions with a different number of components is considered. This makes it possible to more accurately approximate the empirical distributions characterizing the observations.*

**Keywords:** *multiservice communication network, hidden Markov model, multidimensional random observations, Gaussian distribution density, Weierstrass theorem, Bernstein polynomials.*

### Information about Authors

Vladimir Alexandrovich Baranov – Doctor of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, employee. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel. : +7 960 642 69 46. E-mail: baranovva@mail.com.

Oleg Vitalievich Kryukov – Candidate of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, staff member. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel.: +7 486 254 98 38. E-mail: oleghooker@gmail.com.

Address: 302034, Russian Federation, Orel, Priborostroitelnaya str., 35.

**Для цитирования:** Баранов В.А., Крюков О.В. Аппроксимация значений параметров трафика мультисервисной сети связи смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 42-48.

**For citation:** Baranov V.A., Kriukov O.V. Approximation of traffic parameters values of a multiservice communication network by a mixture of multivariate normal distributions with a different number of components. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 42-48 (in Russian).

УДК 004.75

## Реализация гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в NS2

Молокович И.А.

**Аннотация.** *Постановка задачи:* рассмотрены проблемы, связанные с реализацией разработанного гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе network simulator ns-2. **Целью работы** является реализация разработанного гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе network simulator ns-2 для дальнейшего исследования и сравнения с протоколами AODV, AOMDV, DSR, DSDV, TORA. **Используемые методы:** имитационное моделирование с помощью программного симулятора телекоммуникационных сетей Network Simulator NS-2. **Новизна** состоит в том, что для реализации разработанного гибридного протокола маршрутизации, состоящего из трех компонентов: для стационарной части радиосети – проактивного протокола маршрутизации, для мобильных сетей доступа – активного протокола маршрутизации, и протокола маршрутизации между мобильными радиосетями для формирования полного маршрута от источника до получателя, предложена последовательность действий по добавлению новой реализации и изменению файлов программного симулятора network simulator ns-2. **Результат** заключается в том, что предложен вариант реализации гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе network simulator ns-2. На первом этапе добавляется каталог с именем протокола, который содержит файлы реализации агента маршрутизации, таблицы маршрутизации и формата пакета. На втором этапе вносятся изменения в файлы каталога ns-2 для последующей компиляции и запуска протокола в симуляторе. **Практическая значимость:** предложенный вариант реализации разработанного гибридного алгоритма маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе network simulator ns-2 позволяет получить последовательность действий по реализации любого протокола маршрутизации в программном симуляторе network simulator ns-2 для дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** радиосеть, беспроводная сеть, протоколы маршрутизации, гибридный протокол маршрутизации, network simulator ns-2.

### Введение

В статье пошагово описывается реализация нового гибридного протокола маршрутизации для беспроводной сети в программном симуляторе Network Simulator NS-2. Рассмотрим радиосеть, состоящую из нескольких *ad hoc* компонентов (сетей доступа) и стационарных маршрутизаторов области ретрансляторов, которые работают в качестве ядра сети [1]. Для такой радиосети предлагается гибридный протокол маршрутизации (*HRP – Hybrid Routing Protocol*), который состоит из трех компонентов [1]:

протокола маршрутизации внутри сети доступа (*Access Network Routing Protocol – ANRP*;

протокола маршрутизации стационарных маршрутизаторов области ретрансляторов (*Router Infrastructure Routing Protocol – RIRP*;

протокола маршрутизации между сетями доступа (*Access network Gateway Routing Protocol – AGRP*).

Первым шагом для добавления нового протокола маршрутизации *MANET* в *NS-2* является создание каталога с именем протокола *hrp* в базовом каталоге *ns-2* [2]. Затем добавляются основные файлы, используемые для реализации протокола. В реализации протокола маршрутизации *HRP* используются файлы: *Hrp.cc* и его заголовочный файл, таблица маршрутизации с заголовочным файлом и файл формата пакета, который используется для определения различных форматов пакетов.

Из всех этих файлов фактическая реализация осуществляется в файле *Hrp.cc*, который реализует все таймеры, агента маршрутизации и интерфейс, с помощью которого файлы с

расширением «*cc*» взаимодействуют с файлами *Tcl*. Сценарий *Tcl* используется для достижения цели моделирования. Файл *Hrp.cc* – это скомпилированная иерархия, файл *Tcl* – это интерпретированная иерархия, между которыми существует однозначное соответствие.

Файлы, используемые для реализации протокола, и их содержание перечислены ниже:

*hrp.h* – файл заголовка, где определяются все необходимые таймеры и агент маршрутизации, выполняющий функции протокола маршрутизации;

*Hrp.cc* – выполнена фактическая реализация таймеров, агента маршрутизации и интерфейса взаимодействия с *Tcl*;

*hrp\_pkt.h* – определены форматы пакетов протокола;

*hrp\_rtable.h* – файл заголовка таблицы маршрутизации;

*hrp\_rtable.cc* – определена фактическая реализация функциональности таблицы маршрутизации.

Целью работы является реализация разработанного гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе *network simulator ns-2* для дальнейшего исследования и сравнения с протоколами *AODV*, *AOMDV*, *DSR*, *DSDV*, *TORA*.

### Обзор файлов протоколов маршрутизации

Для любого протокола маршрутизации, который будет реализован в *NS-2*, есть некоторые функции, которые должны периодически исполняться. В случае протокола маршрутизации *HRP* пакеты приветствия периодически отправляются ко всем узлам. Еще одна функция – это очистка таблицы маршрутизации и широковещательного идентификатора, которые выполняются также периодически. Данные функции выполняются только таймерами. Таймеры определены в основном заголовочном файле протокола.

#### *hrp\_pkt.h*

В этом файле определяются различные пакеты, используемые в протоколе маршрутизации. Например, в протоколе маршрутизации *HRP* используются пакеты запросов, пакеты ответов и т. д., которые определяются в файле. Типы, используемые в пакетном формате: 16-битное целое число, 8-битное целое число и т. д., определяются в файле *config.h*. Формат пакета определяется внутри структуры. В качестве атрибутов пакета протокола маршрутизации в файле определены: сетевой адрес, длина пакета в байтах и номер пакета.

Эти пакеты являются только контрольными пакетами протокола маршрутизации. *IP*-пакет и пакет, в который инкапсулирован *IP*-пакет, определены в файле *packet.h* в каталоге *ns-2*. Таким образом можно использовать созданные контрольные пакеты в процессе моделирования протокола маршрутизации, и они будут приниматься узлами сети.

Поскольку пакет, полученный узлом, является *IP*-пакетом, нам нужно определить поле смещения там, где начинается этот пакет управления протокола маршрутизации. Он также определяется в классе пакетов.

#### *Hrp.cc*

Чтобы использовать пакеты протокола маршрутизации с интерфейсом *Tcl*, нам нужно связать их с интерпретатором *Tcl*. Эта привязка выполняется в файле *Hrp.cc*.

#### *hrp.h*

В этом файле определяется класс для используемого протокола маршрутизации, который содержит атрибуты и функциональность, необходимую протоколу при выполнении его задач. Для выполнения всех этих функций необходимы заголовочные файлы – *timer-handler.h*, *trace.h*, *random.h*, *classifier-port.h*, *agent.h*, *packet.h* и т. д.

В файле *timer-handler.h* определяется базовый класс обработчика таймера, файл *trace.h* определяет класс трассировки, файл *random.h* – класс для генерации псевдослучайных чисел, файл *classifier-port.h* – класс, используемый для передачи пакетов с сетевого уровня

на верхние уровни, файл *agent.h* – базовый класс агента маршрутизации, файл *packet.h* – базовый класс пакета.

Файл *hrp.h* определяет таймер для периодической отправки контрольных пакетов маршрутизации и функции класса протокола *HRP*.

Основной функцией протокола является *recv ()*, в которой определено то, что узел должен делать, когда он получает любой пакет, будь то контрольный или пакет данных. Другие функции – *send ()*, *forward ()*, *reset ()* и т. д.

Функция *send ()* вызывается для отправки контрольного пакета, функция *forward ()* – для пересылки пакетов данных, *reset ()* – для планирования пользовательского таймера.

Все поля отслеживания определены в таблице файла *cmu-trace.cc*, где определены параметры трассировки. Также можно определить параметры трассировки из файла сценария *Tcl*.

#### ***hrp\_rtable.h, hrp\_rtable.cc***

В файле таблицы маршрутизации определены все функции таблицы маршрутизации – *print ()*, *clear ()*, *rm\_entry ()*, *add\_entry ()*, *lookup ()*, *size ()*.

Функция *print ()* выводит содержимое таблицы маршрутов в файл трассировки, функция *clear ()* удаляет все записи из таблицы маршрутов, функция *rm\_entry ()* удаляет запись в таблице маршрутов, учитывая адрес назначения, функция *add\_entry ()* добавляет новую запись в таблицу маршрутов с учетом адреса назначения и следующего узла, функция *lookup ()* возвращает адрес следующего узла с указанием адреса назначения. Если такой записи не существует, т. е. до адресата нет маршрута, то функция *lookup ()* возвращает *IP\_Broadcast*. Функция *size ()* возвращает количество записей в таблице маршрутов.

Поля таблицы маршрутизации определяются в заголовочном файле таблицы маршрутизации.

### **Изменения, необходимые после добавления нового протокола маршрутизации в NS-2**

Когда мы добавили все файлы и их функции в соответствующие файлы, также должны быть изменены файлы в каталоге *ns2* для успешной компиляции и запуска протокола в симуляторе.

Необходимые изменения файлов в каталоге *ns-2* приведены ниже [2, 3]:

#### ***common/packet.h***

В общей папке в базовой директории *ns2* находится файл *packet.h*, который должен быть изменен. В этом файле должен быть добавлен тип пакета протокола: строка *PT\_HRP* должна быть добавлена в поле *static const packet\_t*.

Остальные изменения вносятся в функцию *p\_info ()*, где должно быть указано имя добавленного протокола.

#### ***trace/cmu-trace.h***

Для поддержки трассировки также требуются изменения в файле *cmu-trace.h*, где необходимо добавить имя функции *format\_hrp*. Функциональность этого должна быть определена в файле *cmu-trace.cc*.

#### ***Tcl Library***

Теперь требуется внести некоторые изменения в файлы *Tcl*. Нужно добавить пакет протокола маршрутизации, задать значения по умолчанию для привязанных атрибутов и предоставить необходимую инфраструктуру для создания беспроводных узлов, работающих в нашем протоколе маршрутизации.

#### ***ns-packet.tcl***

В этом файле необходимые изменения заключаются в том, что мы должны добавить имя протокола маршрутизации в функцию *foreach\_prot { }*.

#### ***ns-default.tcl***

В этом файле находятся значения по умолчанию для переменной, которые отправляются пользователем из *Tcl* сценария. Значения по умолчанию обязательны, потому что в случае, если пользователь не вводит любые значения переменных привязки, должны быть приняты значения по умолчанию. Эти значения по умолчанию берутся из файла *ns-default.tcl*.

#### *ns-lib.tcl*

В файле определена процедура вызова узла в процедуре создания беспроводного узла. Эта процедура, среди прочих других задач, предназначена для установки агента маршрутизации для узла. Также здесь должен быть определен сценарий для создания агента протокола маршрутизации с адресом узла.

#### *queue/priqueue.cc*

Приоритетные очереди рассматривают пакеты маршрутизации как пакеты с высоким приоритетом, вставляя их в начало очереди. Класс *PriQueue* указывает, что пакеты *hrp* являются пакетами протокола маршрутизации и поэтому рассматриваются как высокоприоритетные.

#### *Makefile*

Последним шагом после добавления всех необходимых функций в файлы должна быть компиляция. Компиляция файлов производится командой *make*. Перед выполнением *make* каталог *hrp* должен быть добавлен в список объектов раздела *INCLUDES* файла *Makefile*, также должна быть добавлена строка в разделе *OBJ\_CC*. После добавления и выполнения команды *make*, если ошибок не происходит, протокол является установленным успешно и может быть использован для целей моделирования.

### Расширения Симулятора

С технической точки зрения *NS2* – это в основном интерпретатор *OTcl* с сетью библиотек объектов моделирования. Если нужного сетевого объекта нет, можно написать объект в *C++* и добавить его в библиотеку.

#### *Tcl/OTcl*

*Tcl* (*Tool Command Language*) означает командный язык инструментов. *OTcl* (*Object oriented Tcl*) расшифровывается как объектно-ориентированный *Tcl*. *Tcl* имеет возможность быть встроенным в прикладную систему, скажем, редактор или симулятор, и выступать в качестве языка интерфейса, который позволяет пользователю вызывать конкретные приложения функции с командами *Tcl*. Другими словами, *Tcl* расширяется; вы можете добавить все свои нужные функции в свою библиотеку.

*Tcl* – это интерпретируемый скриптовый язык с простым синтаксисом. *OTcl* – это расширение *Tcl* для объектно-ориентированного программирования. В *Tcl* пользователи могут определять классы и создавать объекты.

Класс *OTcl* также может быть определен в языке *C++*. На самом деле иногда приходится выполнять критически важные сетевые компоненты на языке *C++* ради эффективности. Ниже приведен пример реализации протокола маршрутизации *HRP*, чтобы продемонстрировать, как добавлять новые агенты маршрутизации в *NS2* с помощью *C++*.

#### Добавление нового заголовка пакета

Новый протокол маршрутизации *HRP* нуждается в новом типе пакетов. В реализации *NS2* фактически все пакеты имеют один и тот же формат, содержащий заголовки пакетов для каждого протокола. Различные протоколы читают и пишут различные заголовки пакетов и игнорируют заголовки пакетов для других протоколов. Таким образом, добавление нового типа пакета – это добавление нового типа заголовка пакета в общую структуру пакетов. Следующий сегмент файла *hrp\_pkt.h* определяет заголовок пакета протокола *HRP*:

```
struct hdr_hrp_pkt {
```

```

nsaddr_t pkt_src_;
u_int16_t pkt_len_;
u_int8_t pkt_seq_num_;
... ..
static int offset_;
inline static int& offset () {return offset_;}
inline static hdr_hrp_pkt* access (const Packet* p) {
    return (hdr_hrp_pkt*) p -> access (offset_);
}
};

```

После определения формата заголовка пакета следующий сегмент файла *Hrp.cc* сообщает *NS2*, что этот новый заголовок пакета должен быть добавлен в общий пакет и должен упоминаться в *OTcl* с именем *Packet-Header/HRP*.

```

int hdr_hrp_pkt::offset_;
static class HrpHeaderClass : public PacketHeaderClass {
public:
    HrpHeaderClass() : PacketHeaderClass ("PacketHeader/HRP",
        sizeof (hdr_hrp_pkt)){
        bind_offset (&hdr_hrp_pkt::offset_);
    }
} class_rtiProtoHrp_hdr;

```

Следующим шагом является изменение списка типов пакетов *NS2* для добавления нового типа пакетов в файле *common/packet.h*:

```

static packetClass classify (packet_t type)
{
    if (type == PT_DSR || \
        ... ..
        type == PT_HRP)
        return ROUTING;
    ... ..
};

```

Кроме того, необходимо дать ему имя в списке информации о пакете. Это имя будет отображаться в списке файла трассировки пакетов.

```

static void initName ()
{
    ... ..
    name [PT_AOMDV] = "AOMDV";
    name [PT_HRP] = "HRP";
    name [PT_TYPE] = "undefined";
}

```

Теперь новый пакет типа *PT\_HRP* доступен для нового протокола *HRP*.

### Добавление нового агента маршрутизации

Новый агент определен как подкласс класса *Agent NS2* и все функции, определенные методами *command* и *recv*, выполняет класс *Hrp*. Метод *command* принимает и выполняет команды из *OTcl* скрипта, например, отправляет *hrp*-пакеты; метод *recv* обрабатывает пакеты, отправленные агенту, например, от протоколов *UDP* или *TCP*, или от другого узла. Класс *Hrp* определен в файле *hrp.h*:

```

class Hrp : public Agent {
    ... ..
}

```

```

protected:
... ..
public:
    Hrp (nsaddr_t);
    int command (int, const char* const*);
    void recv (Packet*, Handler*);
};

```

Следующее, что нужно сделать, это привязать класс *Hrp* C++ к классу *OTcl Agent/Hrp* в файле *Hrp.cc*:

```

static class HrpClass : public TclClass {
public:
    HrpClass () : TclClass ("Agent/HRP") {}
    TclObject* create (int args, const char*const* argv) {
        assert (args == 5);
        return (new Hrp ((nasaddr_t)Address::instance().str2addr(argv[4])));
    }
} class_rtProtoHrp;

```

Переменные-члены класса C++ привязаны к переменной-члену *OTcl* так, что они также доступны в сценарии *OTcl*:

```

Hrp::Hrp (nsaddr_t id) : Agent (PT_HRP), pkt_timer_(this) {
    bind_bool ("accessible_var_", &accessible_var_);
    ra_addr_ = id;
}

```

После того как новый код C++ будет скомпилирован и объединен в исходный код *NS2*, новый агент *Agent/Hrp* можно создать в *OTcl*-скрипте, задать структуру сети и провести моделирование работы протокола маршрутизации.

### Вывод

Предложенный вариант реализации разработанного гибридного алгоритма маршрутизации беспроводной сети в программном симуляторе *network simulator ns-2* позволяет получить последовательность действий по реализации любого протокола маршрутизации в программном симуляторе *network simulator ns-2* для дальнейшего исследования.

### Литература

1. Молокович И.А. Маршрутизация в стационарной радиосети декаметрового радиосвязи // Техника средств связи. 2019. № 3 (147). С. 33-40.
2. Francisco J. Ros, Pedro M. Ruiz. Implementing a New Manet Unicast Routing Protocol in NS2. *Dept. of Information and Communications Engineering University of Murcia*. December, 2004. 35 p.
3. Молокович И.А. Реализация имитационной модели гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в Network Simulator (NS-2) // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 5 // СПОИСУ. СПб., 2018, с. 257 – 260.

### References

1. Molokovich I.A. Routing in the stationary radio network decameter radio. Means of communication equipment. No 3 (147). Pp. 33-40 (in Russian).
2. Francisco J. Ros, Pedro M. Ruiz. Implementing a New Manet Unicast Routing Protocol in NS2. *Dept. of Information and Communications Engineering University of Murcia*. December, 2004. 35 p.

3. Molokovich I.A. Implementation of simulation model of hybrid routing Protocol of wireless network in Network Simulator (NS-2). Regional Informatics and information security. Collection of works. Issue 5. SPOIS. SPb., 2018. Pp. 257-260 (in Russian).

Статья поступила 03 сентября 2021 г.

#### Информация об авторе

Молокович Игорь Аркадьевич – Кандидат технических наук, доцент. Ведущий инженер ПАО «Интелтех». Область научных интересов: телекоммуникационные сети; алгоритмы и протоколы маршрутизации. Тел.: +7 921 344 24 29. E-mail: igor-molokovich@yandex.ru.

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

#### Implementation of the hybrid wireless network routing Protocol in NS2

I.A. Molokovich

**Annotation. Problem statement:** problems related to the implementation of the developed hybrid wireless network routing Protocol in the network simulator ns-2 software are considered. **The purpose of this work** is to implement the developed hybrid wireless network routing Protocol in the network simulator ns-2 software for further research and comparison with the aodv, AOMDV, DSR, DSDV, TORA protocols. **Methods used:** simulation using the software simulator of telecommunications networks Network Simulator (NS-2). **The novelty** consists in the fact that the implementation of the developed hybrid routing Protocol that consists of three components: the stationary part of the radio network is a proactive routing Protocol for mobile access networks – active routing Protocol, and routing Protocol between mobile radio networks to form a complete route from a source to a recipient, a sequence of actions for adding new implementations and changes to files software simulator the network simulator ns-2. **The result** is that a variant of implementing a hybrid wireless network routing Protocol in the network simulator ns-2 software is proposed. In the first step, you add a directory with the Protocol name that contains the routing agent implementation files, the routing table, and the package format. In the second stage, changes are made to the ns-2 directory files for later compilation and running the Protocol in the simulator. **Practical relevance:** the proposed implementation of the developed hybrid wireless network routing algorithm in the network simulator ns-2 software allows you to obtain a sequence of actions for implementing any routing Protocol in the network simulator ns-2 software for further research.

**Keywords:** radio network, wireless network, MANET, routing protocols, hybrid routing protocol, network simulator ns-2.

#### Information about Authors

Igor Arkadievich Molokovich – Candidate of technical Sciences, associate Professor. Leading engineer of PJSC "IntelTech". Research interests: telecommunication networks; routing algorithms and protocols. Тел.: +79213442429. E-mail: igor-molokovich@yandex.ru.

Address: Russia, 197342, Saint-Petersburg, Kantemirovskay Av, 8.

**Для цитирования:** Молокович И.А. Реализация гибридного протокола маршрутизации беспроводной сети в NS2 // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 49-55.

**For citation:** Molokovich I.A. Implementation of the hybrid wireless network routing Protocol in NS2. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 49-55 (in Russian).

УДК 004.722

**Метод оценивания значений класса трафика, формируемого источником мультисервисной сети связи на ограниченном интервале наблюдения**

Крюков О.В., Баранов В.А.

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы получения оценок основного ненаблюдаемого процесса, протекающего в мультисервисной сети связи на основе анализа второстепенных наблюдаемых процессов. Для этого использован аппарат скрытых Марковских моделей. Новизна решения заключается в использовании множества второстепенных признаков, представленных многомерной функцией распределения плотности вероятности, характеризующей наблюдаемые процессы в мультисервисной сети связи, позволяющей повысить наблюдаемость основного процесса. В работе получены выражения, позволяющие осуществить переоценку параметров модели скрытых Марковских моделей с многомерной функцией наблюдения, представляющей смесь нормальных распределений с разным числом компонент.

**Ключевые слова:** мультисервисная сеть связи, скрытая Марковская модель, многомерные случайные наблюдения, гауссовская плотность распределения.

**Введение**

Рассмотрим задачу получения оценок значений класса трафика, формируемого источником мультисервисной сети связи (МСС) на основе анализа второстепенных признаков, таких как длины пакетов и время между пакетами. Условия решения задачи: оценки необходимо получить в режиме реального времени на коротких интервалах наблюдения; рассматриваемые стохастические процессы, представленные изменениями скрытых и наблюдаемых состояний МСС, ограничены участками локальной стационарности.

**Формальная постановка задачи**

Осуществим формальную постановку задачи.

**Дано:** Наблюдения, представленные в виде упорядоченного множества векторов, наблюдаемых во времени  $\vec{O}_1, \vec{O}_2, \dots, \vec{O}_T$ . Каждый вектор – это точка в евклидовом  $L$  пространстве. Наблюдаемые состояния  $\vec{O} = \vec{O}_1, \vec{O}_2, \dots, \vec{O}_T$  связаны со скрытыми посредством функций распределения плотности вероятности (ФРПВ) множеством  $V = \{b_1(y), b_2(y), \dots, b_N(y)\}$ , где  $b_i(y)$  – плотность распределения вероятности, наблюдаемой непрерывной случайной величины  $y$  в состоянии  $x_i$ . При этом различают следующие второстепенные наблюдаемые параметры: коррелированные; зависимые некоррелированные; независимые и некоррелированные.

**Найти.** Требуется на основе множества наблюдаемых векторов  $\vec{O}_1, \vec{O}_2, \dots, \vec{O}_T$ , характеризующих значения отдельных параметров определить последовательность скрытых состояний  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  информационного процесса, где последовательность скрытых состояний – цепь Маркова с матрицей вероятностей перехода между скрытыми состояниями  $A = [a_{ij}, i, j = 1, \dots, N]$ .

Рассмотренные задачи представляется возможным решить с использованием скрытых Марковских моделей (СММ). В ряде работ при решении такого рода задач формируются отдельные СММ [1, 2]. Число моделей определяется числом наблюдаемых параметров. Для принятия итогового решения, полученные результаты отдельных моделей сравнивают с использованием пороговых функций. При этом полученный результат неоднозначен. Связано это прежде всего с необходимостью использования EM-алгоритма при решении

задачи идентификации каждой из моделей [2]. Особенностью EM-алгоритма является неустойчивость к исходным данным, следствием которой становится нахождение локального экстремума и неправильное определение параметров модели.

В свою очередь повысить состоятельность, несмещенность, эффективность оценок основного информационного процесса возможно на основе получения оценок многомерной ФРПВ, характеризующей второстепенные процессы, связанные с основным.

При этом решение задачи необходимо разбить на ряд этапов:

получение функций распределения плотности вероятности наблюдаемых параметров, представленной в рассматриваемых задачах многомерной функцией распределения;

решение задачи идентификации параметров СММ  $\lambda^L = (A, \{b_1, b_2, \dots, b_L\}, \pi)$ , где:  $L$  – количество наблюдений, характеризующих каждое скрытое состояние;  $b_1, b_2, \dots, b_L$  –  $L$ -мерная плотность вероятности распределения системы наблюдаемых величин  $y^1, y^2, \dots, y^L$  для  $i$ -го скрытого состояния;  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  – скрытые состояния, характеризующие основной процесс;  $\pi$  – вектор начального распределения вероятностей скрытых состояний.

### Процедура переоценки параметров модели СММ с разным числом компонент

Рассмотрим процедуру переоценки параметров модели СММ с многомерной функцией наблюдения  $\lambda^L = (A, \{b_1, b_2, \dots, b_L\}, \pi)$ . Дана последовательность наблюдений  $O^L = (o_1^l, o_2^l, \dots, o_T^l)$ , где  $L$  – число наблюдаемых параметров. Необходимо подстроить параметры модели  $(A, \{b_1, b_2, \dots, b_L\}, \pi)$  таким образом, чтобы максимизировать вероятность  $P(O^L / \lambda^L)$  появления этой последовательности наблюдений для модели  $\lambda^L$ . Запишем функцию правдоподобия, в которой наблюдения представлены смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент.

$$L(O^L / \lambda^L) = \sum_S a_{s_0} \prod_{t=1}^T \left[ a_{s_{t-1}} \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} \dots \sum_{k_L=1}^{K_L} \left( \prod_{i=1}^L \left( w_i^{l,k_i} ; \psi \left( y^l ; \mu_i^{l,k_i}, (\sigma_i^{l,k_i})^2 \right) \right) \right) \right]. \quad (1)$$

В соответствии с работой Л.Р. Рабинера [3] не существует известного аналитического метода, позволяющего решить оптимизационную задачу аналогичную представленной выражением (1) и найти глобальный максимум. Поэтому в этой же работе [3] предлагается использовать итеративную процедуру Баума-Уэлча максимизирующую вероятность  $P(O^L / \lambda^L)$ . Тогда суть метода оценивания заключается в итеративном перерасчете параметров исходной модели  $\lambda^L$  на основе многомерных наблюдений, представленных смесью нормальных распределений с разным числом компонент. На практике получить параметры модели возможно посредством выражений для прямой и обратной индукции, представленных в работах Баума. Введем прямую и обратные переменные  $\alpha_t(j)$ ,  $\beta_t(j)$  для многомерного случая. Здесь  $j = 1, \dots, S$  представляет собой индекс по скрытым состояниям. Представим функцию правдоподобия от  $\vec{O}_{t+1}, \dots, \vec{O}_T$  при условии, что скрытое состояние  $S_t = j$  независимо от предыдущих наблюдений  $\vec{O}_1, \dots, \vec{O}_t$  через вспомогательные переменные

$$L_{\lambda^L}(\vec{O}, S_t = j) = \alpha_t(j) \beta_t(j).$$

Здесь

$$\alpha_t(j) \square L_{\lambda^L}(\vec{o}_1, \dots, \vec{o}_t, S_t = j),$$

$$\beta_t(j) \square L_{\lambda^L}(\vec{o}_{t+1}, \dots, \vec{o}_T / S_t = j).$$

Так как вспомогательная переменная  $\alpha_i(j)$  связывает текущее по времени состояние со следующим, запишем  $\alpha_i(j) = \sum_{i=1}^S L_{\lambda^L}(\vec{o}_1, \dots, \vec{o}_i, S_i = j, S_{i-1} = i)$ . Исходя из этого перепишем функцию правдоподобия  $L_{\lambda^L}(\vec{o}_1, \dots, \vec{o}_i, S_i = j, S_{i-1} = i) = \alpha_{i-1}(i) \beta_j(\vec{O}_i) \cdot a_{ij}$ . Поэтому,

$$\alpha_i(j) = \left( \sum_{i=1}^S \alpha_{i-1}(i) \cdot a_{ij} \right) \cdot B_i(o_{i+1}^1, o_{i+1}^2, \dots, o_{i+1}^L), \tag{2}$$

аналогично

$$\beta_i(j) = \left( \sum_{j=1}^S \beta_{i+1}(j) \cdot a_{ji} \right) \cdot B_j(o_{i+1}^1, o_{i+1}^2, \dots, o_{i+1}^L). \tag{3}$$

Выражения (2, 3) представляют собой вспомогательные прямую и обратную переменные для многомерных наблюдений плотность вероятности которых представлена смесью многомерных нормальных распределений с разным числом компонент.

Остановимся более детально на рассмотрении вспомогательной функции (1). Классический алгоритм Баума-Уэлча, использующий вспомогательную функцию, сталкивается с трудностью, когда ФРПВ  $B(Y)$  не является логарифмически вогнутой. Как следствие вспомогательная функция в этом случае не в состоянии быть унимодальной (одномодовой, одновершинной). В работе [4] доказаны теоремы о единственности глобального максимума и наличии критической точки при использовании в качестве  $B(Y)$  эллиптически симметричной плотности распределения, выраженной в виде непрерывной выпуклой комбинации связанных гауссовских плотностей. В дополнение работа [5] содержит теорему о единственности глобального максимума  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L)$  в случае, когда функция  $B(Y)$ , представлена смесью эллиптических симметричных плотностей. По аналогии с работой [5] наблюдения представлены непрерывной выпуклой комбинаций, связанных Гауссовских плотностей, но с разным числом компонент. В этом случае выполняются условия о единственности глобального максимума функции  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L)$ , где  $\bar{\lambda}^L$  – СММ с новыми параметрами  $(A', \{b'_1, b'_2, \dots, b'_L\}, \pi')$ . Для решения оптимизационной задачи и расчета параметров  $(A', \{b'_1, b'_2, \dots, b'_L\}, \pi')$  используя расстояние Кульбака-Лейблера запишем

$$Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L) = \sum_S \left( P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \cdot \log P(S, O^1, O^2, \dots, O^L | \bar{\lambda}^L) \right). \tag{4}$$

Тогда из выражения (4) следует, что

$$\frac{Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L) - Q(\lambda^L, \lambda^L)}{P(O^1, O^2, \dots, O^L / \lambda^L)} \leq \log \frac{P(O^1, O^2, \dots, O^L / \bar{\lambda}^L)}{P(O^1, O^2, \dots, O^L / \lambda^L)}. \tag{5}$$

Если  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L) > Q(\lambda^L, \lambda^L)$ , то  $0 \leq \log \frac{P(O^1, O^2, \dots, O^L / \bar{\lambda}^L)}{P(O^1, O^2, \dots, O^L / \lambda^L)}$ , следовательно

$P(O^1, O^2, \dots, O^L / \bar{\lambda}^L) > P(O^1, O^2, \dots, O^L / \lambda^L)$ . Значит, максимизируя функцию  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L)$  по  $\bar{\lambda}^L$ , будем двигаться в нужную сторону. Перепишем выражение (4)

$$\begin{aligned} Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L) &= \\ &= \sum_S \left( P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \cdot \log P(S, O^1, O^2, \dots, O^L | \bar{\lambda}^L) \right) = \\ &= \sum_S \left( P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \cdot \log \pi_{s1} \cdot \prod_i a_{s_{i-1}, s_i} B_{s_i}(o_i^1, o_i^2, \dots, o_i^L) \right) = \\ &= \sum_S P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \cdot \log \pi_{s1} + \sum_S P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \times \\ &\times \sum_i \log a_{s_{i-1}, s_i} + \sum_S P(S | O^1, O^2, \dots, O^L, \lambda^L) \cdot \sum_i \log B_{s_i}(o_i^1, o_i^2, \dots, o_i^L). \end{aligned} \tag{6}$$

Поскольку параметры  $(a_{ij}, \{b_1, b_2, \dots, b_L\}, \pi)$ , по которым выполняется оптимизация, независимо входят в каждое из трех слагаемых, то выражение для  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L)$  оптимизируем по отдельности для каждого из этих слагаемых.

Запишем результирующие выражения.

Выражение для перерасчета значений вектора  $\pi$ :

$$\bar{\pi}_i = \sum_{j=1}^N \frac{\alpha_1(i) \cdot a_{ij} \cdot \beta_2(j) \cdot B_j(o_2^1, o_2^2, \dots, o_2^L)}{P(O^1, O^2, \dots, O^L | \lambda^L)}. \quad (7)$$

Выражение для перерасчета элементов матрицы  $A$ :

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t(i) \cdot a_{ij} \cdot \beta_{t+1}(j) \cdot B_j(o_{t+1}^1, o_{t+1}^2, \dots, o_{t+1}^L)}{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{p=1}^N \alpha_t(i) \cdot a_{ip} \cdot \beta_{t+1}(p) \cdot B_p(o_{t+1}^1, o_{t+1}^2, \dots, o_{t+1}^L)}. \quad (8)$$

Многомерную ФРПВ  $B_i(Y^{LK_L})$  согласно введённых допущений о «наивности» отдельных компонент смеси представим вектором средних  $\bar{\mu}_i^{l, k_l}(k_1, k_2, \dots, k_L)$  и вектором дисперсий  $\bar{d}_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$ , определяемых набором  $(k_1, k_2, \dots, k_L)$ , для  $i$ -го скрытого состояния и весовыми коэффициентами компонент. Для получения значений данных векторов введем вспомогательную переменную  $\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)$ . Пусть  $\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)$  – это вероятность пребывания модели  $\lambda^L$  в момент времени  $t$  в скрытом состоянии  $S_t = x_i$  при условии заданного множества последовательностей наблюдений  $O = \{O^1, O^2, \dots, O^L\}$ , причем наблюдаемый в этот момент времени вектор  $(o_t^1, o_t^2, \dots, o_t^L)$  порожден  $L$ -мерной компонентой  $\Psi_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$  плотности распределения  $B_i$ , определяемой  $k$ -ми  $(k_1, k_2, \dots, k_L)$  компонентами одномерных плотностей распределения наблюдений.

На основании выражения для одномерного случая, представленного в [3] запишем  $\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)$

$$\begin{aligned} \gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L) &= \\ &= \frac{\alpha_t(i) \cdot \beta_t(i)}{\sum_{j=1}^N \alpha_t(j) \cdot \beta_t(j)} \cdot \frac{W_i(k_1, k_2, \dots, k_L) \cdot \Psi_i(k_1, k_2, \dots, k_L)}{\sum_{q_1=1}^{K_1} \sum_{q_2=1}^{K_2} \dots \sum_{q_L=1}^{K_L} W_i(q_1, q_2, \dots, q_L) \cdot \Psi_i(q_1, q_2, \dots, q_L)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения прямой  $\alpha_t(i)$  и обратной  $\beta_t(i)$  переменных в (7), (7), (9) вычисляются в соответствии с выражениями (2), (3).

Формулы перерасчета вектора средних  $\bar{\mu}_i^{l, k_l}(k_1, k_2, \dots, k_L)$  и вектора дисперсий  $\bar{d}_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$  при использовании обобщенной вспомогательной переменной  $\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)$  имеют вид:

$$\bar{\mu}_i^{l, k_l}(k_1, k_2, \dots, k_L) = \frac{\sum_{t=1}^T (\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L) \cdot o_t^l)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)}. \quad (10)$$

$$\bar{d}_i(k_1, k_2, \dots, k_L) = \frac{\sum_{t=1}^T (\gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L) \cdot (o_t^l - \mu_i^{l, k_l}) \cdot (o_t^l - \mu_i^{l, k_l})^T)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)}. \quad (11)$$

Весовой коэффициент компоненты  $L$ -мерной плотности распределения  $W_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$  равен произведению весовых коэффициентов соответствующих компонент одномерных плотностей  $w_i^{j, k_j}$ :

$$W_i(k_1, k_2, \dots, k_L) = \prod_{l=1}^L w_i^{l, k_l}. \quad (12)$$

Поэтому для подстройки весового коэффициента  $W_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$  необходимо произвести перерасчет соответствующих весовых коэффициентов одномерных плотностей  $w_i^{j, k_j}$ , а результат перемножить. Выражение для подстройки весового коэффициента  $W_i(k_1, k_2, \dots, k_L)$  компоненты  $L$ -мерной плотности распределения примет следующий вид:

$$\bar{W}_i(k_1, k_2, \dots, k_L) = \prod_{l=1}^L \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)}{\sum_{t=1}^T \sum_{k_l} \gamma_t(i, k_1, k_2, \dots, k_L)}. \quad (13)$$

Полученные выражения (10), (11), (13) осуществляют перерасчет  $L$ -мерных плотностей распределений  $B_i(Y^{LK_L})$  для каждого  $i$ -го скрытого состояния.

Таким образом, выражения (7), (8), (10), (11), (13) позволяют произвести подстройку параметров модели  $\lambda^L$ .

### Заключение

В статье для корректного решения задачи идентификации параметров СММ  $\lambda^L = (A, \{b_1, b_2, \dots, b_N\}, \pi)$  при представлении ее многомерной ФРПФ  $B_i(y^1, y^2, \dots, y^L)$  сформирована функция правдоподобия  $Q(\lambda, \bar{\lambda})$ , характеризующая текущие и новые параметры модели. Представление функции правдоподобия  $Q(\lambda^L, \bar{\lambda}^L)$  в виде суммы трех независимых параметров позволило получить итоговые выражения для расчета параметров модели  $\lambda^L = (A, \{b_1, b_2, \dots, b_N\}, \pi)$ . Предложенный метод, использующий несколько наблюдаемых второстепенных процессов, протекающих в МСС, позволяет получить на более коротком интервале наблюдения эффективные оценки основного процесса.

### Литература

1. Zhang F., Wu W. A Network Traffic Classification based on Coupled Hidden Markov Models. State Key Laboratory of Software Development School of Computer Science, Beihang University. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM). Pp. 1–6, 8.08. 2008.
2. Dainotti A. et al. Internet traffic modeling by means of Hidden Markov Models. Computer Networks. 2008. Т. 52. No. 14. P. 2645-2662.
3. Rabiner L. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE. 1989. Т. 77. No. 2. P. 257-286;
4. Louis A. Liporace. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources. IEEE transactions on information theory, Vol. IT-28, No. 5, September 1982, pp. 729-734.
5. B.-H. Juang. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains. AT&T Technical Journal, Vol. 64, No. 6, July-August 1985, pp. 1235-1248.

### References

1. Zhang F., Wu W. A Network Traffic Classification based on Coupled Hidden Markov Models. State Key Laboratory of Software Development School of Computer Science, Beihang University. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM). Pp. 1–6, 8.08. 2008.
2. Dainotti A. et al. Internet traffic modeling by means of Hidden Markov Models. Computer Networks. 2008. Т. 52. No. 14. P. 2645-2662.

3. Rabiner L. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE. 1989. T. 77. No. 2. P. 257-286;

4. Louis A. Liporace. Maximum Likelihood Estimation for Multivariable Observations of Markov Sources. IEEE transactions on information theory, Vol. IT-28, No. 5, September 1982, pp. 729-734.

5. B.-H. Juang. Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariable Stochastic Observations of Markov Chains. AT&T Technical Journal, Vol. 64, No. 6, July-August 1985, pp. 1235-1248.

Статья поступила 09 сентября 2021 г.

#### Информация об авторах

Крюков Олег Витальевич – Кандидат технических наук, доцент. ФГКВБОУ ВО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, сотрудник. Область научных интересов: сетевые технологии, современные системы и сети передачи данных, обеспечение информационной безопасности сетевого взаимодействия. Тел.: +7 4862549838. E-mail: oleghooker@gmail.com.

Баранов Владимир Александрович – Доктор технических наук, доцент. ФГКВБОУ ВО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, сотрудник. Область научных интересов: сетевые технологии, современные системы и сети передачи данных, обеспечение информационной безопасности сетевого взаимодействия. Тел.: +7 9606426946. E-mail: baranovva@mail.com.

Адрес: 302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35.

#### Method for estimating the values of the traffic class generated by the source of a multiservice communication network on a limited observation interval

O.V. Kriukov, V.A. Baranov

**Annotation:** The article deals with the issues of obtaining estimates of the main unobservable process occurring in the multiservice communication network (MCN) based on the analysis of secondary observable processes. For this, the apparatus of hidden Markov models (HMM) was used. The novelty of the solution lies in the use of a set of secondary features, represented by a multidimensional probability density distribution function that characterizes the observed processes in the MSS, which makes it possible to increase the observability of the main process. In this work, expressions are obtained that make it possible to reevaluate the parameters of the HMM model with a multidimensional observation function representing a mixture of normal distributions with different numbers of components.

**Keywords:** multiservice communication network, hidden Markov model, multidimensional random observations, Gaussian distribution density.

#### Information about Authors

Oleg Vitalievich Kryukov – Candidate of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, staff member. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel.: +7 486 254 98 38. E-mail: oleghooker@gmail.com.

Vladimir Alexandrovich Baranov – Doctor of technical sciences, assistant professor. Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, employee. His research interests include network technologies, modern telecommunications systems and networks, network communications information security. Tel.: +7 960 642 69 46. E-mail: baranovva@mail.com.

Address: 302034, Russian Federation, Orel, Priborostroitelnaya str., 35.

**Для цитирования:** Крюков О.В., Баранов В.А. Метод оценивания значений класса трафика, формируемого источником мультисервисной сети связи на ограниченной интервале наблюдения // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 56-61.

**For citation:** Kriukov O.V., Baranov V.A. Method for estimating the values of the traffic class generated by the source of a multiservice communication network on a limited observation interval. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 56-61 (in Russian).

**ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

УДК 621.376.9, 004.942, 519.876.5

**Использование FBMC/OQAM в пакетном радиомодеме коротковолнового диапазона**

Шапгала В.С.

**Аннотация.** Современная элементная база позволяет реализовывать вычислительно сложные алгоритмы обработки сигналов. Особенно это заметно на примере развития сотовых систем связи. В этом случае часто допускается нарушение ортогональности при мультиплексировании сигналов, что позволяет повысить пропускную способность системы связи без существенного ухудшения её помехоустойчивости. В статье ставится задача оценки эффективности применения мультиплексирования сигналов, разделённых по частоте с нарушением ортогональности, в пакетных радиомодемах коротковолнового диапазона. **Целью работы** является создание модели передающей и приёмной части радиомодема без системы синхронизации и помехоустойчивого кодирования. При моделировании использовались **методы** цифровой обработки сигналов и теории связи. **Новизна** решения состоит в сопоставлении двух способов формирования и приёма сигнала: в частотной или временной областях. **К результатам работы** следует отнести создание модели, которая реализована в виде объектно-ориентированного кода и функционирует в вычислительной среде технических расчётов MATLAB. **Практическая значимость** работы заключается в том, что определены границы применимости рассмотренного принципа мультиплексирования для использования в радиомодемах КВ диапазона. Полученный код может быть использован при моделировании и создании перспективных систем связи.

**Ключевые слова:** модуляция, Filter Bank Multi Carrier, Orthogonal frequency-division multiplexing, помехоустойчивость.

**Введение**

Технология FBMC (Filter Bank Multi Carrier, метод частотного мультиплексирования с множеством несущих, использующий гребёнку фильтров) часто обсуждается в контексте развития сетей сотовой связи, поэтому крупные телекоммуникационные институты (3GPP, ITU, 5GPPP и т. д.) и корпорации (Samsung, Qualcomm, Huawei и т. д.) используют её в своих предложениях на профильных комитетах и при построении своего перспективного телекоммуникационного оборудования. Конкуренция между коллективами приводит к тому, что ясного описания FBMC в открытых источниках не так много, как, например, OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов).

В статье FBMC будет рассмотрена совместно с OQAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation, квадратурная амплитудная модуляция со смещением) в контексте разработки радиомодемов коротковолнового (КВ) диапазона. Хорошее представление об FBMC/OQAM можно получить из [1], а один из примеров реализации доступен в составе системы технических расчётов MATLAB [2]. Несмотря на то, что скорости передачи в современных системах сотовой связи (LTE, 5G) и системах КВ радиосвязи несопоставимы – принципы построения аппаратуры могут совпадать и обеспечивать эффективную работу в определённых режимах.

**Два способа реализации FBMC/OQAM**

Как и для многих алгоритмов цифровой обработки сигналов рассматриваемую модуляцию можно реализовать либо в частотной, либо во временной области. Частотная область подразумевает использование интерполяции. Сигнал с повышенной частотой дискретизации сглаживается фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которых представлена на рис. 1.

Коэффициенты КИХ фильтров выбраны таким образом, что они обеспечивают линейную фаза-частотную характеристику [3]. Коэффициент интерполяции  $K$  может принимать значение 2, 3 или 4. При увеличении этого коэффициента увеличивается длительность единичного элемента сигнала и его перекрытие с соседними посылками. Этот же коэффициент определяет перекрытие между соседними элементами сигнала.

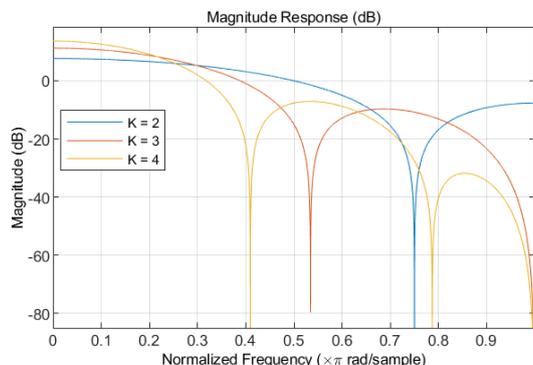


Рис. 1. АЧХ КИХ фильтров в основной полосе частот

Временная область подразумевает использование оконных функций в виде приподнятого косинуса (*raised cosine*) см. рис. 2. Важно обратить внимание на то, что эти два способа эквивалентны.

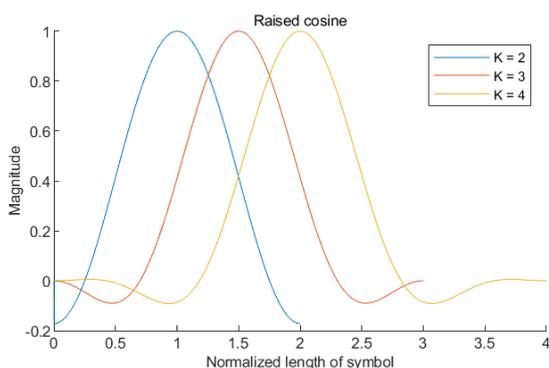


Рис. 2. Оконные функции

Структурная схема работы передающей и приёмной части рассматриваемой модуляции представлена на рис. 3 и рис. 4.

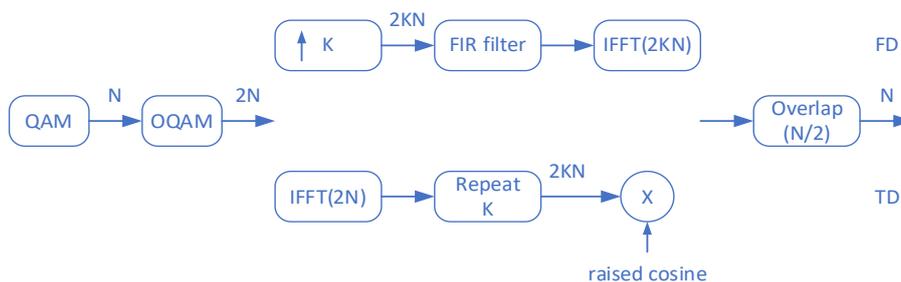


Рис. 3. Модулятор *FBMC/OQAM*

На структурных схемах используются следующие обозначения: *FD* (*frequency domain*, представление сигнала в частотной области), *TD* (*time domain*, представление сигнала во временной области), *FIR* (*finite impulse response*, КИХ фильтр), *FFT* (*fast Fourier transform*, прямое быстрое преобразование Фурье), *IFFT* (*inverse FFT*, обратное быстрое преобразование Фурье), *Overlap* – сложение сигнала с перекрытием на  $N/2$  отсчётов,  $N$  – длительность единичного элемента сигнала в отсчётах, *Repeat* – повторение сигнала указанное количество раз, *Sum* – сложение последовательных отрезков сигнала указанное количество раз.

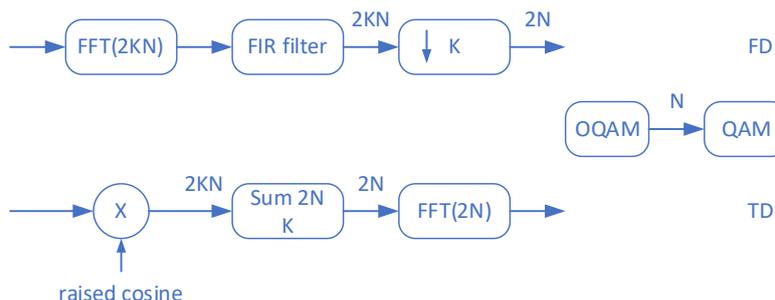


Рис. 4. Демодулятор *FBMC/OQAM*

На рис. 5 схематически показано сложение сигнала с перекрытием, на котором видна последовательность передачи синфазной и квадратурной составляющей *OQAM* сигнала. Огибающая сигнала изображена без заполнения. Синфазная и квадратурная составляющие передаются одновременно на разных частотных подканалах, перекрываясь последующими и предыдущими посылками. Последовательная смена знака огибающей сделана только для более различимой визуализации, в действительности необходимости в этом нет.

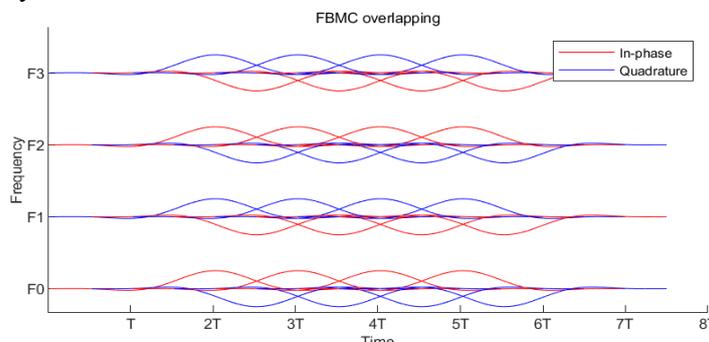


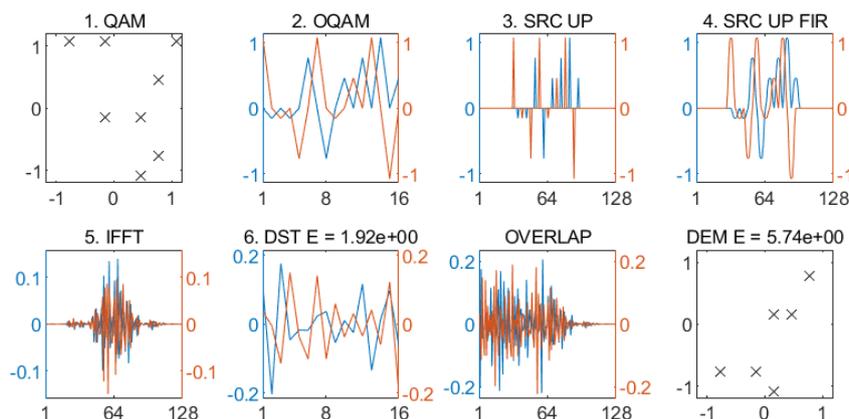
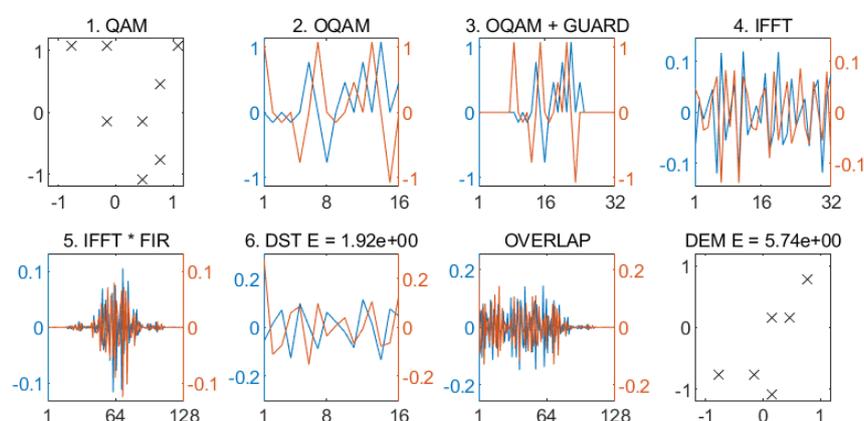
Рис. 5. Сложение сигнала с перекрытием в *FBMC/OQAM*,  $K = 4$

### Моделирование

Рис. 6 и 7 дают графическое представление о работе передающей части *FBMC/OQAM*. Для моделирования используется система технических расчетов *MATLAB*. Функции модулятора и демодулятора реализованы в составе одного класса. Выбор между *FD* и *TD* происходит по полю класса в режиме реального времени. Есть возможность включить/отключить графическую визуализацию. С точки зрения объектно-ориентированного программирования решение состоит из родительского класса *@nofdm* от которого наследуются два класса *@nofdm\_fbmc* и *@nofdm\_ofdm*. В классе *@nofdm\_fbmc* находятся две разных реализации *FBMC/OQAM*, а в классе *@nofdm\_ofdm* классическая реализация *OFDM* для сопоставления полученных результатов.

При моделировании использовались *QAM-64*,  $K = 4$ ,  $N = 16$  и 8 каналов защитный интервал с каждой стороны. Созвездие на графике *QAM* отличается от созвездия на графике *DEM*, потому что в *FBMC* присутствует задержка восстановления данных. На первом и последнем графике показаны сигнальные созвездия на комплексной плоскости, а на всех остальных – отдельно вещественная (синфазная) и мнимая (квадратурная) составляющие сигнала в промежуточных точках.

*QAM* – исходное созвездие 8 точек. *OQAM* – 8 комплексных точек превращаются в 16 комплексных точек, которые всегда или только вещественные или только мнимые. *SRC UP* – добавляется 8 защитных каналов с каждой стороны и получившийся сигнал интерполируется нулями в  $K$  раз. *SRC UP FIR* – сигнал сглаженный фильтром. *IFFT* – сигнал во временной области после обратного преобразования Фурье. *DST* – сигнал который будет добавляться в циклический буфер с перекрытием на  $N/2$  отсчётов. *OVERLAP* – циклический буфер, *DEM* – сигнал восстановленный в демодуляторе.

Рис. 6. Передатчик *FBMC/OQAM* в *FD*Рис. 7. Передатчик *FBMC/OQAM* в *TD*

*OQAM + GUARD* – добавление защитного интервала с каждой стороны. *IFFT \* FIR* – сигнал после обратного преобразования Фурье повторен  $K$  раз и умножен на окно вида приподнятый косинус.

В графическом представлении приёмной части нет необходимости, поскольку там всё происходит в обратной последовательности, но важно обратить внимание на то, что несмотря на совпадение энергии сигнала и точек созвездия на графике *DEM* совместимость между реализациями в *FD* и *TD* не обеспечивается.

Программная реализация рассматриваемой технологии позволяет управлять размерностью созвездия *QAM*. Проведенное моделирование помехоустойчивости для созвездий с количеством точек 4, 16, 64 и 256 в канале с аддитивным белым Гауссовским шумом показало, что кривые вероятности битовой ошибки технологий *OFDM* и *FBMC/OQAM* совпадают.

### Выводы

Рассматриваемое решение существенно повышает вычислительную сложность алгоритма модулятора и демодулятора, но позволяет избавиться от защитного интервала, что приводит к повышению скорости передачи. Например, при построении КВ модемов защитный интервал может достигать 25 % от полезной длительности единичного элемента сигнала и повышение скорости на эту величину является отличным результатом.

Главным недостатком этого способа является увеличение длительности посылки в  $K$  раз и появление межсимвольной интерференции, поэтому этот режим нецелесообразно применять в пакетных модемах, которые работают в режиме последовательного расширения спектра сигнала с малым временем излучения на одной рабочей частоте.

## Литература

3. Saeed Afrasiabi-Gorgani, An Introduction to OFDM-OQAM 2nd Edition Ph.D. candidate Technische Universit at Berlin July 27, 2017 URL: [https://www.researchgate.net/publication/264230812\\_An\\_introduction\\_to\\_OFDMOQAM\\_FBMC](https://www.researchgate.net/publication/264230812_An_introduction_to_OFDMOQAM_FBMC) (дата обращения 09.08.2021).
4. FBMC vs. OFDM Modulation URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/examples/fbmc-vs-ofdm-modulation.html> (дата обращения 09.08.2021).
5. Шаптала В.С., Ланнэ А.А. Нерекурсивные цифровые фильтры с симметричными характеристиками // Радиотехника. 2003. № 4. С. 59-64.

## References

1. Saeed Afrasiabi-Gorgani, An Introduction to OFDM-OQAM 2nd Edition Ph.D. candidate Technische Universit at Berlin July 27, 2017 URL: [https://www.researchgate.net/publication/264230812\\_An\\_introduction\\_to\\_OFDMOQAM\\_FBMC](https://www.researchgate.net/publication/264230812_An_introduction_to_OFDMOQAM_FBMC) (accessed 09 Aug. 2021).
2. FBMC vs. OFDM Modulation URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/examples/fbmc-vs-ofdm-modulation.html> (accessed 09 Aug. 2021)
3. Shaptala V.S., Lanne A.A. Nonrecursive Digital Filters with Symmetric Characteristics. Radio Engineering. 2003. No. 4. Pp. 59-64 (in Russian).

Статья поступила 15 сентября 2021 г.

## Информация об авторе

Шаптала Василий Сергеевич – Начальник лаборатории ПАО «Интелтех», кандидат технических наук. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в телекоммуникационных системах. Тел. 8(812)448-19-01. E-mail: shaptalavs@inteltech.ru.

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

## FBMS/OQAM usage in packet radio modem for HF range

V.S. Shaptala

**Annotation.** *The modern hardware components and microprocessor technology allows to implement of hard computational algorithms of signal processing. It is particularly evident in the development of cellular communication systems. The future-oriented communication systems often allow non-orthogonal multiplexing of signals, which increases their bandwidth without significant degradation of bit error rate. The article aims to consider a method of encoding digital data on multiple carrier frequencies with non-orthogonal intervals between frequency of sub-carriers in a packet radio modem for HF range. The main goal of this work is to create a model of the transmitting and receiving part of the radio modem without synchronization systems and error-correcting codes. In modeling, methods of communication theory and digital signal processing are used. The novelty of the solution is to compare two ways of development of modulator and demodulator: in the frequency or time domain. The result of the work is a model of FBMS/OQAM, which runs in MATLAB. The practical significance of the work is to define the applicability limits of the considered multiplexing system in radio modems of the short-waves band. The proposed source code could be used for modeling and creating advanced communication systems.*

**Keywords:** *modulation, Filter Bank Multi Carrier, Orthogonal frequency-division multiplexing, bit error rate.*

## Information about Author

Vasily Sergeevich Shaptala – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of laboratory PJSC “Inteltech”. Scientific interests: digital signal processing in telecommunication systems. Tel. 8 (812) 448-19-01. E-mail: shaptalavs@inteltech.ru.

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

**Для цитирования:** Шаптала В.С. Использование FBMC/OQAM в пакетном радиомодеме коротковолнового диапазона // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 62-66.

**For citation:** Shaptala V.S. FBMS/OQAM usage in packet radio modem for HF range. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 62-66 (in Russian).

**ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 004.4.24

**Анализ способов некриптографической защиты информации от побочных электромагнитных излучений и наводок на объектах связи**

Кулешов И.А., Спивак А.И., Львов А.Е.

*Аннотация.* Система способов некриптографической защиты информации, используемых в настоящее время на объектах связи, складывалась на протяжении нескольких десятилетий. Концептуальную основу этих способов защиты составляет принцип энергетического подавления опасного сигнала. Его реализация может быть осуществлена за счет уменьшения энергии сигнала в канале утечки, либо увеличением мощности шума (помехи) в нем.

*Ключевые слова:* некриптографическая защита, помехи, электромагнитные излучения.

Научно-методический аппарат, используемый для оценки защищенности информации, базируется на теории передачи сигналов [1, 2], теории информации [3, 4], теории электромагнитного поля [5] и других разделах фундаментальной науки. Особенности этого аппарата непосредственно для оценки защищенности информации по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) содержатся в [6].

Способы некриптографической защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН и реализующие их системы защиты принято разделять на пассивные и активные. К пассивным способам относят экранирование, фильтрацию, другие схемотехнические решения. К активным способам относят зашумление (маскирование) опасных сигналов помехами различных классов. Формально к пассивным способам будем причислять и организационно-техническую меру – ограничение доступа на территорию объекта, где установлен терминал.

Проведем краткий анализ традиционно используемых способов, обратив внимание на удовлетворение ими прагматических целей защиты.

*А) Ограничение доступа на территорию объекта, где установлен терминал (зона доступа)*

Способ основан на факте убывания напряженности поля по мере удаления от источника излучения. Размер контролируемой зоны выбирается исходя из выполнения соотношения по предельно допустимому отношению сигнал/шум в канале утечки.

Размер зоны зависит от источника ПЭМИН, скорости убывания электромагнитного поля и величины предельно допустимого отношения сигнал/шум в канале утечки.

Размеры зоны особенно велики для некоторых устройств электронно-вычислительной техники (мониторы на основе электронно-лучевых трубок, принтеры) и неэкранированных кабелей. Реальное обеспечение контролируемой зоны затруднительно и не всегда выполнимо, особенно в условиях расположения объекта среди множества офисов. Важно учесть расстояние от источника ПЭМИН до случайной антенны, имеющей выход за пределы зоны. Для линий связи размер зоны зависит от длины совместного пробега линии, по которой передаются сигналы с любой другой линией, имеющей выход за пределы зоны, а также от взаимного расстояния между ними. Эти обстоятельства зачастую накладывают жесткие ограничения на правила монтажа оборудования и аппаратуры на объектах связи и в конечном итоге приводят к дополнительным материальным и эксплуатационным затратам [6].

Положительной стороной способа обеспечения заданного размера зоны является универсальность, поскольку все остальные способы, в том числе и перспективные, могут лишь уменьшать ее размер, но не исключают полностью ее наличия. В целом из результатов исследования величин опасных сигналов электронно-вычислительной техники и линий связи

следует, что без дополнительной технической защиты размеры зоны оказываются больше нескольких метров (десятков метров).

#### *Б) Экранирование*

Экранирование представляет конструктивное средство, локализованное в пределах определенного пространства. Теория электромагнитного экранирования развита достаточно полно [6], что обусловлено в первую очередь необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств. Этот может быть использовано и для решения задач экранирования каналов ПЭМИН.

Не останавливаясь на вопросах теории экранирования, обратим внимание на сложность реализации этого способа на практике. Качество экранирования оценивается коэффициентом экранирования электрического и магнитного поля, который определяется как отношение амплитуды напряженности в какой-либо точке вне экранированной области к амплитуде напряженности поля в этой же точке, если бы экран отсутствовал [7]. Он зависит от диапазона частот, вида экранирующего материала толщины, технологических особенностей изготовления (наличия пайки, сварки, отверстий и т. п.).

В целом экранирование является одной из эффективных мер защиты информации от утечки по ПЭМИН, однако ему свойственны недостатки:

- высокая стоимость экранирующих материалов и работ, связанных с изготовлением экранирующих конструкций. В перспективе следует ожидать увеличение стоимости экранов в связи с повышением цен на цветные металлы

- ухудшение массогабаритных показателей электронно-вычислительных машин (ЭВМ), кабелей, чем ограничивается их применение;

- сложность осуществления автоматического контроля качества экранирования, что особенно важно если небольшие эксплуатационные нарушения могут привести к существенному уменьшению коэффициента экранирования.

#### *В) Фильтрация*

Фильтрация применяется для подавления высокочастотных наводок в цепях и проводах, выходящих за пределы зоны доступа. Специальные фильтры устанавливаются также в выходных интерфейсах основных технических средств, подключаемых к линиям с паразитными излучениями и наводками, из которых образуют канал утечки. Требование к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) фильтра может быть найдено из выражения для отношения сигнал/шум на входе оптимального приемника.

На качественном уровне назначение фильтра нижних частот (ФНЧ) можно объяснить следующим образом. Спектральная плотность шумов убывает при увеличении частот. Следовательно, на высоких частотах отношение сигнал/шум может увеличиться до недопустимо большой величины. Этого не произойдет при подавлении высокочастотных составляющих спектра сигнал фильтром с требуемыми характеристиками.

#### *Г) Электромагнитное зашумление*

Способ основан на создании дополнительной шумовой помехи, зашумляющей опасный сигнал. Различают пространственное, линейное, и зашумление цепей питания.

Цель пространственного зашумления – предотвратить перехват информации по электромагнитному полю. Защита при этом осуществляется путем создания поля помехи вокруг помещения, аппаратуры или линий (кабелей). Для создания пространственных «завес» применяют активные средства защиты.

Пространственное зашумление направлено на предотвращение съема информации из кабелей индуктивным способом и выполняется подключением генераторов шума к отдельным парам, не используемым для передачи информации.

Линейное зашумление применяется для защиты информации от перехвата по цепям и проводам, выходящим за пределы контролируемой зоны доступа. Опасный сигнал в этих цепях может появиться за счет:

– недостаточного переходного затухания между кабелями, передающими конфиденциальную информацию и кабелями, (линиями) имеющими выход за пределы контролируемой зоны доступа;

– воздействия на цепи, провода, вспомогательные технические средства (ВТС) низкочастотных электромагнитных полей основных технических средств (ОТС);

– наводок по цепям питания и заземления;

– акустоэлектрических преобразований в ВТС.

При линейном заявлении генератор шума (ГШ) включается непосредственно в линию, имеющую выход за пределы контролируемой зоны доступа.

Зашумление является одним из эффективнейших способов защиты и находит широкое применение на объектах обработки информации (ООИ).

К основным техническим характеристикам систем активной защиты относятся [6-8]:

– маскирующая способность;

– защищенность по отношению к методам селекции и компенсации;

– скрытность применения;

– соответствие требованиям ЭМС;

– простота технической реализации.

Маскирующая способность характеризует степень подавления приемника перехвата искусственной помехой. Количественной мерой ее эффективности – средняя вероятность ошибки при обработке одного символа (бита) информации.

Защищенность по отношению к методам селекции и компенсации характеризует возможность нарушителя отстраиваться от помех или осуществлять их компенсацию. Возможна пространственная, поляризационная, частотная и временная селекция.

Пространственная селекция обеспечивается антенной приемника нарушителя. Чем уже ее диаграмма направленности и меньше уровень лепестков, тем выше пространственная селекция. Поляризационная селекция основывается на различии поляризации принимаемых сигналов и помех, временная – на возможности различать и сигналы по временным параметрам.

Компенсация основывается на возможности образовать дополнительный канал приема только помехи, которая затем вычитается из принимаемой смеси сигнала и помехи.

Скрытность отражает способность системы активной защиты функционировать, не привлекая внимания к особо важным объектам.

Остальные характеристики в дополнительных пояснениях не нуждаются.

Подавляющее большинство используемых в настоящее время систем зашумления базируются на генераторах гауссовской помехи. Помеха обеспечивает хорошее маскирование и защищенность к селекции и компенсации.

Однако, заданный уровень защищенности достигается в этом случае за счет значительной мощности помехи. Например, при передаче сигнала в линии 0 дБ уровень помехи должен быть не менее 18 дБ [6, 7]. По этой причине такого вида помехи обладают скрытностью, их применение в ряде случаев создает трудности по ЭМС на объектах защиты. Кроме того, для защиты высокоскоростной цифровой информации требуются широкополосные генераторы шума, что создает дополнительные трудности реализационного плана. Наконец, пространственное зашумление абонентских соединительных линий приводит к дополнительному расходу емкости абонентской кабельной сети.

Технические характеристики средств активной защиты могут быть улучшены путем применения генераторов, формирующих помехи, максимально маскирующие сигнал. Теоретическое обоснование такого класса помех содержится в [9].

Ввиду сходства таких помех с информационными сигналами они получили название сигналоподобных. Эти помехи делаются также на прицельные и имитационные.

В [7, 8] произведена оценка эффективности обоих видов сигналоподобных помех. Там же показано, что использование ГШ прицельной помехи имеет преимущества перед ГШ

гауссовской помехи по всем показателям, кроме защищенности по методам компенсации помех. Эта характеристика определяется подобием сигнала и помехи и количественно выражается коэффициентом корреляции. Анализ показал, что величина коэффициента корреляции сигнала и помехи, передаваемых по парам симметричного кабеля небольшой длины составила величину большую, чем коэффициент корреляции сигнала и помехи, передаваемых по двум параллельно проложенным коаксиальным кабелям.

Именно сложность обеспечения коэффициента корреляции, близкого к единице, является главным недостатком систем активной защиты такого вида, что и ограничивает их реальное применение. Достаточно сложной технической проблемой является также формирование помех с числом градаций амплитуды больше двух. Это объясняется тем, что для создания многопозиционной помехи необходима более мощная элементная база, большие величины питающих напряжений.

В заключение отметим, что способ активной защиты, в особенности использующий гауссовские помехи, имеет недостаток, заключающийся в сложности автоматического контроля качества шумового сигнала.

#### *Д) Применение волоконно-оптических кабелей*

Волоконно-оптические кабели при хороших массогабаритных показателях выгодно отличаются от симметричных и коаксиальных кабелей по полосе частот, подверженности влиянию внешних помех, в том числе электромагнитного импульса (ЭМИ), и, что особенно важно, имеют малые ПЭМИН. Однако, утечка информации с кабеля возможна [7]. Способы съема могут быть разные: стравливание оболочки, изгиб или деформация волокна, вследствие воздействия акустического или высокочастотного поля и другие. В связи с этим проблема защиты информации от перехвата по ПЭМИН сохраняется для волоконно-оптических линий связи, но приобретает особенности. Поскольку во всех способах съема используется отвод части оптической мощности, защита информации может рассматриваться не как защита от перехвата ПЭМИН, а как защита от несанкционированного подключения. В такой постановке отпадает необходимость в обеспечении нужного размера контролируемой зоны доступа, актуализируется задача эффективного контроля за фактом подключения к линии. Такие решения могут быть найдены с помощью способа кодового зашумления [10].

#### *Е) Кодовое зашумление*

В 1975 году А. Вайнер ввел понятие канала с отводом как частного случая широкополосного канала с источником и двумя получателями [11], один из которых является нарушителем, и доказал теорему о возможности сколь угодно точной передачи информации законному пользователю при одновременном обеспечении защищенности информации относительно нарушителя.

Аналогично Шеннону, Вайнер предложил обеспечивать защиту в канале утечки не за счет уменьшения мощности передаваемого сигнала или увеличения мощности шума в точке перехвата, а за счет использования стохастического кодирования на передаче соответствующего декодирования на приеме. В этом заключается основная суть кодового зашумления (КЗ).

Вайнер предложил следующую модель. Если основной (канал между законными пользователями) не содержит помех, канал утечки – двоичный симметричный канал, Вайнером предложен способ кодирования в смежных классах линейного  $(n, n-k)$  кода  $V$ , при каждому информационному  $k$ -блоку ставится в однозначное соответствие один из смежных классов кода, а для передачи по каналу случайно и равновероятно выбирается слово в этом смежном классе. Декодирование на приеме осуществляется путем определения номера смежного класса, содержащего принятый  $k$ -блок. В канале утечки из-за наличия помех наиболее вероятен переход кодового блока в какой-либо другой смежный класс, что при декодировании вызывает дополнительное искажение (зашумление) информационного блока.

Наиболее полно исследован метод кодового зашумления в работах [10-14]. Однако существует проблема нахождения спектров весов смежных классов (СК) линейных кодов.

Точное вычисление параметров защищенности возможно только для кодов, у которых известны спектры весов их СК. В общем случае задача нахождения спектров СК не решена, и нахождение спектра весов произвольного кода относится к классу трудноразрешимых задач (*NP*-проблем).

Нахождение СК путем тотального перебора всех слов на ЭВМ ограничено их производительностью и для  $n > 20$  является вычислительно сложной задачей. Поиск кодов, для которых существуют конструктивные алгоритмы вычисления спектров СК, представляет большой теоретический и практический интерес.

Приведем перечень групповых двоичных кодов с известными СК.

1. Коды Хэмминга.
2. Коды ВЧХ, исправляющие двукратные ошибки.
3. Коды Голея: (23,24), (24,12).
4. Самодуальные коды.
5. Коды Рида-Маллера: (16,5), (32,6).
6. Некоторые симплексные коды.

Анализ способов построения спектров СК кодов показывает: в них нет единого подхода и для каждого кода разрабатывается индивидуальная методика нахождения спектров СК.

В целом проблема нахождения спектров СК линейных кодов далека от своего окончательного решения.

С другой стороны, использование при КЗ кодов с известными спектрами СК облегчает задачу нарушителя ввиду известности методики их нахождения или перебора всех возможных кодовых слов, что реально при сегодняшнем уровне развития ЭВТ.

#### *Ж) Метод ШИК*

Альтернативой способу кодового зашумления является применение блочного шифрования с известным ключом (ШИК). Метод ШИК основан на эффекте рассеивания влияния входных битов на биты выходного сообщения. Механизм защиты информации основан на хороших рассеивающих свойствах шифрующих преобразований, которые обуславливают эффективное размножение ошибок при дешифровании. Блочные шифрующие функции обеспечивают влияния каждого бита входного блока данных на все биты блока шифртекста. Дешифрующие функции обладают таким же свойством. Изменение произвольного бита в блоке шифртекста приводит к тому, что его дешифрование порождает блок данных, который с высокой вероятностью отличается от исходного сообщения. Данный эффект является характерным свойством блочных шифрующих и дешифрующих преобразований. Наличие помех в канале перехвата приводит к тому, что имеет место вероятность ошибки при приеме блока бит на выходе канала. Используя шифры, преобразующие блоки данных достаточно большого размера, можно получить требуемый уровень защищенности информации в канале перехвата при заданном значении вероятности ошибки в нем. Кроме этого, при использовании подобного бесключевого шифрования отпадает проблема генерации и распределения ключей. Данный эффект использован в работе. Безопасность метода основана на «искусственном» предположении о идеальных рассеивающих свойствах блочного шифра. Однако для проверки рассеивающих свойств блочных шифров их тестирование целесообразно проводить по методике, предложенной членами Нового Европейского Проекта по созданию базовых примитивов, имея в виду возможную будущую стандартизацию (*NESSIE, New European Schemes for Signature, Integrity and Encryption*). Одним из критериев тестирования является среднее число битов выхода, изменяющееся при изменении одного бита входного вектора. Эту проверку проходят не все шифры. Для метода ШИК ключи хранятся в общедоступном месте, что в совокупности со «слабостями» блочных шифров существенно уменьшают надежность защиты информации от ПЭМИН.

Подводя итог, отметим следующее. Существующие способы некриптографической защиты не в полной мере удовлетворяют потребностям практики. Это объясняется тем, что

способы требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат. Для многих из них затруднен автоматический контроль выполнения защитных функций в ходе эксплуатации. Использование кодового зашумления для защиты информации от ПЭМИН мало реализуется на практике, ввиду сложности поиска весов смежных классов кода. Использование кодов, для которых он известен, нецелесообразно ввиду того, что не обеспечивают требуемого на современном этапе уровня безопасности. Сказанное позволяет сделать вывод о настоятельной необходимости разработки новых способов некриптографической защиты информации, позволяющих в совокупности с традиционными решать задачи более гибко и рационально, при обеспечении достаточного уровня безопасности передаваемых сообщений.

### Литература

1. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М.: Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
2. Тихонов В.М. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 319 с.
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. Перевод с английского. – М.: Иностранная литература, 1963. – 829с.
4. Фано Р. Передача информации. – М.: Мир, 1965. – 438 с.
5. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
6. Соколов А. М., Степанюк О.М. Защита объектов и компьютерных сетей (Шпионские штучки). – М.: АСТ, СПб.: Полигон, 2000. – 272 с.
7. Каторин Ю.Ф. и др. Энциклопедия промышленного шпионажа. – СПб.: Полигон, 2000. 896 с.
8. Липатников В.А., Стародубцев Ю. И. Защита информации. – СПб.: ВУС. 2001. – 349 с.
9. Котоусов А.С. Фильтрация сигналов и компенсация помех. – М.: 1982. – 130 с.
10. Яковлев В.А. Защита информации на основе кодового зашумления. – СПб.: ВАС, 1993, ч. I. 245 с.
11. Wyner A. D. The Wire-Tap Channel // Bell System. Tech. J. 1975. V. 54. №8, p. 1355-1387.
12. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник. Под ред. Л.М. Финка. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
13. Коржик В.И. Помехоустойчивое кодирование «уникальных» сообщений // Проблемы передачи информации. 1986. Т. 22. С. 26-31.
14. Коржик В.И., Борисенко Н.П. Вычисление спектров смежных классов произвольных БЧХ-кодов // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26. № 4. С. 14-19.

### References

1. Kotelnikov V.A. Theory of potential noise immunity. Moscow: Gosenergoizdat, 1956. 151 p. (in Russian).
2. Tikhonov V.M. Optimal reception of signals. Moscow: Radio and communications, 1983. 319 p. (in Russian).
3. Shannon K. Work on the theory of information and cybernetics. Translation from English. Moscow: Foreign literature, 1963. 829 p. (in Russian).
4. Fano R. Transmission of information. Moscow: World, 1965. 438 p. (in Russian).
5. Shapiro D. N. Fundamentals of the theory of electromagnetic shielding. L. Energy, 1975. 112 p. (in Russian).
6. Sokolov A.M., Stepanyuk O.M. Protection of objects and computer networks (Spy things). Moscow: AST, St. Petersburg: Polygon, 2000. 272 p. (in Russian).
7. Katorin Yu.F. and others. Encyclopedia of industrial espionage. St. Petersburg: Polygon, 2000. 896 p. (in Russian).
8. Lipatnikov V.A., Starodubtsev Yu. I. Information protection. St. Petersburg: VUS. 2001. 349 p. (in Russian).
9. Kotousov A.S. Signal filtering and interference compensation. Moscow. 1982. 130 p. (in Russian).
10. Yakovlev V.A. Information protection based on code noise. St. Petersburg: YOU, 1993, Part I. 245 p. (in Russian).

11. Wyner A.D. The Wire-Tap Channel. Bell System. Tech. J. 1975. V. 54. №8. Pp. 1355-1387 (in Russian).
12. Calculation of noise immunity of discrete message transmission systems: Reference Book. Korzhik V.I., Fink L.M., Sklyklykunov K.N.: Ed. L.M.Finka. - M.: Radio and communications, 1981. 232 p. (in Russian).
13. Korzhik V.I. Noise-resistant coding of "unique" messages. Problems of information transfer. 1986. T.22. (in Russian).
14. Korzhik V.I., Borisenko N.P. Calculation of spectra of adjacent classes of arbitrary BCH codes. Izv. Universities. Radio electronics (in Russian).

Статья поступила 21 сентября 2021 г.

#### Информация об авторах

Кулешов Игорь Александрович – Доктор технических наук, доцент. Заместитель генерального директора по научной работе, ПАО «Интелтех». Тел.: (812)542-90-54. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru.

Спивак Андрей Игоревич – Начальник отдела Центра защиты Государственной тайны НЦУО МО РФ. Тел.: +7(812) 313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Львов Андрей Евгеньевич – Начальник отдела Спецсвязи ФСО России. Тел.: +7(812)313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

#### Analysis of methods of non-cryptographic protection against PEMIN at facilities

I.A. Kuleshov, A.I. Spivak, A.E. L'vov

**Annotation.** *The system of non-cryptographic protection methods currently used has developed over several decades. The conceptual basis of these protection methods is the principle of energy suppression of a dangerous signal, implementation can be carried out either by reducing the signal energy in the leakage channel or by increasing the noise power (interference) in it.*

**Keywords:** *noncryptographic protection, interference, electromagnetic radiation.*

#### Information about Authors

Igor Aleksandrovich Kuleshov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy General Director for Research, PJSC "Inteltech". Address: St. Petersburg, Kantemirovskaya Street, 8. Tel. +7 (812)542-90-54. E-mail: KuleshovIA@inteltech.ru.

Andrey Igorevich Spivak – Head of the Department of the Center for the Protection of State Secrets of the NCUO of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Tel.: +7(812)313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

Andrey Evgen'evich L'vov – Head of the Special Communications Department of the FSO of Russia. Tel.: +7 (812) 313-12-51. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

**Для цитирования:** Кулешов И.А., Спивак А.И., Львов А.Е. Анализ способов некриптографической защиты информации от побочных электромагнитных излучений и наводок на объектах связи // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 67-73.

**For citation:** Kuleshov I.A., Spivak A.I., L'vov A.E. Analysis of methods of non-cryptographic protection against PEMIN at facilities. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 67-73 (in Russian).

УДК 623.624

**Постановка задачи на разработку методики достижения выигрыша телекоммуникационной системы в трехстороннем динамическом информационном конфликте**

Мамончикова А.С.

**Аннотация.** *Постановка задачи:* на основе анализа известных на сегодняшний день работ в области информационного конфликта (в частности, динамического информационного конфликта), можно сделать вывод о том, что существует необходимость выработки стратегий в трехстороннем динамическом информационном конфликте, обеспечивающих достижение выигрыша телекоммуникационной системы в условиях интегрального воздействия на нее средств дестабилизирующих воздействий и технических средств разведки. **Используемые методы:** методы теории анализа, теории динамического информационного конфликта. **Новизна:** формализация трехстороннего информационного конфликта, с учетом динамики развития; учет эффектов динамического трехстороннего информационного конфликта. **Результаты:** осуществлена вербальная и математическая постановка задачи на исследование, а также общая задача декомпозирована на частные задачи: разработка обобщенной модели многостороннего динамического информационного конфликта; разработка обобщенной и частных моделей трехстороннего динамического информационного конфликта; разработка методики достижения выигрыша телекоммуникационной системы в трехстороннем динамическом информационном конфликте. **Практическая значимость:** состоит в совершенствовании известного научно-методического аппарата по отношению к потребностям практики, заключающейся в доведении их до технических рекомендаций по достижению выигрыша телекоммуникационной системы в условиях многостороннего (трехстороннего) динамического информационного конфликта. Материал статьи может быть использован научными работниками для формирования исходных данных для дальнейших исследований широкого класса конфликтных взаимодействий в прикладных областях в различных сферах.

**Ключевые слова:** теория динамического информационного конфликта, достижение выигрыша, трехсторонний динамический информационный конфликт.

### Введение

Информационный конфликт – одно из ключевых понятий информационного противоборства. На сегодняшний день, актуальным вопросом является исследование теории информационного конфликта. Стремительное развитие средств дестабилизирующих воздействий на телекоммуникационную систему (ТКС) требует совершенствования научно-методического аппарата (НМА) оценки таких воздействий и методов противодействия им. В настоящее время, ведется формирование методологии теории информационного противоборства в технической сфере. Одним из ключевых понятий информационного противоборства является информационный конфликт, под которым в рассматриваемой работе понимается процесс столкновения сторон на этапах сбора, формирования, передачи, хранения, обработки, представления и интерпретации информации о состоянии, намерениях и действиях своей и противоборствующей стороны, при этом каждая из сторон стремится к упреждающим действиям по отношению к противостоящей стороне и предпринимает определенные действия по снижению возможностей этой стороны и обеспечению независимости и эффективности своей системы от вмешательства действий другой стороны.

На основе анализа известных источников информации выявлены общие и частные закономерности исследования информационного конфликта с использованием различного НМА. Актуальным направлением развития исследований информационного конфликта является учет динамических свойств многостороннего конфликта, за счет его формализации на основе теории динамических систем. Таким образом, обобщая анализ известных на сегодня в заданной предметной области, можно сделать вывод о том, что существующий уровень развития НМА исследования информационного конфликта не позволяет формализовать многосторонний, в частности, трехсторонний информационный конфликт, с учетом динамики его развития.

Таким образом, можно сформулировать:

*противоречие в практике* – между развитием вариантов совместного воздействия системы дестабилизирующих воздействий и технических средств разведки (ТСР) на ТКС, которые применяются в целях достижения выигрыша над ТКС путем наращивания собственных ресурсов, благодаря разведыванию и подавлению ресурса ТКС, и отсутствием стратегий, обеспечивающих достижение выигрыша ТКС в условиях совместных воздействий на нее ТСР и системы дестабилизирующих воздействий. Это требует разработки модели и методики достижения выигрыша ТКС, учитывая эффекты динамического многостороннего, в частности, трехстороннего информационного конфликта. В основу разрабатываемых моделей и методики предлагается положить развитие известных научных результатов [1-6];

*противоречие в науке* – между необходимостью выработки научно-обоснованных стратегий, обеспечивающих достижение выигрыша ТКС в условиях информационного конфликта с системой дестабилизирующих воздействий и ТСР и невозможностью на существующем уровне развития теории динамического информационного конфликта сформировать такие стратегии.

Анализ известных работ в области информационного конфликта показал, что перспективным развитием исследований является:

– учет динамических свойств многостороннего информационного конфликта за счет его формализации на основе теории динамических систем;

– развитие известного НМА теории динамических систем, с целью моделирования многосторонних, в частности, трехсторонних динамических информационных конфликтов.

На сегодняшний день известные исследователи теории динамических систем сосредоточены на разработке моделей двусторонних динамических информационных конфликтов, что существенно сужает возможности по его использованию для разработки научно обоснованных решений в условиях многосторонних и разнонаправленных преднамеренных дестабилизирующих воздействий. Для разрешения сформулированного противоречия в науке и практике, необходимо решить научную задачу разработки моделей и методики достижения выигрыша ТКС в условиях трехстороннего динамического информационного конфликта.

### Основная часть

С учетом выявленных противоречий в науке и практике, а также проблемной ситуации сформулированы цель, предмет, объект и научная задача исследования. Цель исследования – достижение выигрыша ТКС в условиях трехстороннего динамического информационного конфликта. Объект исследования – ТКС, как одна из сторон динамического информационного конфликта, в процессе взаимодействия с другими сторонами конфликта – системой дестабилизирующих воздействий и ТСР. Предмет исследования – соотношение конкурентного распределения информационных ресурсов между сторонами информационного конфликта, которое соответствует выигрышу ТКС в условиях трехстороннего динамического информационного конфликта. Для достижения цели исследования, с учетом выбранного объекта и предмета исследования, необходимо решить научную задачу.

Рассмотрим многосторонний динамический информационный конфликт сторон  $i = 1, \dots, n$ . Введем допущение о том, что конфликт развивается на одном организационно-техническом уровне, и объектом конфликта служит некоторый глобальный ресурс  $R$  системы, использующийся каждой стороной для своего функционирования.

Для формализации задачи введем следующие обозначения:

$t_0$  – начальный момент времени конфликта;

$t$  – время развития конфликта;

$R$  – суммарный объем ресурса;

$R_i$  – ресурс  $i$ -ой стороны;

$R_i(t_0)$  – значение ресурса  $i$ -ой стороны в начальный момент времени конфликта  $t_0$ ;

$\alpha_i$  – коэффициент, определяющий возможности  $i$ -ой стороны по наращиванию количества ее ресурса  $R_i$ ;

$\beta_i$  – коэффициент, определяющий взаимную конкуренцию элементов  $i$ -ой стороны за ресурс  $R_i$ ;

$\gamma_i$  – коэффициент, определяющий изменение количества ресурса  $i$ -ой стороны, вследствие взаимодействия с единицей ресурса  $j$ -ой стороны. Если  $\gamma_{i,j} < 0$ , то  $j$ -я сторона негативно влияет на  $i$ -ую сторону. Если  $\gamma_{i,j} > 0$ , то  $j$ -я сторона положительно влияет на  $i$ -ую сторону. Если  $\gamma_{i,j} = 0$ , то  $j$ -я сторона не влияет на  $i$ -ую сторону;

$\gamma_i(R_1, \dots, R_n)$  – функция, определяющая сложное изменение количества ресурса  $i$ -ой стороны  $R_i$ , вследствие ее взаимодействия с ресурсами других сторон ( $R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_n$ ) в динамике развития информационного конфликта.

С учетом введенной терминологии, целью каждой  $i$ -ой стороны рассматриваемого динамического конфликта является максимизация эффективности своего функционирования, за счет максимизации доступного ей ресурса  $R_i \rightarrow \max$ , с целью обеспечения превосходства над другими  $j$ -ми сторонами  $R_i < R_j$  ( $i \neq j$ ), как правило, за счет снижения их ресурсов  $R_j \rightarrow \min$  ( $i \neq j$ ).

В основу описания информационного конфликта предлагается положить известную модель Лотки-Вольтерры [7]:

$$\frac{dR_i}{dt} = \alpha_i R_i - \beta_i R_i^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \gamma_{i,j} R_i R_j . \quad (1)$$

Тогда, при рассмотрении многостороннего информационного конфликта, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dR_1}{dt} = \alpha_1 R_1 - \beta_1 R_1^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_{1,i} R_1 R_i; \\ \dots \\ \frac{dR_n}{dt} = \alpha_n R_n - \beta_n R_n^2 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \gamma_{n,i} R_n R_i; \\ \dots \\ \frac{dR_N}{dt} = \alpha_N R_N - \beta_N R_N^2 - \sum_{i=1}^{N-1} \gamma_{N,i} R_N R_i. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная обобщенная модель многостороннего динамического информационного конфликта относится к нелинейным динамическим системам первого порядка  $N$ -ой размерности. Она ложится в основу модели трехстороннего динамического информационного конфликта, на основе которой разрабатывается методика достижения выигрыша телекоммуникационной системы в условиях трехстороннего динамического информационного конфликта.

Система (2) для трехстороннего динамического информационного конфликта (общий вид) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dR_A}{dt} = \alpha_A R_A - \beta_A R_A^2 \mp \gamma_{AB} R_A R_B \mp \gamma_{AC} R_A R_C, \\ \frac{dR_B}{dt} = \alpha_B R_B - \beta_B R_B^2 \mp \gamma_{BA} R_B R_A \mp \gamma_{BC} R_B R_C, \\ \frac{dR_C}{dt} = \alpha_C R_C - \beta_C R_C^2 \mp \gamma_{CA} R_C R_A \mp \gamma_{CB} R_C R_B. \end{cases} \quad (3)$$

### Заключение

Для решения общей научной задачи, в интересах достижения поставленной цели проведена формализация научной задачи и ее декомпозиция на взаимоувязанный комплекс частных научных и прикладных задач:

– разработка обобщенной модели многостороннего динамического информационного конфликта, обладающей новизной, выраженной в формализации многостороннего информационного конфликта, с учетом динамики развития, а также эффектов динамического многостороннего информационного конфликта;

– разработка обобщенной и частных моделей трехстороннего динамического информационного конфликта с учетом того, что в составе моделей формализованы и исследованы следующие факторы, составляющие научную новизну: формализация трехстороннего информационного конфликта, с учетом динамики развития; учет эффектов динамического трехстороннего информационного конфликта;

– разработка методики достижения выигрыша ТКС в трехстороннем динамическом информационном конфликте, обладающей новизной, выраженной в совместной формализации и учете эффектов динамического трехстороннего информационного конфликта, а также в предложениях по математическому обеспечению, с целью достижения выигрыша ТКС в трехстороннем динамическом информационном конфликте с системой дестабилизирующих воздействий и ТСР.

### Литература

1. Макаренко С.И. Модели воздействия средств радиоэлектронной борьбы на систему связи на основе методов популяционной динамики // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 96-99.

2. Макаренко С.И. Динамическая модель двунаправленного информационного конфликта с учетом возможностей сторон по наблюдению, захвату и блокировке ресурса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 60-97. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10106.

3. Макаренко С.И. Информационный конфликт системы связи с системой дестабилизирующих воздействий. Часть II. Формализация основных аспектов, определяющих выигрыш в конфликте // Техника радиосвязи. 2020. № 3 (46). С. 103-115. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-46-103-115.

4. Макаренко С.И. Информационный конфликт системы связи с системой дестабилизирующих воздействий. Часть I: Концептуальная модель конфликта с учетом ведения разведки, физического, радиоэлектронного и информационного поражения средств связи // Техника радиосвязи. 2020. № 2 (45). С. 104-117. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-45-104-117.

5. Макаренко С.И. Динамическая модель системы связи в условиях функционально-разноразноуровневого информационного конфликта наблюдения и подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 122-185. DOI: 10.24411/2410-9916-2015-10307.

6. Мамончикова А.С. Формализация информационного конфликта на основе теории динамических систем // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 6. С. 68-75. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-68-75.

7. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.

### References

1. Makarenko S.I. Modeli vozdeystviya sredstv radioelektronnoj bor'by na sistemu svyazi na osnove metodov populyacionnoj dinamiki. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Models of effects of electronic warfare means on communication system based on methods of population dynamics]. Journal of the Voronezh State Technical University. 2011. V. 7. No 1. Pp. 96-99 (in Russian).

2. Makarenko S.I. Dynamic Model of the Bi-directional Information Conflict to Take into Account Capabilities of Monitoring, Capturing and Locking of Information Resources. Systems of Control, Communication and Security. 2017. No 1. Pp. 60-97. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10106 (in Russian).

3. Makarenko S.I. Information conflict between a communication system and a system of destabilizing influences. Part II. Formalized main aspects determine win in the conflict. Radio communication technology. 2020. No 3 (46). Pp. 103-115. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-46-103-115 (in Russian).

4. Makarenko S.I. Information conflict between a communication system and a system of destabilizing influences. Part 1. A conceptual conflict model taking into account signal and communications intelligence, fire weapons, electronic and microwave warfare, cyber-attacks. Radio communication technology. 2020. No 2 (45). Pp. 104-117. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-45-104-117 (in Russian).

5. Makarenko S.I. Dynamic Model of Communication System in Conditions the Functional Multilevel Information Conflict of Monitoring and Suppression. Systems of Control, Communication and Security. 2015. No 3. Pp. 122-185. DOI: 10.24411/2410-9916-2015-10307 (in Russian).

6. Mamonchikova A.S. Formalization of information conflict based on the theory of dynamic systems. Science-intensive technologies in space research of the Earth. 2020. V. 12. No 6. Pp. 68-75. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-68-75 (in Russian).

7. Bazykin A.D. Nonlinear dynamics of interacting populations. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Research. 2003. 368 p. (in Russian).

Статья поступила 23 сентября 2021 года

#### Информация об авторе

Мамончикова Алина Сергеевна – Соискатель ученой степени к.т.н. Ведущий специалист патентного бюро ПАО «Интелтех». Область научных интересов: информационная безопасность, интеллектуальная собственность. Тел.: +7(812) 448-96-84. E-mail: alinita33@mail.ru. Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8.

#### Setting the task for the method development of achieving the gain of the telecommunication system in a tripartite dynamic information conflict

A.S. Mamonchikova

**Annotation. Setting the task:** based on the analysis of the work known to date in the field of information conflict (in particular, dynamic information conflict), it can be concluded that there is a need to develop strategies in a tripartite dynamic information conflict that ensure the achievement of the benefit of the telecommunication system in conditions of integral impact on it destabilizing effects and technical means of intelligence. **Methods used:** methods of analysis theory, theories of dynamic information conflict. **Novelty:** formalization of the tripartite information conflict, taking into account the dynamics of development; consideration of effects of dynamic three-way information conflict. **Results:** the verbal and mathematical setting of the problem for research was carried out, as well as the general task is decomposed into private problems: the development of a generalized model of a multilateral dynamic information conflict; development of generalized and private models of tripartite dynamic information conflict; development of a methodology for achieving a gain of a telecommunication system in a tripartite dynamic information conflict. **Practical significance:** consists in improving the known scientific and mathematical apparatus in relation to the needs of practice, which consists in bringing them to technical recommendations for achieving the benefit of telecommunications in a multilateral (tripartite) dynamic information conflict. The article material can be used by researchers to generate initial data for further research of a wide class of conflict interactions in applied fields in various fields.

**Keywords:** dynamic information conflict theory, winning, tripartite dynamic information conflict.

#### Information about Authors

Alina Sergeevna Mamonchikova – Doctoral Student. Leader specialist of the Patent Office of PJSC «Inteltech». Area of scientific interest: information security, intellectual property. Tel +7(812)448-96-84. E-mail: alinita33@mail.ru. Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8 Kantemirovskaya St.

**Для цитирования:** Мамончикова А.С. Постановка задачи на разработку методики достижения выигрыша телекоммуникационной системы в трехстороннем динамическом информационном конфликте // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 74-78.

**For citation:** Mamonchikova A.S. Setting the task for the method development of achieving the gain of the telecommunication system in a tripartite dynamic information conflict. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 74-78 (in Russian).

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 004.94(07)

**Интегрированная платформа анализа и исполнения блочно-структурированных бизнес-процессов**

Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н.

**Аннотация. Актуальность:** Современные системы управления предприятием базируются на основе процессно-ориентированного подхода. Подавляющее их большинство используют язык описания BPMN2. Однако поддержка этого языка в системах управления предприятием обладает ограниченными возможностями по переносу описания по причине неполной поддержки стандарта. Для создания и поддержания BPMN2 моделей процессов в актуальном состоянии аналитик использует целый набор вспомогательных инструментов имитационного моделирования и проверки логической корректности. Получившая в последние годы распространение методология глубинного анализа процессов (Process Mining), использует свой набор инструментов, поддержка бизнес-процессов в которых неполна. Как следствие использование целого набора инструментов и необходимость преобразования форматов при переносе описания существенно замедляет внедрение и актуализацию бизнес-процессов в системах управления предприятием. **Целью исследования** является выработка концептуально-методологического базиса, позволяющего на базе общей методологии Process Mining технологически интегрировать все этапы жизненного цикла бизнес-процесса (реконструкция, анализ качества, анализ временных и стоимостных параметров). **Методы:** теория сетей Петри, дискретная математика, математическая логика, теория алгоритмов. **Результаты:** описана схема интегрированного анализа бизнес-процессов. Предложена и реализована модель динамики деревьев, которая является основой для реализации машины исполнения бизнес-процессов. На основе модели динамики предложен алгоритм построения графа достижимости маркировок дерева процессов. Модифицированы алгоритмы оценки соответствия и точности для их применения с деревьями процессов. В рамках методологии аналитической оценки параметров производительности блочных бизнес-процессов получена формула оценки времени завершения циклического блока с несколькими вариантами доработки. Произведено экспериментальное исследование эффективности разработанного решения путём натурального моделирования схемы интегрированного анализа и предложенных методов и его сравнение с промышленными инструментами по критериям точности и соответствия реконструкции. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о соизмеримых с известными инструментами характеристиках. Это позволяет уменьшить необходимость использования внешних инструментов, повышая оперативность внесения изменений. **Практическая значимость:** приведённые в работе идеи прошли апробацию в ряде опытных конструкторских работ. Описанные в работе результаты могут служить основой для создания более эффективных систем управления предприятием.

**Ключевые слова:** деревья процессов; верификация; машины исполнения бизнес-процессов; сети Петри; производительность бизнес-процессов.

**Введение**

Современная методология выявления бизнес-процессов [1, 2] базируется на формализации нормативных документов и опросе сотрудников на рабочих местах. Для определения ключевых параметров производительности, полученное описание подвергается имитационному моделированию и верификации. После нескольких циклов оптимизации и уточнения бизнес-процесс внедряется. Дополнительной сложностью является неполная поддержка языка BPMN2 в инструментах, а также сложности переноса описаний между инструментами оптимизации, моделирования и исполнения. Таким образом, аналитик на различных этапах вынужден создавать отдельные версии одной и той же модели.

Привлечение методологии процессной аналитики (Process Mining) позволяет сократить время создания моделей бизнес-процессов [3, 4]. Этот подход базируется на идее, что на предприятии устанавливается система с минимально необходимым набором базовых процессов. Пользователи выполняют в системе привычные действия в ручном режиме. На основе этих действий формируются журналы информационных систем, обработка которых специализированными алгоритмами [3] позволяет принять рациональное решение об организации бизнес-процесса. Но и здесь наблюдается многообразие моделей, специфичных для различных алгоритмов. Как результат необходимо выполнять значительное количество ручных операций по их преобразованию.

Ключ к решению описанных трудностей [5, 6] – использования единого формата моделирования на этапах анализа и исполнения бизнес-процессов. Наиболее интересно в этом случае применение высокоуровневого блочно-структурированного подхода к описанию на основе деревьев процессов [7]. За счёт простоты и корректности на уровне синтаксиса, данный подход может служить единым формализмом, связывающим основные этапы жизненного цикла бизнес-процессов.

В работе рассматриваются некоторые прикладные и теоретические вопросы, которые методологически обеспечивают основу комплексного подхода к описанию, анализу и выполнению бизнес-процессов. Описывается модифицированная авторами схема интегрированного анализа и выполнения бизнес-процессов. Для формализации выполнения дерева процессов предлагается модифицированная модель контроля выполнения (динамики). Представлены модифицированные авторами алгоритмы оценки соответствия и точности реконструированного по средствам алгоритма индуктивного анализа дерева. В следующих разделах описывается методология прогнозирования времени выполнения процесса, полученная авторами. В конце работы приведены результаты натурального моделирования и сравнение результатов реконструкции с существующими инструментами *Process Mining (pt4py)* на основе метрик точности и соответствия.

### 1 Общая схема интегрированного анализа процессов

Для восстановления высокоуровневых схем процессов используется журнал выполнения элементарных (базовых) процессов, развернутых в информационной системе. Например, в системах электронного документооборота базовыми действиями будут создание поручения, регистрация документа, визирование цифровой подписью, просмотр документа. Общая схема комплексного анализа представлена на рис. 1. По мере того, как журнал выполнения элементарных действий, появляется возможность исследовать логику их связи в процессе выполнения. Как только развернутый бизнес-процесс перестает соответствовать потребностям организации, пользователи возвращаются к основным действиям, и процесс восстановления повторяется. В корпоративных информационных системах каждый тип объектов (вид документа, запись справочника и пр.) характеризуется своим набором специфичных бизнес-процессов. Поэтому возможно разбиение общесистемного журнала по типам объектов (далее назовём его объектом-селектором).

Каждый объект-селектор характеризуется жизненным циклом, который описывает его поведение от момента создания до уничтожения. Жизненный цикл может быть описан в форме графа, в котором вершинами являются стадии, а рёбрами – переходы между стадиями. Восстанавливаемая посредством алгоритма индуктивного анализа схема бизнес-процесса отражает все стадии жизненного цикла объекта-селектора от создания до уничтожения. Последующее разделение единой схемы на подпроцессы ложится на аналитика.

Точность и соответствие модели (п. 4) процесса также удобнее оценивать сразу для всего дерева поведения объекта-селектора. Указанные характеристики позволяют осуществлять непрерывный мониторинг периодически формируемого журнала и эксплуатируемой совокупности бизнес-процессов.



Рис. 1. Схема интегрированного анализа процессов

Оценка временных характеристик созданных процессов (п. 5) выполняется на последнем этапе, так как не влияет на процесс реконструкции и имеет значение при оптимизации логики и прогнозировании сроков завершения экземпляров бизнес-процессов.

Для заполнения журнала в реализованной авторами машине исполнения [7] выделяется специальный вид базовых бизнес-процессов. Реконструкция модели процесса была осуществлена названным выше алгоритмом индуктивного анализа [8-10]. В п. 2 описывается модель динамики деревьев процессов, используемая в п. 3 для модификации алгоритмов структурной оценки качества реконструкции. Приведённый в следующем разделе формализм также используется в п. 5 при декомпозиции модели процесса для оценки времени выполнения.

## 2 Динамика деревьев процессов

Логической основой для *BPMN* является подкласс сетей Петри, носящих название *WF*-сетей [1, 2]. Как и в случае сетей Петри, *BPMN* не боится от возможных ошибок: тупиков, активных блокировок и мёртвых переходов.

Проблема логических ошибок разрешается при блочно-структурированном задании бизнес-процесса в виде дерева. Данный подход [8-10], позволяет создавать гарантированно корректный (бездефектный) процесс. Однако применение этого подхода в машинах исполнения, а также на этапе оценки адекватности исполняемого бизнес-процесса требует разработки специфичной модели динамики, – выработать правила срабатывания дерева процессов, а также модифицировать основные понятия и методы анализа, сформулированные для сетей Петри [11]. Модель деревьев процессов включает присутствующие в *BPMN* параллельный ( $\wedge$ ) и условный ( $\times$ ) операторы композиции, а также вводит циклический ( $@$ ) и последовательный ( $\rightarrow$ ) операторы. Листовыми узлами дерева являются выполняемые действия.

Заметим, что исходя из теоремы о бездефектности блочно-структурированных процессов [1, 2], между родительским и дочерним узлом всегда будет передаваться только один маркер. То есть любой узел как формальное представление блока получает от родительского узла единственный маркер. После выполнения собственных дочерних узлов, маркер передаётся обратно в родительский узел. Перемещение маркера по поддеревьям в зависимости от типа узла показано на рис. 2.

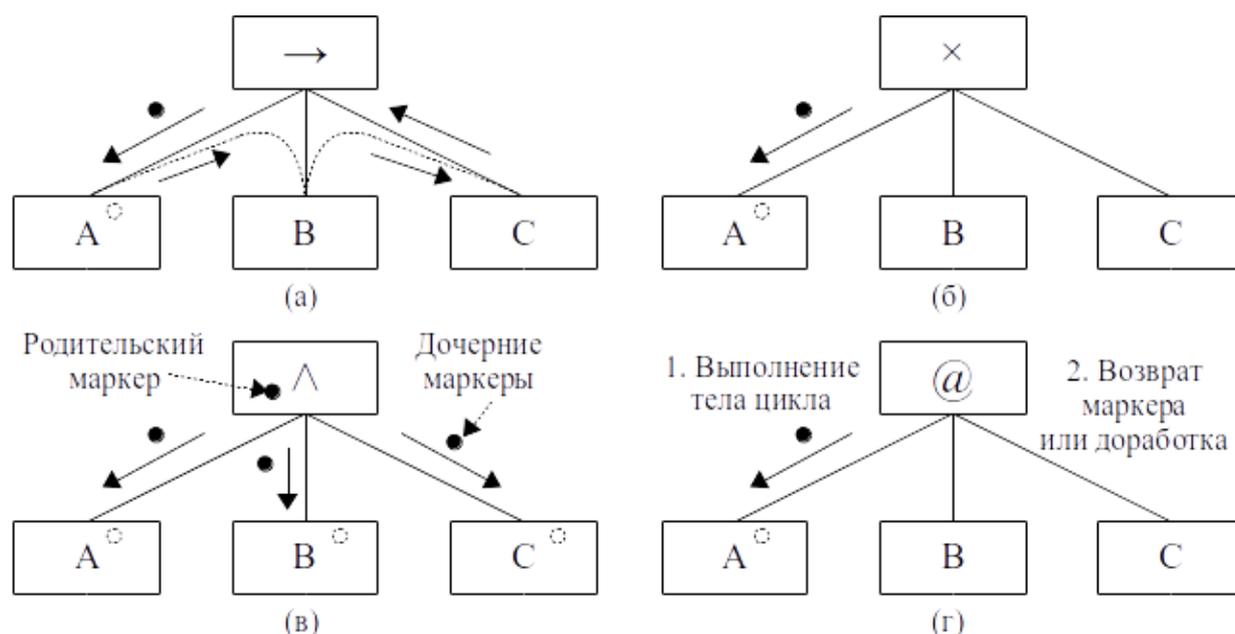


Рис. 2. Обход маркерами поддеревьев последовательного (→), условного(×), параллельного (∧) и циклического (@) узлов

В случае последовательного узла (→) маркер поочерёдно обходит поддеревья – слева направо.

В условном узле (×) на основе заданного в узле предиката, маркер передаётся в единственное дочернее поддерево.

При входе маркера в узел параллельного выполнения (∧) порождаются дочерние маркеры, каждый из которых передаётся в соответствующее поддерево. Родительский маркер ожидает момента возврата маркеров от дочерних поддеревьев. После получения маркеров от всех дочерних поддеревьев происходит их уничтожение, а родительский маркер передаётся узлу-предку.

Узел циклического выполнения (@) содержит тело цикла A и возможные варианты доработки конечного результата. При обходе единственный маркер передаётся в первое по порядку поддерево. После его завершения поведение, фактически, аналогично исключаящему узлу с поддеревьями вариантов доработки. В случае доработки маркер передаётся в соответствующее поддерево. По его возвращению, маркер снова передаётся в первое поддерево. Если доработка не требуется, то маркер возвращается родителю.

В процессе функционирования маркеры могут «останавливаться» только в листовых узлах, соответствующих действиям пользователя или автоматически выполняемой процедуре. Таким образом состояние процесса можно описать расположением маркеров в листовых узлах. Будем обозначать листовые узлы дерева как  $p_1, p_2, \dots, p_n$ .

Маркировкой дерева назовём вектор вида  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ . Элемент  $p_i$  этого вектора указывает на присутствие маркера в узле (0 или 1). В листовом узле может находиться только один маркер по причине бездефектности процесса, описываемого деревом. Иными словами, маркировка дерева – функция  $M(p)$ , сопоставляющая каждому листовому узлу дерева  $p$  признак нахождения в нем маркера.

Маркированный узел может сработать, вызывая смену маркировки. Сработавший в маркировке  $M_1$  листовой узел порождает множество новых маркировок  $\{M_i\}$  перемещая маркеры между листовыми узлами. В случае узлов последовательного (→) и параллельного (∧) операторов множество  $\{M_i\}$  будет состоять из единственной маркировки, в то время как при срабатывании условного (×) и циклического (@) узлов число порождаемых маркировок

будет равно числу дочерних поддеревьев. Маркировки, входящие в множество  $\{M_i\}$ , назовём «сцепленными».

Обозначим этот факт как  $M_1 \xrightarrow{a} \{M_i\}$ . Будем считать, что маркеры между узлами перемещаются мгновенно и в один и тот же момент времени может сработать только один листовой узел.

Динамику дерева процессов удобно описать в форме известного из теории сетей Петри [1] графа достижимости маркировок, в котором вершинами являются маркировки, а ребрами – сработавшие действия листовых узлов. Пример дерева процессов и графа маркировок показан на рис. 3.

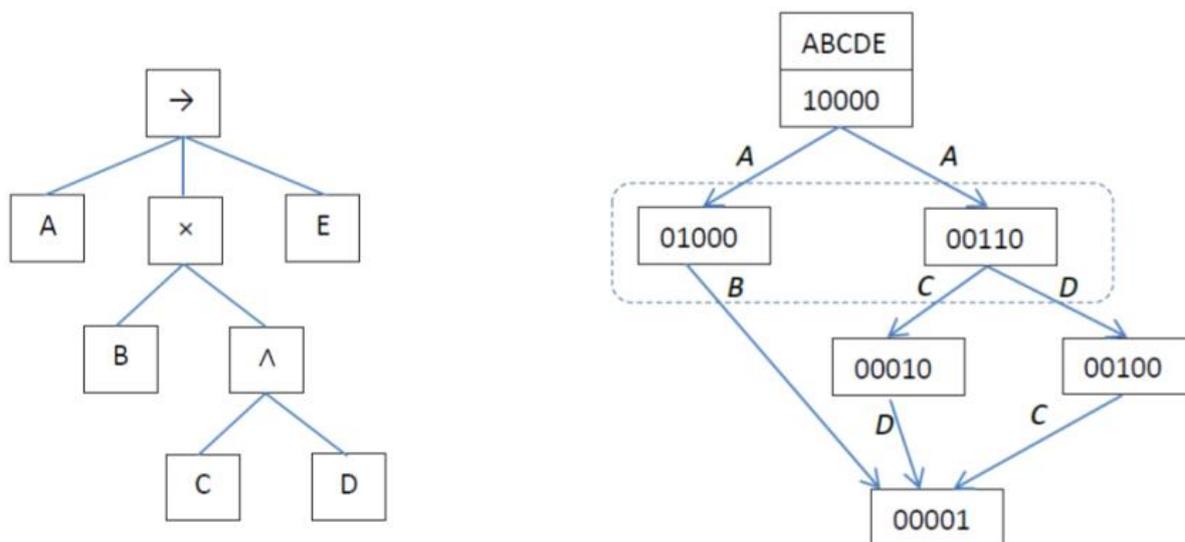


Рис. 3. Схема дерева процессов и его граф достижимости маркировок. Пунктиром показано множество «сцепленных» маркировок

В разработанном прототипе для реконструкции схемы процесса был использован алгоритм *InductiveMiner* [8]. Далее работа будет посвящена оценке качества произведённой реконструкции применительно к деревьям процессов.

### 3 Схема вычисления соответствия и точности

Оценка реконструированной схемы бизнес-процесса может осуществляться различными способами [3]. Как правило, показатели (метрики) качества реконструкции показывают насколько соответствует поведение реконструированной модели исходному журналу событий. Наиболее методологически проработанными являются метрики соответствия [12, 13] и точности [14].

Высокий уровень метрики соответствия (*fitness*) обеспечивает возможность воспроизведения реконструированной моделью поведения в журнале событий.

Точность характеризует отсутствие избыточности реконструированной модели по отношению к журналу.

Для оценки соответствия был использован подход [12], модифицированный для деревьев процессов. Алгоритм базируется на вычислении оптимального выравнивания трасс журнала  $L$  и последовательности срабатываний листовых узлов модели процесса  $PT$ . Например:

$PT$	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
$L$	$\wedge$	$b$	$d$	$e$	$f$	$\wedge$

где  $\wedge$  – пропуск символа в модели  $PT$  или в трассе  $l$  журнала событий.

Обсуждение предложенного алгоритма вычисления оптимального выравнивания приведено в [21].

Метрика соответствия определяется как:

$$fitness(L, PT) = 1 - \frac{fcost(L, PT)}{move(L) + |L|move(PT)}, \quad (1)$$

где  $fcost(L, PT)$  – минимальное суммарное редакционное расстояние между выравненной трассой журнала и последовательностью срабатываний модели  $PT$ ;  $move(L)$  – суммарная длина трасс журнала событий;  $move(PT)$  – длина наиболее короткой трассы модели процесса  $PT$ .

Метрика точности характеризует отсутствие избыточности модели процесса по отношению к журналу. Она может быть вычислена как [14, 15]:

$$precision(L, PT) = \frac{\sum_{s \in Q} \omega(s) |e_x(s)|}{\sum_{s \in Q} \omega(s) |a_v(s)|}, \quad (2)$$

где  $Q$  – множество префиксов трасс журнала;  $\omega(s)$  – частота (счетчик) префикса  $s$  в журнале;  $e_x(s)$  – множество действий, следующих за префиксом  $s$  трасс журнала;  $a_v(s)$  – множество действий, непосредственно выполнимых из маркировки, в которую можно перевести модель выполнив последовательность  $s$ .

#### 4 Оценка параметров производительности процесса

Помимо бездефектности, гарантируемой формализмом описания, точности и соответствия журналу, бизнес-процесс должен характеризоваться определёнными параметрами производительности [2]. Их наиболее точную оценку даёт вычислительно сложное и ресурсоемкое имитационное моделирование [16]. Однако такие параметры как среднее время выполнения процесса и средние суммарные затраты, могут быть вычислены аналитически [17-19].

Формально время выполнения  $CT$  бизнес-процесса может быть рекурсивно вычислено на основании времён исполнения поддеревьев  $T_i$  следующим образом:

Последовательное исполнение:

$$CT = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3)$$

Параллельное исполнение:

$$CT = \text{Max}(T_1, T_2, \dots, T_n). \quad (4)$$

Условный выбор между поддеревьями с вероятностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ :

$$CT = \sum_{i=1}^n p_i T_i. \quad (5)$$

В работе [21] приведен результат, который позволяет вычислить время выполнения циклического узла (Рис.4):

$$CT = \frac{T_0 + \sum_{i=1}^n T_i p_i}{p_0} + T_{n+1}. \quad (6)$$

Указанные соображения можно использовать для прогноза времени завершения с запущенным и частично исполненным процессом с текущим журналом выполнения  $L$ . Вычисление также производится рекурсивно от маркировки, соответствующей последней

записи журнала. Для узлов последовательного, параллельного и исключаящего поведения методика схожа с формулами (3), (4), (5). При вычислении времени доработки для циклов рассматривается два случая: если маркер в момент вычисления находится в теле цикла (количество входов в тело больше количества выходов), и если маркер находится в блоке доработки (количество входов равно количеству выходов).

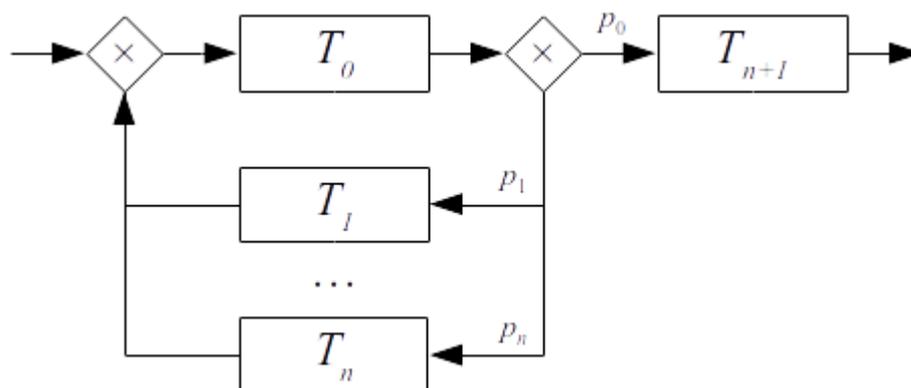


Рис. 4. Пример циклического процесса

Пусть  $n$  – количество входов в тело цикла,

$$CT_r = \frac{\sum_{i=1}^n T_i P_i}{1 - p_0} \text{ – среднее время доработки. Результирующая формула для первого}$$

случая:

$$CT = (CT_r + T_0) \left( 1 + \frac{(1 - p_0)^n}{p_0} \right), \tag{8}$$

для случая, когда на момент вычисления маркер находится в теле доработки:

$$CT = (CT_r + T_0) \left( 1 + \frac{(1 - p_0)^{n+1}}{p_0} \right). \tag{9}$$

### 5 Экспериментальные исследования

Описанные алгоритмы были реализованы в разработанной системе электронного документооборота совместно с машиной исполнения бизнес-процессов *Onengine*[7]. Согласно принятой методологии [19-21] эксперимент производился на основе журнала событий процесса, содержащего порядка 20 действий. В журнал вносились случайные пропуски действий (от 1 до 6). После чего производился расчёт предложенными в работе алгоритмами и эталонной реализацией на инструментарии *pm4py* [22, 23]. В каждой из шести групп производилось от 20 (для 1 удаления) до 10000 (для 6 удалений) экспериментов. Результаты статистического анализа в виде дисперсии (Var) и математического ожидания (AVG) характеристик соответствия (Fit) и точности (Prec), вычисленных указанными инструментами представлены на рис. 5.

По метрике точности наблюдалось полное совпадение результатов (график в) по математическому ожиданию значения для всех 6 типов экспериментов при несколько меньшей дисперсии с сохранением формы закономерности (график а). Для метрики точности наблюдалось сохранение формы закономерности математического ожидания (график 4) при меньших значениях и иная форма дисперсии (график б). Такой результат можно объяснить

отсутствием, в отличие от метрики соответствия единого способа вычисления [24], что было подтверждено сравнительным изучением исходного кода *pm4py* и соответствующих плагинов *ProM*.

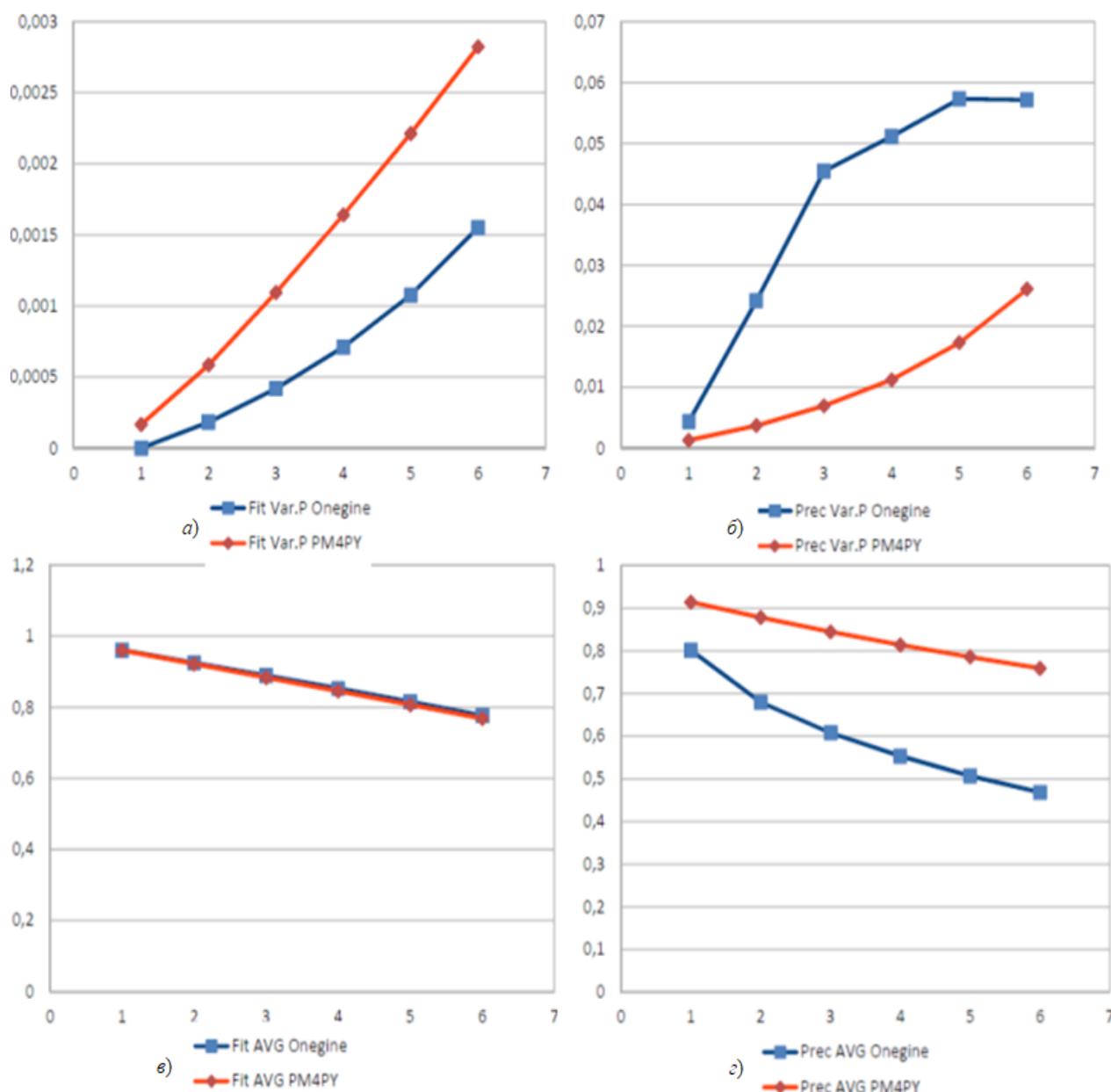


Рис. 5. Результаты сравнения дисперсии (а,б) и матожидания (в,г) соответствия и точности реконструкции процессов разработанным инструментарием *Onegine* и *pm4py*

### Заключение

В представленном прикладном исследовании были получены следующие выводы и результаты:

- реализованная схема и предложенные алгоритмы позволяют интегрировать средства описания, анализа и исполнения бизнес-процессов. Рассмотренные алгоритмы вычисления базовых метрик точности и соответствия показывают соизмеримые с известными инструментами результаты;

– использование платформы *Onegene* позволяет минимизировать использование сложных средств проверки корректности описания и повысить (до 2-3 раз) скорость внесения изменений в действующие бизнес-процессы.

#### Литература

1. W. van der Aalst. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 352 p.
2. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в анализ процессов. Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2020. 96 с.
3. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в структурный синтез процессов автоматизации управления (Process Mining). Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2021. 88 с.
4. Васильев Н.В., Забродин О.В., Куликов Д.В. Метод Process Mining в системе защищенного электронного документооборота / Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т.10. № 6. С. 38-50.
5. M. Gregor. The death of process mining? [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining/>, 2019.
6. W. van der Aalst. *Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia* (Blog Post Celonis). [www.celonis.com](http://www.celonis.com), 2019.
7. Vasiliev N. V., Dorogov A. Y., Yashin A. I. and Dovzhikov S. N., "Onengine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes\*," 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819
8. S. Leemans, D. Fahland, and W. van der Aalst. Discovering block-structured process models from incomplete event logs. In *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 91–110.
9. W. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen. A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors, *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14)*, vol. 11970 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 1-35. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
10. A. Kalenkova, A. Burattin, M. de Leoni, W. van der Aalst, and A. Sperduti. Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data. *Business Process Management Journal*, 25(5): p. 995-1019, 2019.
11. W. van der Aalst. Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Röglinger, and J. Mendling, editors, *International Conference on Business Process Management (BPM 2019)*, volume 11675 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 3-9. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. (2011). Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis. *The Journal of Physical Chemistry*. p.55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.
13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. Scalable process discovery and conformance checking. *Software & Systems Modeling* 17(2): p. 599-631, 2018.
14. D. Schuster, S. van Zelst, and W. van der Aalst. Alignment Approximation for Process Trees. *Computing Research Repository (CoRR)* in arXiv, abs/2009.14094, 2020.
15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa. Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258. 2021.
16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano García-Bañuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin, Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints, *Data & Knowledge Engineering*, vol. 134, 2021, 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.
17. M. Dumas, M. Rosa, J. Mendling, and H. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management* (2-ed.). Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.
18. G. Schuh, A. Gutzlaff, S. Schmitz, and W. van der Aalst. Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing. *CIRP Annals*, 69(1): p. 381-384, 2020.

19. C. Li, S. van Zelst, and W. van der Aalst. A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors, Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019), BPM 2019 Workshop Proceedings, vol. 362 of Lecture Notes in Business Information Processing, p. 199-211. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

20. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

21. N. Vasiliev, A. Yashin and S. Dovzhikov. Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach. 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283. 2021.

22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan. Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science. in IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877. 2019.

23. A. Berti, S. van Zelst, and W. van der Aalst. PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack. In Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019, vol. 2420 of CEUR Workshop Proceedings, p. 174-183. CEUR-WS.org, 2019.

24. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

### References

1. W. van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 352 p.

2. Vasiliev N.V., Yashin A.I. Introduction to process analysis. Tutorial. SPb .: Publishing house SPbETU, 2020. 96 p. (in Russian)

3. Vasiliev N.V., Yashin A.I. Introduction to the structural synthesis of control automation processes (Process Mining). Tutorial (In Russian). SPb .: Publishing house SPbETU, 2021. 88 p. (in Russian).

4. Vasiliev N.V., Zabrodin O.V., Kulikov D.V. Process mining method in a secure electronic document management system (in Russian) // Science-intensive technologies in space research of the Earth. 2018.T.10. No. 6, p.38-50 (in Russian).

5. M. Gregor. The death of process mining? [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining/>, 2019.

6. W. van der Aalst. Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia (Blog Post Celonis). [www.celonis.com](http://www.celonis.com), 2019.

7. Vasiliev N.V., Dorogov A.Y., Yashin A.I. and Dovzhikov S.N., "Onegine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes\*," 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819

8. S. Leemans, D. Fahland, and W. van der Aalst. Discovering block-structured process models from incomplete event logs. In Application and Theory of Petri Nets and Concurrency, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 91–110.

9. W. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen. A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors, Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14), vol. 11970 of Lecture Notes in Computer Science, p. 1-35. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

10. A. Kalenkova, A. Burattin, M. de Leoni, W. van der Aalst, and A. Sperduti. Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data. Business Process Management Journal, 25(5): p. 995-1019, 2019.

11. W. van der Aalst. Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Röglinger, and J. Mendling, editors, International

Conference on Business Process Management (BPM 2019), volume 11675 of Lecture Notes in Computer Science, p. 3-9. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. (2011). Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis. *The Journal of Physical Chemistry*. p.55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.

13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. Scalable process discovery and conformance checking. *Software & Systems Modeling* 17(2): p. 599-631, 2018.

14. D. Schuster, S. van Zelst, and W. van der Aalst. Alignment Approximation for Process Trees. *Computing Research Repository (CoRR) in arXiv*, abs/2009.14094, 2020.

15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa. Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258. 2021.

16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano García-Bañuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin, Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints, *Data & Knowledge Engineering*, vol. 134, 2021, 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.

17. M. Dumas, M. Rosa, J. Mendling, and H. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management (2-ed.)*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.

18. G. Schuh, A. Gutzlaff, S. Schmitz, and W. van der Aalst. Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing. *CIRP Annals*, 69(1): p. 381-384, 2020.

19. C. Li, S. van Zelst, and W. van der Aalst. A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors, *Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019)*, *BPM 2019 Workshop Proceedings*, vol. 362 of *Lecture Notes in Business Information Processing*, p. 199-211. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

20. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

21. N. Vasiliev, A. Yashin and S. Dovzhikov. Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach. 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283. 2021.

22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan. Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science. in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877. 2019.

23. A. Berti, S. van Zelst, and W. van der Aalst. PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack. In *Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019*, vol. 2420 of *CEUR Workshop Proceedings*, p. 174-183. CEUR-WS.org, 2019.

24. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

Статья поступила 28 сентября 2021 года

### Информация об авторах

Васильев Николай Владимирович – К.т.н. Начальник сектора ПАО «Интелтех».  
E-mail: [gandvik1984@gmail.com](mailto:gandvik1984@gmail.com).

Яшин Александр Иванович – Д.т.н. Заместитель генерального конструктора ПАО «Интелтех». E-mail: [a\\_yashin@inbox.ru](mailto:a_yashin@inbox.ru).

Довжиков Сергей Николаевич – Инженер ПАО «Интелтех».  
E-mail: [sergei.dovzhikov@gmail.com](mailto:sergei.dovzhikov@gmail.com).

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8. Тел. (812) 542-18-49.

**Integration platform for execution, process mining and performance analysis of business processes**

N.V. Vasiliev, A.I. Yashin, S.N. Dovzhikov

**Annotation. Introduction:** the core of modern enterprise management information systems are machines for the execution of business processes. The vast majority of them use the BPMN2 description language (for example, JBPM, Activiti, Camunda). Despite the adoption of the standard, the editors' support for BPMN is platform-oriented and has limited capabilities for transferring descriptions. To create and maintain BPMN descriptions up to date, a business analyst, in addition to editors, uses a whole set of auxiliary tools, including verification tools (for example, WoPeD) and performance analysis (Bizagi, BIMP). The attraction for identifying and updating business processes of the methodology of in-depth analysis of processes (ProcessMining), which uses its own set of tools (Disco, ProM), in which BPMN support is limited. As a result, the integration of analysis tools and tools for the execution of business processes remains insufficient, which significantly slows down the implementation and updating of enterprise management systems. **Purpose of the study:** based on the general log processing methodology used by Process Mining, show that a block-structured approach based on process trees can be a universal formalism at all stages (reconstruction, quality analysis, analysis of time and cost parameters). **Methods:** theory of Petri nets, discrete mathematics, mathematical logic, theory of algorithms. **Results:** the scheme of integrated analysis of business processes is described. A tree dynamics model is proposed and implemented, which is the basis for the implementation of a business process execution machine. On the basis of the dynamics model, an algorithm for constructing the reachability graph of process tree markings is proposed. Conformity and accuracy assessment algorithms have been modified for their application with process trees. Within the framework of the methodology for the analytical assessment of the performance parameters of block business processes, a formula for estimating the completion time of a cyclic block with several revision options is obtained. An experimental study of the effectiveness of the developed solution was carried out by means of full-scale modeling of the integrated analysis scheme and the proposed methods and its comparison with industrial instruments (pm4py) according to the criteria of accuracy and compliance of the reconstruction. The experimental results obtained make it possible to speak about characteristics comparable with the known instruments. This reduces the need for external tools, making changes faster. **Practical significance:** the ideas presented in the work were implemented in the Onengine virtual machine developed by the authors and tested in a number of experimental design works. The results described in the work can serve as a basis for creating more effective enterprise management systems.

**Keywords:** process trees; verification; business process execution machines; Petri nets; business process performance analysis.

**Information about Authors**

Nickolay V. Vasiliev – PhD. Head division of PJSC «Inteltech» department.  
E-mail: gandvik1984@gmail.com.

Alexander I. Yashin – DrSc. Deputy general designer of PJSC «Inteltech».  
E-mail: a\_yashin@inbox.ru.

Sergey N. Dovzhikov – Engineer of PJSC «Inteltech». E-mail: sergei.dovzhikov@gmail.com.  
Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8 Kantemirovskaya St. Tel. (812) 542-18-49.

**Для цитирования:** Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н. Интегрированная платформа анализа и исполнения блочно-структурированных бизнес-процессов // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 79-90.

**For citation:** Vasiliev N.V., Yashin A.I., Dovzhikov S.N. Integration platform for execution, process mining and performance analysis of business processes. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 79-90 (in Russian).

**ПОСВЯЩАЕТСЯ ЮБИЛЯРУ!**

УДК 621.396

**Академик И.Д. Спасский  
и его вклад в создание и развитие средств автоматизированного  
управления и связи с морскими стратегическими силами сдерживания**

Мирошников В.И.

Академик Игорь Дмитриевич Спасский родился 2 августа 1926 г. в г. Богородске (в настоящее время г. Ногинск) Московской области. В 1949 г. окончил паросиловой факультет Высшего военно-морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского. Проходил службу в должности командира котельной группы крейсера «Фрунзе» на Черноморском флоте. В 1950 г. переведен из ВМФ на работу в судостроительную промышленность. С 1953 г. работает в Центральном конструкторском бюро морской техники (ЦКБ МТ) «Рубин». Пройдя все ступени конструкторских должностей, в 1956 г. назначен заместителем главного конструктора атомной подводной лодки (ПЛ) с баллистическими ракетами, а в 1968 г. – главным инженером бюро. С 1974 г. – главный конструктор, а с 1983 г. по 2007 г. – генеральный конструктор, начальник ФГУП «ЦКБ МТ «Рубин». В настоящее время И.Д. Спасский научный руководитель работ АО «ЦКБ МТ «Рубин». По 17-ти проектам, разработанным коллективом предприятия под его руководством, построены 91 атомная ПЛ и 85 дизель-электрических ПЛ, разработан уникальный ряд фундаментальных научно-технических направлений, выполнено большое число научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (ОКР). И.Д. Спасский автор более 200 научных трудов по вопросам проектирования, инженерной разработки и строительства ПЛ. И.Д. Спасский лауреат Ленинской премии (1965 г.), Герой Социалистического труда (1978 г.), лауреат Государственной премии (1984 г.), действительный член АН СССР (1987 г.). В 2002 г. за большие заслуги в области развития судостроительной промышленности города и, главным образом в области подводного судостроения, И.Д. Спасский удостоен звания «Почётный гражданин Санкт-Петербурга». Указом Президента РФ в 2007 г. И.Д. Спасскому присуждена Государственная премия за разработку, создание и развитие трёх поколений атомных подводных ракетносцев. Указом Президента РФ от 23 апреля 2018 г. за большой вклад в создание новых образцов вооружения и военной техники научному руководителю работ АО «ЦКБ МТ «Рубин» Спасскому Игорю Дмитриевичу присвоено высшее звание России – Героя Российской Федерации с вручением медали «Золотая Звезда». За заслуги в обеспечении обороноспособности и безопасности государства И.Д. Спасский награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» II и III степени, орденом Почета, двумя орденами Ленина, орденом Октябрьской революции, орденом Трудового Красного Знамени, орденом Благоверного князя Даниила Московского I, II и III степени, а также государственными и ведомственными медалями.

О деятельности И.Д. Спасского по руководству созданием нескольких поколений ракетных ПЛ подробно изложено в ряде монографий и статей. Однако мало известно какую важную роль И.Д. Спасский играл в создании средств связи и управления морскими силами сдерживания. В этой статье на основе совместно выполненных работ и отдельных публикаций [1, 2] сделана попытка частично восполнить этот пробел, поделившись с читателем малоизвестными фактами о роли И.Д. Спасского в решении этой важной государственной задачи.

Создание ПЛ – это, пожалуй, одна из самых сложных научно-технических проблем из всех существующих на сегодня, связанных с разработкой технических средств в любой

области деятельности человека. После того, как ПЛ разработана, построена, прошла все виды испытаний и принята в состав флота, ее боевая эффективность во многом определяется эффективностью работы средств связи и управления в процессе ее применения в операциях флота. Академик И. Д. Спасский глубоко понимал суть этой проблемы и постоянно уделял ей большое внимание. Впервые я встретился с И.Д. Спасским в 1968 г., когда он посетил наше предприятие – НИИ электротехнических устройств (в настоящее время ПАО «Интелтех») в должности главного инженера ЦКБ МТ «Рубин». Он возглавлял комиссию по приемке технического проекта ОКР «Замок». С этого момента и по настоящее время продолжается наше личное сотрудничество и творческое партнерство коллективов наших предприятий.

В то время НИИ ЭТУ был головным предприятием по вопросам связи и обмена информацией береговых командных пунктов с силами в море и, в первую очередь, с ракетными ПЛ стратегического назначения (РПЛ СН) основными носителями ядерного оружия. Необходимо отметить, что в шестидесятые годы в стране начались полномасштабные работы по созданию автоматизированных систем управления (АСУ) видов Вооруженных сил (ВС), имеющих в своем составе стратегическое ядерное оружие, а также АСУ ВС в целом. В 1967 г. под организационным и научно-техническим руководством академика В. С. Семенихина Московский НИИ автоматической аппаратуры (НИИ АА) приступил к масштабным работам по созданию АСУ ВС на элементной базе третьего поколения (микросхемах). На первом этапе было принято решение о создании командной системы боевого управления (КСБУ) ВС. Параллельно с этим, в стране бурно развивался подводный флот и, в первую очередь, РПЛ СН. Появление на стратегических ПЛ нового ядерного оружия неограниченного радиуса действия и огромной разрушительной силы (ракетные комплексы Д-9 и Д-9Р), несение ПЛ постоянной боевой службы в оперативно важных районах мирового океана с длительным отрывом от мест базирования поставило перед ВМФ новую государственную задачу по исключению возможности случайного или несанкционированного пуска ракет с РПЛ СН. Решение этой задачи было поручено НИИ ЭТУ. В ходе советско-американских переговоров по вопросам ограничения стратегических вооружений было подготовлено соглашение о мерах по уменьшению опасности возникновения ядерной войны между СССР и США, которое было подписано 30 сентября 1971 г. в Вашингтоне.

Советское правительство ответственно отнеслось к решению возникшей проблемы, и уже в 1967 г. НИИ ЭТУ было поручено выполнение ОКР «Замок» (главный конструктор В.И. Мирошников). Цель работы – создание аппаратного комплекса приемного устройства для ПЛ, который должен обеспечить прием информации с берегового пункта управления, обработать ее по специальному алгоритму и гарантированно выдать команду на разблокировку стартовых цепей ракетного оружия в системе управления ракетным оружием на ПЛ. Таким образом, пуск ракет с ПЛ мог быть осуществлен только после получения приказа Верховного командования. Председателем комиссии по приемке технического проекта ОКР «Замок» был назначен И. Д. Спасский. Как главный конструктор ОКР я тоже входил в состав комиссии. Председатель комиссии детально разобрался во всех проблемах, возникающих при автоматической разблокировке ракетного оружия на ПЛ по командам с берегового командного пункта. Он поддержал все наши предложения по включению в указанный комплекс передовых технических решений, разработанных в НИИ ЭТУ к этому времени. Когда в 1969 г. в НИИ ЭТУ была открыта новая ОКР, целью которой была разработка уже передающей части аппаратного комплекса, И.Д. Спасский поддержал наше предложение по объединению указанных работ по созданию единого аппаратного комплекса «Команда». Это позволило эффективно решить вопросы гарантированного обеспечения защиты от случайного и несанкционированного применения ядерного оружия на ПЛ. Был предложен алгоритм, который подробно рассмотрел и одобрил И.Д. Спасский, внося ряд

продуктивных предложений. По этому алгоритму впервые удалось исключить доступ личного состава к шифранным или его частям на разблокировку оружия. И.Д. Спасский оказал содействие в размещении аппаратуры комплекса «Команда» на ПЛ. Это позволило в сжатые сроки выпустить и оснастить аппаратурой защиты от случайного и несанкционированного пуска ракет все РПЛ СН различных проектов. Комплекс «Команда» не имел аналогов ни в отечественной, ни в мировой практике. Его технические решения были использованы в дальнейшем при создании КСБУ ВС. Этот комплекс, по сути, был предшественником КСБУ ВМФ, так как он позволял на трассах большой протяженности (более 10000 км) по радиоканалам низкого качества надежно передавать три формализованных сообщения на применение стратегического ядерного оружия с одновременным обеспечением его гарантированной защиты.

В семидесятые годы в стране под руководством академика В.С. Семенихина развернулись широкомасштабные работы по созданию КБСУ ВС. Для ПЛ в рамках этих работ разрабатывался комплекс Р-066, который наряду с решением задачи по приему и передаче информации (обмену данными) решал задачу и боевого управления ПЛ, включая ее стратегическое оружие. В результате возросли габариты комплекса. На новых проектах ПЛ он размещался, а на действующих размещение комплекса вызывало большие трудности. Под руководством И.Д. Спасского были рассмотрены разные варианты размещения комплекса Р-066 на ПЛ проектов 669А и 669Б. В результате было решено, что комплексы можно разместить только за счет использования площадей двух кают личного состава. Одновременно НИИ ЭТУ прорабатывал вопрос разработки нового комплекса с применением элементной базы третьего поколения, которая была разрешена к применению только в береговых комплексах. Эта проработка показала возможность размещения нового комплекса на проектах ПЛ 669А и 669Б на имеющихся площадях. Эти два варианта решения проблемы мы договорились предложить заказчику. Для принятия окончательного решения о постановке КСБУ на опытное дежурство в 1980 г. под руководством заместителя начальника Генерального штаба ВС генерала армии С.Ф. Ахромеева было организовано совещание. Суть вопроса кратко изложил С.Ф. Ахромеев. Он сказал, что создана уникальная система, но с ее помощью мы можем управлять только тремя-четырьмя РПЛ СН новых проектов. Основная же часть стратегического оружия морского базирования, находится на РПЛ проектов 667А и 667Б. Но РПЛ этих проектов не входят в контур управления КСБУ, так как на этих ПЛ комплекс технических средств боевого управления и обмена данными с ПЛ и НК ВМФ (Р-066), созданный в рамках ОКР, не размещается на имеющихся площадях. Так как этот вопрос находился в зоне моей ответственности, то держать удар и докладывать пришлось мне. Я пояснил, что габариты комплекса определялись исходя из возложенных на него задач, заданных в ТТЗ. Кроме аппаратуры передачи данных, которая традиционно размещается на площадях, выделяемых под комплексы связи ПЛ, на этих же площадях потребовалось дополнительно разместить стойки и пульта боевого управления, а также стойки, решающие задачу гарантированной защиты от несанкционированного пуска ракетного оружия. Это потребовало для размещения примерно в 1,5 раза больше площади. Кроме того, на бортовые комплексы не распространялось разрешение Правительства на применение перспективной микросхемы «Посол» (3-е поколение), на основе которой были спроектированы береговые комплексы КСБУ. Комплекс Р-066 был спроектирован на микросхемах 2-го поколения, что не позволило снизить массогабаритные характеристики аппаратуры. Комплекс Р-066 был задан под новые проекты РПЛ СН, в котором места для его размещения было достаточно. Чтобы разместить комплекс Р-066 на действующих РПЛ СН (проектах 667А и 667Б) требуется передать под размещение комплекса две каюты личного состава. Меня перебил С.Ф. Ахромеев и сказал, что не допустит ухудшения жизненных условий экипажа. Тогда я сказал, что остается только один путь – спроектировать в возможно короткие сроки новый

комплекс с использованием микросхемы «Посол». Наше предприятие с участием КБ завода «Сигнал» (г. Кишинев) разработает за квартал технический проект. После его принятия, КБ завода «Сигнал» разработает рабочую конструкторскую документацию под свое производство и технологические процессы, изготовит опытный образец и совместно с нами произведет все виды испытаний. Кроме того, наше предприятие разработает программный продукт и программную документацию. На все эти работы потребуется год. Но так как комплекс будет уже внедрен на заводе, то мы наверстаем этот год при серийном производстве и задержек с оснащением РПЛ СН новым комплексом не будет. После горячего обсуждения этого вопроса Сергей Федорович в итоге согласился с предложенным планом. В результате его реализации ВС за 10 лет получили более 150 комплексов, которые имели шифр «Ротатор», и ими были перевооружены все действующие РПЛ СН, оснащены ПЛ новых проектов, а также ряд надводных кораблей.

В 80-е годы И.Д. Спасским нашему предприятию была поставлена задача по разработке комплекса средств боевого управления и связи, обеспечивающего гарантированное доведение информации с береговых командных пунктов до ПЛ. Проработка этого вопроса показала, что эту задачу может выполнить комплекс в мобильном исполнении, имеющий в своем составе как средства боевого управления, так и связи. Кроме того, требовалось резко увеличить число каналов доведения информации до ПЛ. Так как береговые средства связи и боевого управления были предназначены для установки на стационарных объектах, то потребовалось создание новых комплексов в мобильном исполнении. Эти работы выполнялись по заданию ЦКБ МТ «Рубин». Игорь Дмитриевич являлся прямым руководителем этого направления работ. Мобильные компоненты системы связи с ПЛ были созданы и успешно прошли государственные испытания. В результате этих работ был внесен большой вклад в решение проблемы повышения живучести средств управления и связи ВМФ.

Вспоминая весь путь, пройденный в совместных работах с И.Д. Спасским, начиная с защиты технического проекта ОКР «Замок» и до настоящего времени, хотелось бы попытаться одной фразой показать главную черту его характера, как она сложилась в моем представлении. Этой чертой является подвижничество, стремление творить, создавать новое. При этом стремление к созданию нового воплощается не только в области его основной профессиональной деятельности – подводного кораблестроения, но и во многих смежных областях. Об Игоре Дмитриевиче хочу сказать словами А.П. Чехова: «...подвижники нужны, как солнце... Их личности – это живые документы, указывающие обществу, что кроме людей, ведущих споры об оптимизме и пессимизме, пишущих от скуки ненужные проекты... есть еще люди иного порядка, люди подвига, веры и ясно сознанной цели». Дважды Герой – Герой Российской Федерации и Герой Социалистического Труда И.Д. Спасский внес определяющий вклад в создание морского ракетно-ядерного щита, обеспечившего, при взаимодействии с другими видами стратегических ядерных сил, надежную безопасность государства в послевоенный период. 95-летний юбилей И.Д. Спасского – это целая эпоха творчества, неразрывно связанного с проектированием подводных лодок, прожитая одним человеком в достойном труде, в доблестном служении Отечеству и активном продвижении науки в области подводного кораблестроения, систем управления и связи.

### Литература

1. Халин В.Г., Зацаринный А.А., Геков В.В. и др. Об опыте создания и развития автоматизированных систем управления ВС СССР и РФ (коллективная трехтомная монография). Краткие справочные и автобиографические данные о ветеранах

автоматизаторах Управления начальника связи Вооруженных сил в 3 т. М.: АдамантЪ, 2019, Том 2. 264 стр.

2. Гуляев Ю.В., Прохорова А.М., Зацаринный А.А., Мирошников В.И. и др. Стратегическая стабильность России на море. (коллективная монография). М.: ТОРУС ПРЕСС. 2020. 281 с.

### References

1. Khalin V.G., Zatsarinny A.A., Gekov V.V. and others. On the experience of creating and developing automated control systems of the Armed Forces of the USSR and the Russian Federation (collective three-volume monograph). Brief background and autobiographical data on veterans and automatisers of the Office of the Chief of Communications of the Armed Forces in 3 t. Moscow. Adamant, 2019, V. 2. 264 p. (in Russian).

2. Gulyaev Yu.V., Prokhorova A.M., Zatsarinny A.A., Miroshnikov V.I. and others. Russia's strategic stability at sea. (collective monograph). Moscow. TORUS PRESS. 2020. 281 p. (in Russian).

Статья поступила 28 сентября 2021 года

### Информация об авторе

Мирошников Валентин Иванович – Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации. Генеральный конструктор ПАО «Интелтех». Тел.: +7(812) 295-66-66. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

### Academician I.D. Spassky and his contribution to the creation and development of automated control and communication tools with marine strategic deterrence forces

V.I. Miroshnikov

### Information about Authors

Valentin Ivanovich Miroshnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation. General Designer of PJSC «Inteltech». Tel +7(812) 295-66-66. E-mail: intelteh@inteltech.ru.

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

**Для цитирования:** Мирошников В.И. Академик И.Д. Спасский и его вклад в создание и развитие средств автоматизированного управления и связи с морскими стратегическими силами сдерживания // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 91-95.

**For citation:** Miroshnikov V.I. Academician I.D. Spassky and his contribution to the creation and development of automated control and communication tools with marine strategic deterrence forces. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 91-95 (in Russian).

*Статья перепечатана с разрешения автора из журнала «Морская радиоэлектроника» № 3 (77). Сентябрь 2021 г. С. 48-50.*

## СВЕДЕНИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

### Требования к предоставляемым материалам

Для публикации оригинальной статьи авторы представляют в редакцию следующие материалы:

1. Файл со статьей.
2. Файлы с рисунками (по отдельному запросу редакции). Предпочтительными вариантами являются векторные рисунки, выполненные в формате Visio (**vsd**) или в форматах метафайлов Windows (**wmf** или **emf**). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки представляются в растровых форматах **png** или **jpg**.
3. Сканированную копию экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию (в файле формата **jpg**, 300 dpi, в цвете).
4. Файл, содержащий сведения об авторском коллективе с указанием автора, который будет взаимодействовать с редакцией, с указанием его контактов.
5. 2 рецензии на статью.

### Требования к оформлению статей, представляемых в редакцию:

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

представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах **jpg** или **png**. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне, при этом рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами. По тексту статьи рисунки обозначаются, например, как рис. 1. Если рисунок или таблица единственные в статье, то их не нумеруют.

**В конце названий таблиц и рисунков точка не ставится. Ориентация рисунков и таблиц вертикальная, листа — книжная. Ширина рис. и табл. — до 17 см. Рисунки должны быть четкими, с хорошо проработанными деталями.**

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

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

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

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

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

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

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

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

### Рекомендации по написанию аннотации:

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

Аннотация должна включать в себя:

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

В аннотации следует использовать конструкции констатирующего характера, имеющие обезличенный характер (проанализировано, доказано, изложено и т. д.), а также оценочные стандартные словосочетания (уделено основное внимание, актуальный вопрос, важная проблема, и т. п.).

В аннотацию не следует включать иллюстрации, а также следует избегать формул, аббревиатур, специальных знаков, сокращений, условных обозначений и ссылок на номер публикации в списке литературы к статье и т. п.

Рекомендуется в тексте аннотации выделять Введение (Цели исследования, Постановка проблемы и т. п.), Результаты, Заключение (Новизна, Выводы, Практическая значимость). Большую часть аннотации должен составлять подраздел Результаты, в котором не следует использовать общие слова: «Проведены исследования...», «Разработана методика...», «Разработан модифицированный алгоритм...» и т. д., нужно описать суть исследования, методики, алгоритма.

Текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, лишних вводных слов (например, «автор статьи рассматривает...», «в этой статье...»), общих и незначачих формулировок. Не использовать будущее и настоящее время, в аннотации описывается уже сделанная научная работа.

Текст должен быть связным, с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), предложения должны логично вытекать одно из другого.

### Проверка на плагиат:

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

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

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ****КНИГА**

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

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

**СТАТЬЯ**

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

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

**КОНФЕРЕНЦИЯ**

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

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

**ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС**

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

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

**ПЕРЕВОДНАЯ КНИГА**

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

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

**ПАТЕНТ**

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

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