

ежемесячный научно-технический журнал по проводной
и радиосвязи, телевидению, радиовещанию

01/2022 ISSN 0013-5771



ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ

УСЛУГИ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ



ТЕМА НОМЕРА

Будущее сетей связи: сверхплотность
и ультрамалые задержки



В ДЕТАЛЯХ

Нужны системные исследования



АКТУАЛЬНО

Сети 5G и частотный вопрос

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Индивидуализированное
управление спасением
абонента

СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Алгоритм первоначальной
синхронизации в системах
с расширенным спектром



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИО ИМЕНИ М.И. КРИВОШЕЕВА»

ФГУП НИИР аккредитовано Федеральной службой по аккредитации в качестве органов по сертификации и в качестве испытательного центра.

Органы по сертификации ФГУП НИИР уполномочены проводить работы по сертификации технической продукции и систем менеджмента качества, оформлять и регистрировать сертификаты и декларации о соответствии техническим регламентам и ГОСТам.

Область аккредитации Испытательного центра ФГУП НИИР позволяет:

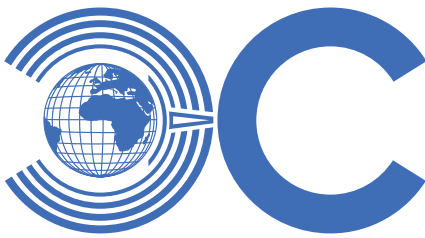
- проводить испытания на соответствие нормативно-правовым актам по правилам применения средств связи;
- проводить испытания на соответствие техническим регламентам Таможенного союза:
 - “О безопасности низковольтного оборудования” (ТР ТС 004/2011);
 - “Электромагнитная совместимость технических средств” (ТР ТС 020/2011);
 - “О безопасности колесных транспортных средств” (ТР ТС 018/2011);
 - “О безопасности машин и оборудования” (ТР ТС 010/2011);
 - а также на соответствие техническому регламенту “О безопасности объектов морского транспорта”.
- проводить сертификационные испытания технических средств обеспечения транспортной безопасности в соответствии с Правилами обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности, утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 сентября 2016 г. № 969 (систем и средств сигнализации, контроля доступа, досмотра, видеонаблюдения, аудио- и видеозаписи, связи, оповещения, сбора, обработки, приема и передачи информации, предназначенных для использования на объектах транспортной инфраструктуры и на транспортных средствах в целях обеспечения транспортной безопасности).

ФГУП НИИР признано в качестве испытательной лаборатории в «Морском регистре России», в «Речном регистре России» и в «Авиационном регистре МАК».

ФГУП НИИР имеет полномочия от ФСБ России по проведению технических экспертиз шифровальных средств.



Адрес: 105064, Москва, ул. Казакова, д.16.
Тел.: +7 (499) 261-32-19, www.niir.ru, e-mail: ic@niir.ru



ТЕМА НОМЕРА

3 Андрей Кучерявый.
Сети связи ожидает блестящее
научное будущее

В ДЕТАЛЯХ

- 6** Олег Иванов.
ФГУП НИИР подводит итоги
Года науки и технологий
- 8** Алексей Захаров.
НИИ радио нацелен на работу в долгие



НАУКА

СЕТИ И УСЛУГИ XXI ВЕКА

- 14** Кучерявый А.Е., Маколкина М.А.,
Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С.,
Матюхин А.Ю., Дунайцев Р.А., Владимиров С.С.,
Ворожейкина О.И., Захаров М.В., Фам В.Д.,
Марочкина А.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О.,
Анваржонов Б.Н.
Модельная сеть для исследований и обучения
в области услуг телеприсутствия

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- 21** Сарьян В.К., Мещеряков Р.В., Босомыкин Д.В.,
Захарова А.А., Козлова Н.В.
Архитектура системы индивидуализированного
управления спасением абонента
- 27** Сарьян В.К., Борисенко О.Д., Петренко А.К.,
Босомыкин Д.В., Козлова Н.В.
Программная платформа для реализации и
развертывания системы ИУСА
- 32** Бельфер Р.А., Кравцов А.В., Басараб М.А.
Установление соединений в имитаторах зонных
сетей передачи данных специального назначения
- 38** Остроумов О.А.
Проблема обеспечения функциональной
устойчивости систем критически важных
объектов

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ

- 43** Ясинский С.А., Зюзин А.Н.
Формирование телекоммуникационных
направлений с высокой структурно-поточковой
устойчивостью
- 47** Маслаков М.Л., Сауленко Е.П.
Влияние нелинейности передающих трактов на
характеристики OFDM сигналов

СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

- 52** Султанов Б.В., Дорошкевич В.В.
Алгоритм первоначальной синхронизации
в комбинированных системах с расширенным
спектром

РАДИОВЕЩАНИЕ И ТЕЛЕВИДЕНИЕ

- 56** Мишенков С.Л., Елифанова Е.С.
Использование временных задержек
при первичной обработке звуковых сигналов

CONTENTS

- 14** KOUCHERYAVY A.E.,
MAKOLKINA M.A.,
PARAMONOV A.I.,
VYBORNOVA A.I.,
MUTHANNA A.S.,
MATYUHIN A.Yu.,
DUNATSEV R.A.,
VLADIMIROV S.S.,
VOROZHEIKINA O.I.,
ZAHAROV M.V., FAM V.D.,
MAROCHKINA A.V.,
GORBACHEVA L.S.,
PANKOV B.O.,
ANVARZHONOV B.N.
Model network for research,
training, and testing in the area
of telepresence services
- 21** SARIAN V.K.,
MESHCHERYAKOV R.V.,
BOSOMIKIN D.V.,
ZAKHAROVA A.A., KOZLOVA N.V.
The architecture of the
individualized subscriber rescue
management system
- 27** SARIAN V.K.,
BORISENKO O.D.,
PETRENKO A.K.,
BOSOMIKIN D.V., KOZLOVA N.V.
Software platform for the
implementation and deployment
of individualized subscriber
rescue management system
- 32** BELFER R.A.,
KRAVTSOV A.V., BASARAB M.A.
Establishing connections in
simulators of special-purpose
zone data transmission networks
- 38** OSTROUMOV O.A.
The problem of ensuring the
functional stability of critical
objects systems
- 43** JASINSKII S.A., ZYUZIN A.N.
Formation of telecommunication
directions with high structural
and flow stability
- 47** MASLAKOV M.L.,
SAULENKO E.P.
Influence of nonlinearity of
transmission paths on OFDM
signals characteristics
- 52** SULTANOV B.V.,
DOROSHEVICH V.V.
The algorithm of initial
synchronization in hybrid spread
spectrum systems
- 56** MISHENKOV S.L.,
EPIFANOVA E.S.
The use of time delays in
the primary sound signals
processing
- 59** Abstracts



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ПО ПРОВОДНОЙ И
РАДИОСВЯЗИ, ТЕЛЕВИДЕНИЮ,
РАДИОВЕЩАНИЮ.
ОСНОВАН В 1933 ГОДУ

ISSN 0013-5771.
ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. 2022, № 01. 1-60.

Главный редактор В.В. Бутенко, д.т.н.

Редакционная коллегия:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Арт.С. Аджемов, д.т.н. | Н.В. Лемешко, д.т.н. |
| С.В. Бачевский, д.т.н. | В.Н. Лившиц, д.э.н. |
| В.А. Бурдин, д.т.н. | С.Л. Мишенков, д.т.н. |
| В.В. Витязев, д.т.н. | Н.Н. Мурашов |
| Е.Е. Володина, д.э.н. | Н.Н. Мухитдинов, к.э.н. |
| В.А. Григорьев, д.т.н. | А.Г. Назейкин, к.э.н. |
| (шеф-редактор) | А.П. Оситис, к.э.н. |
| В.А. Ефимушкин, к.ф.-м.н. | Н.П. Резникова, д.э.н. |
| Ю.Б. Зубарев, чл.-корр. РАН | Ю.М. Сподобаев, д.т.н. |
| О.А. Иванов, к.воен.н. | В.А. Стрелец, к.т.н. |
| С.В. Кизима, д.т.н. | М.М. Ступницкий, к.т.н. |
| А.Е. Крупнов, к.т.н. | В.О. Тихвинский, д.э.н. |
| А.Е. Кучерявый, д.т.н. | Р.В. Шередин, к.т.н. |

Ведущий редактор Ирина Богородицкая

Над номером также работали: Наталия Ефимова,
Евгения Волынкина, Елена Беленькая

Дизайн и верстка Екатерина Горожанкина

В соответствии с решением Президиума ВАК Минобрнауки
России журнал «Электросвязь» включен в Перечень ведущих
рецензируемых научных изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук
(<https://vak.minobrnauki.gov.ru>)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-45919 от 22.07.2011

Фото на обложке SCHUTTERSTOCK.COM

Адрес редакции: 105064, Москва, Казакова, 16

Тел.: +7 (495) 647-17-65.

E-mail: elsv@garnet.ru. Сайт: www.elsv.ru

Учредители: Региональное содружество в области связи,
Международная академия связи, Российское научно-техническое
общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова,
ООО «Инфо-Электросвязь»

Сдано в набор 17.12.2021. Подписано в печать 17.01.2022.

Печать офсетная. Формат 60х90х8.

Усл. кр.-отт. 364 800. Уч.-изд. л. 9,5. Усл. печ. л. 19.

Отпечатано в типографии: ООО «МЕДИАКОЛОР».

127273, Москва, Сигнальный проезд, д. № 19, стр. 1

тел./факс: +7 (499) 903-69-52, +7 (499) 903-69-53

Тираж 3000 экз.

За содержание рекламных материалов

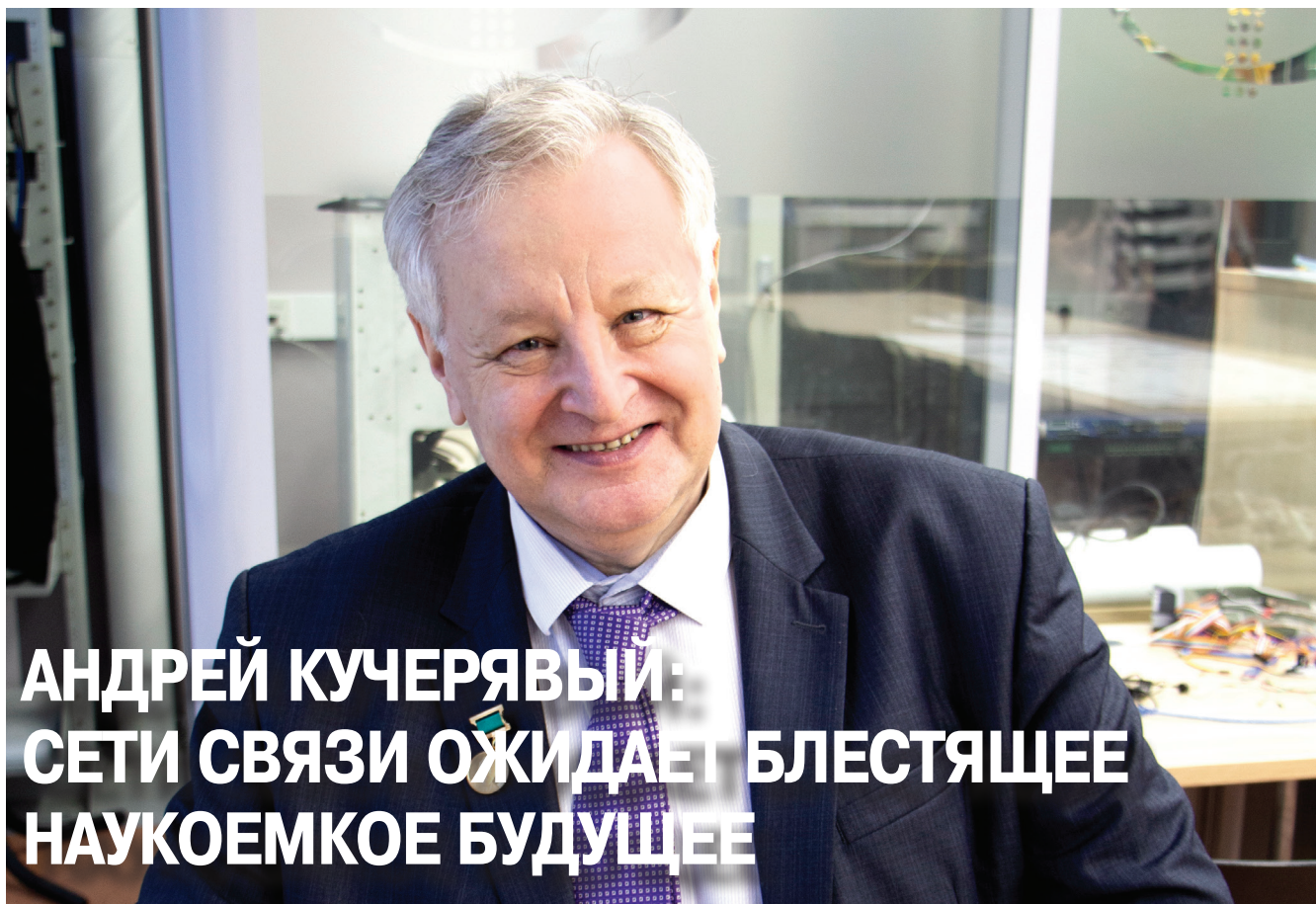
редакция ответственности не несет.

© 000 «Инфо-Электросвязь»

Подписные индексы по каталогам:

«Пресса России» — 41411,

«Урал-Пресс» — 71107



АНДРЕЙ КУЧЕРЯВЫЙ: СЕТИ СВЯЗИ ОЖИДАЕТ БЛЕСТЯЩЕЕ НАУКОЕМКОЕ БУДУЩЕЕ

Журнал «Электросвязь» уделяет достаточно много внимания вопросам развития цифровой экономики. Продолжая эту традицию, в качестве темы первого номера 2022 года представляем услуги телеприсутствия. Почему эта технология выходит на первый план сегодня, хотя ее широкое внедрение изначально планировалось только в 2030 году? Почему уже ведутся теоретические и экспериментальные исследования и, более того, создаются модельные сети, в которых реализованы сверхплотность и ультрамалые задержки?.. Ответы на эти вопросы – в научной статье «Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия» (с. 14-20), написанной специалистами кафедры сетей связи и передачи данных (СС и ПД) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Именно здесь, в «Бонче», в ноябре минувшего года была запущена такая модельная сеть нового поколения. Хороший финал для завершения Года науки в России!

О своем детище – доктор технических наук, профессор СПбГУТ, заведующий кафедрой СС и ПД, вице-председатель 11-й Исследовательской комиссии МСЭ-Т в период 2005–2012 годов и ее председатель с 2017 года по настоящее время, член редколлегии «Электросвязи» Андрей Кучерявый.



ЭС: Андрей Евгеньевич, что вы рассказываете своим студентам про цифровую экономику и сети связи?

— Цифровая экономика является одним из важнейших направлений развития государства, причем непосредственно связанным с развитием информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). И при всем том роль сетей связи в построении цифровой экономики мне представляется недооцененной. Базируясь на традиционных представлениях об основных показателях ИКТ, таких как число пользователей интернета, абонентская база широкополосного доступа и т.п., мы иногда забываем об одной из основных целей построения эффективной цифровой экономики — необходимости сокращения цифрового разрыва между регионами России. Цифровое неравенство надо сокращать принципиально.

ЭС: Об этом много говорят. Но как подкрепить слова делами?

— На сегодняшний день, как я думаю, существует конструктивное решение в этом направлении — опережающее внедрение сетей связи пятого и последующих поколений. В сетях 5G+ много разнообразных привлекательных направлений, однако с точки зрения сокращения цифрового разрыва исключительно важным является построение сетей связи с ультрамалыми задержками. Это квинтэссенция прогресса, достигнутого в понимании развития сетей связи в обозримой перспективе.

ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

ЭС: Данная тема в последние годы весьма успешно обсуждается и на страницах «Электросвязи». Хотелось бы сделать акцент на основных преимуществах масштабного внедрения таких сетей.

— Уже сегодня уровень проникновения услуг сетей связи с ультрамалыми задержками определяется более чем в 60% к 2030 году («Электросвязь», 2020, № 12). Что это дает экономике? В первую очередь, конечно же, речь идет о децентрализации сетей связи и создании предпосылок для децентрализации экономики.

Действительно, в сетях связи при круговой задержке в 1 мс услуги могут быть предоставлены с заданными требованиями по уровню качества обслуживания и/или качества восприятия в круге радиусом 50 км. При этом очевидной становится необходимость размещения центров обработки данных (ЦОД) в каждом(!) областном и районном центре Российской Федерации. Успешное решение этой задачи и создает предпосылки для принципиального сокращения цифрового разрыва в условиях построения цифровой экономики.

Организация работы ЦОДов — это сложный процесс, который, естественно, требует высококвалифицированного персонала. Данный факт должен стать движущей силой сокращения цифрового разрыва, поскольку ценный специалист высокого класса не только требует соот-

ветствующей оплаты труда, но и формирует вокруг себя иное цифровое пространство.

Заметим при этом, что на данном этапе доля работников с высшим образованием в области информатизации и связи составляет 64%, что уступает только финансовой и страховой деятельности (70,1%), — но там-то никакой продукт не производится.

УСЛУГИ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ

ЭС: Обратимся непосредственно к теме номера. Голографические коммуникации, роботы-аватары — все это уже не фантастика?

— Еще одно важнейшее преимущество сетей связи с ультрамалыми задержками — широкий спектр предоставления услуг телеприсутствия. Первоначально в концепции «Сети-2030» («Электросвязь», 2018, № 11) внедрение услуг телеприсутствия планировалось на 2030 год. Но пандемия перевернула все наши представления, и сейчас услуги телеприсутствия выходят на лидирующие позиции в направлениях развития сетей связи. Реализация этих услуг позволит не только поднять уровень противодействия пандемии и подобным явлениям посредством использования сетей связи («Электросвязь», 2020, № 5), но и в определенной мере обеспечить защиту врачам и всем жителям страны от контактов с больным человеком.

Так что в ответ на этот вопрос можно сказать: к услугам телеприсутствия, которые будут предлагаться уже на краткосрочном горизонте планирования с требуемым качеством обслуживания и/или качеством восприятия, относятся передача по сети связи голографических копий человека и удаленное управление роботами-аватарами.

Если кому-то эти утверждения покажутся несбыточными, ждем скептиков у себя на кафедре сетей связи и передачи данных. Желающие могут принять участие в экспериментах на модельной сети исследований и обу-

чения в области услуг телеприсутствия. Она была создана всего пару месяцев назад — в ноябре 2021 года. Статья о функциональности сети приведена в этом номере.

ЭС: Да, страницу 14, на которой начинается ваша статья, трудно не заметить — в журнале впервые, пожалуй, за 89 лет участвует такой представительный коллектив авторов.

— Время ученых-одиночек давно прошло. Задачи же по сетям связи настолько масштабны и наукоемки, что их под силу решать только большим коллективам. И желательным таким, где преобладают молодые доктора и кандидаты наук и к исследованиям привлекаются аспиранты и магистранты. В статьях ученых из Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) участвует еще больше авторов — и подобный формат совместной деятельности никого не удивляет. Будем к этому привыкать и в нашей специальности.

ЭС: Номер — новогодний. Ваш прогноз на 2022 год?

— Резюмируя, можно сказать, что сети связи ожидают блестящее наукоемкое будущее. Интересной работы хватит всем...

ЭС: Как тут не вспомнить классика: «Будущее светло и прекрасно. Любите его, стремитесь к нему, работайте для него, приближайте его, переносите из него в настоящее, сколько можете перенести...». Ваш призыв к кому обращен?

— В первую очередь к тем, кто сегодня получает высшее образование в профильных университетах Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций.

А дальше все понятно. Ближайшие десять лет пройдут под флагом создания новой сети связи страны и сокращения на ее основе цифрового разрыва между регионами Российской Федерации. ■



ФГУП НИИР ПОДВОДИТ ИТОГИ ГОДА НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ



Как эффективнее внедрять передовые разработки в жизнь? Как привлечь в сферу науки талантливую молодежь, повысить сопричастность профессионального сообщества к реализации стратегии научно-технологического развития России? Решить эти вопросы был призван Год науки и технологий, под знаком которого работали исследовательские организации в 2021 году. О достижениях НИИ радио и перспективах дальнейшего роста — и.о. генерального директора ФГУП НИИР Олег Иванов.

ЭС: Олег Анатольевич, как вы оцениваете научный потенциал НИИ радио?

— Предоставление сотрудникам института широких возможностей для проведения полноценных научных исследований — одна из первоочередных задач руководства любого НИИ. Движущей силой этого процесса является работа по формированию кадрового ресурса. Профессиональный уровень и квалификация научных сотрудников подтверждаются формальными признаками: учеными степенями и званиями, публикациями, изобретениями. В настоящее время в НИИ радио трудятся 20 докторов наук и 68 кандидатов наук. За 2021 год сотрудниками института подготовлено более 80 научных публикаций в ведущих специализированных изданиях. Повысилась и конференционная активность — бренд НИИР стал заметнее.

В минувшем году были приняты масштабные планы по реализации целого ряда прорывных проектов в области электросвязи/ИКТ. На этапе завершения — формирование новых центров исследований по следующей тематике: беспроводные технологии связи, инфраструктура телекоммуникационных систем, спутниковая связь и вещание, магистральные и транспортные сети связи, квантовые коммуникации, сети доступа, системы обработки больших данных, подвижная связь. Эти структуры уже имеют наработки по научно-исследовательским работам (НИР) на весь 2022 год и частично на 2023 год.

Новые центры возглавили специалисты высокой квалификации, большинство из них имеют степень доктора наук или планируют защищать диссертацию. Процесс подготовки кадров здесь только предстоит сформировать, но практика работы давно существующих научно-технических центров ФГУП НИИР говорит о том, что их опыт можно масштабировать и использовать апробированную модель с некоторыми доработками, потому что каждый центр — это уникальное научное образование и требует индивидуального подхода.

Сейчас в российской науке и сфере технологий происходят мощные трансформационные процессы. В целях модернизации приоритетных отраслей экономики к НИИ радио присоединяется ЦНИИС. Укрупнение направлено на ликвидацию дефицита системных исследований в сфере телекоммуникаций, которые не дают быстрых эффектов сегодня, но являются заделом на будущее.

Предприятие расширяет сотрудничество с учебными заведениями, в частности с Московским техническим университетом связи и информатики. НИИР стал победителем конкурса, организованного МТУСИ, на выполнение НИР по перспективным беспроводным технологиям связи, интеллектуальным антенным системам

для беспроводной связи и технологиям квантовых коммуникаций. В нескольких совместных проектах инновационного характера, которые носят более глубокий, фундаментальный характер, в частности по модемам, наши организации выступают одновременно заказчиком и соисполнителем. Объединение университетов и научных учреждений вокруг больших проектов дает накопительный эффект, при этом мотивация и интересы участников кооперации сохраняются. Кроме того, на площадке МТУСИ эффективно работает базовая кафедра НИИР по электромагнитной совместимости и управлению радиочастотным спектром (ЭМС и УРЧС) и более десяти сотрудников предприятия занимаются педагогической деятельностью.

Интеграция в рамках единого научно-производственного кластера, умножающая эффект от выполнения задач, увязывается с тем, что институт делал в лучшие свои годы и на что направлены наши усилия в настоящий момент.

ЭС: Какие сегодня есть научные школы в НИИ радио? Под чьим брендом они развиваются?

— Одну из таких научных школ — по направлению электромагнитной совместимости — возглавляет доктор технических наук В.Э. Веерпалу. Он является директором НТЦ анализа ЭМС. В этом одном из старейших центров института процесс подготовки научных кадров поставлен на системную, логическую основу, что позволяет готовить специалистов требуемой квалификации. В 2021 году три сотрудника центра успешно защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата технических работ. Подобных примеров много — и будет еще больше. ■

НИИ РАДИО НАЦЕЛЕН НА РАБОТУ ВДОЛГУЮ



Алексей Захаров, заместитель генерального директора ФГУП НИИР по науке

ЭС: Алексей Алексеевич, что, по вашему мнению, было самым заметным событием в жизни института в 2021 году?

— В НИИ радио, как известно, произошла смена руководства — на должность генерального директора был назначен О.А. Иванов. Одним из первых его шагов на этом посту стал поиск дополнительных направлений деятельности института — прежде всего связанных с разработкой суверенных технологий и созданием инфраструктурных платформ для их внедрения. Так возникла идея создания исследовательских центров по определенной тематике.

У любого процесса есть начало и должен быть заключительный этап. В настоящий момент итоги работы каждого сформированного центра определяются степенью готовности его облика, структуры и задела на 2022 год. Эта задача, поставленная руководством института, в течение последнего квартала 2021 года была для нас приоритетной. В конце ноября в докладе генеральному директору предприятия были представлены пакеты договоров, заключенных с различными структурами: вузами, коммерческими организациями, государственными ведомствами.

Сегодня 12 центров исследований имеют штатную структуру, адаптированную под задачи, которые исходят в первую очередь от Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федера-

ции, от заказчиков и самого предприятия, деятельность которого сопровождается модернизацией инфраструктуры, оборудования, методик и т.д. В результате на текущий 2022 год сотрудники ФГУП НИИР обеспечены заказами на научные исследования, работой и зарплатой. Частично есть задел и на 2023 год (подробнее о работе некоторых центров см. ниже — в интервью их директоров).

ЭС: 2023 год — это среднесрочные планы? А что можно сказать о работе в долгую?

— Горизонт планирования может быть разным: краткосрочный — на год, среднесрочный — на два года. Некоторые работы НИИР планирует на три года, потому что исследовательские и технологические процессы носят прикладной характер и должны завершаться созданием определенного продукта — программных или аппаратных средств.

В планах научно-исследовательских работ на 2023–2024 годы поставлена задача выйти на выпуск опытных образцов: аппаратной части («железа») либо одновременно аппаратной и программной. Выпуск серийных образцов не входит в компетенции предприятия, хотя мелкосерийное производство возможно.

ЭС: Где сегодня защищают свои научные работы соискатели из НИИ радио?

— Наши аспиранты защищаются во многих вузах — это МТУСИ, СПбГУТ им. Бонч-Бруевича, МАИ, МВТУ имени Н.Э. Баумана и др.

Но надо иметь в виду, что в течение 2022 года должен завершиться процесс присоединения к ФГУП НИИР Центрального научно-исследовательского института связи (ФГУП ЦНИИС). Мы рассчитываем на людей, которые там работают: это профессионалы высокого уровня. Научный потенциал двух ведущих НИИ отрасли будет задействован для реализации общих целей. В частности, на базе единого предприятия к началу 2023 года предполагается организационно оформить объединенный диссертационный совет МТУСИ, НИИР и ЦНИИС по определенным направлениям деятельности.

Сегодня многие государственные, коммерческие, учебные организации обладают значительными интеллектуальными ресурсами. Это, во-первых, профессорско-преподавательский состав, владеющий необходимыми компетенциями, и во-вторых — обучающиеся, те, кто готовится реализовывать программы научных исследований. Интеграция НИИР в такое широкое образовательное пространство реализуется в рамках федерального проекта «Кадры для цифровой экономики».

Генеральный директор предприятия определил задачу поиска молодых перспективных научных кадров по профилю деятельности института как приоритетную. С этой целью был объявлен конкурс для студентов МТУСИ по востребованной НИИР тематике: электромагнитная безопасность, построение сетей 5G и 6G, спутниковая связь, искусственный интеллект. Цель конкурса — вы-

явить перспективных потенциальных сотрудников. Его итоги были объявлены 29 декабря 2021 года на заседании ученого совета МТУСИ. Помимо денежных призов, победители получили возможность стажироваться в НИИР, участвовать в работе новых исследовательских центров. В 2022 году институт планирует привлечь к конкурсу и другие смежные вузы. ■

НАУКА

46

страниц
отраслевых
научных работ

14 Кучерявый А.Е., Маколкина М.А.,
Парамонов А.И., Выборнова А.И.,
Мутханна А.С., Матюхин А.Ю.,
Дунайцев Р.А., Владимиров С.С.,
Ворожейкина О.И., Захаров М.В.,
Фам В.Д., Марочкина А.В.,
Горбачева Л.С., Паньков Б.О.,
Анваржонов Б.Н.

Модельная сеть для исследований
и обучения в области услуг
телеприсутствия

21 Сарьян В.К., Мещеряков Р.В.,
Босомыкин Д.В., Захарова А.А.,
Козлова Н.В.

Архитектура системы
индивидуализированного
управления спасением абонента

27 Сарьян В.К., Борисенко О.Д.,
Петренко А.К., Босомыкин Д.В.,
Козлова Н.В.

Программная платформа для
реализации и развёртывания
системы ИУСА

32 Бельфер Р.А., Кравцов А.В.,
Басараб М.А.

Установление соединений
в имитаторах зонных сетей
передачи данных специального
назначения

38 Остроумов О.А.

Проблема обеспечения
функциональной устойчивости
систем критически важных объектов

43 Ясинский С.А., Зюзин А.Н.

Формирование
телекоммуникационных направлений
с высокой структурно-поточковой
устойчивостью

47 Маслаков М.Л., Сауленко Е.П.

Влияние нелинейности передающих
трактов на характеристики OFDM
сигналов

52 Султанов Б.В., Дорошкевич В.В.

Алгоритм первоначальной
синхронизации в комбинированных
системах с расширенным спектром

56 Мишенков С.Л., Епифанова Е.С.

Использование временных задержек
при первичной обработке звуковых
сигналов

РАЗДЕЛЫ

УСЛУГИ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ 14-20

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ 21-42

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ 43-51

СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ 52-55

РАДИОВЕЩАНИЕ И ТЕЛЕВИДЕНИЕ 56-58

Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия

А.Е. Кучерявый, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных, профессор, д.т.н.; akouch@mail.ru

М.А. Маколкина, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, профессор кафедры сетей связи и передачи данных, доцент, д.т.н.; makolkina@list.ru

А.И. Парамонов, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, профессор кафедры сетей связи и передачи данных, доцент, д.т.н.; alex-in-spb@yandex.ru

А.И. Выборнова, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; a.vybornova@gmail.com

А.С. Мутханна, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; ammarexpress@gmail.com

А.Ю. Матюхин, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; matukhin@list.ru

Р.А. Дунайцев, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; roman.dunaytsev@mail.ru

С.С. Владимиров, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, доцент кафедры сетей связи и передачи данных, к.т.н.; vladimirov.opds@gmail.com

О.И. Ворожейкина, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, заведующий лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных; bonmot@yandex.ru

М.В. Захаров, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, старший преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных; max_z.93@mail.ru

В.Д. Фам, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, аспирант кафедры программной инженерии и вычислительной техники; daipham93@gmail.com

А.В. Марочкина, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, ассистент кафедры сетей связи и передачи данных; anastasiy1996@mail.ru

Л.С. Горбачева, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, ассистент кафедры сетей связи и передачи данных; 777gls@mail.ru

Б.О. Паньков, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, магистрант кафедры сетей связи и передачи данных; bogdan.usman48@yandex.ru

Б.Н. Анваржонов, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, магистрант кафедры сетей связи и передачи данных; anvarjonovb@gmail.com

УДК 621.319

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.001

Аннотация. Рассматриваются архитектура и характеристики модельной сети нового поколения, предназначенной для исследований, обучения и тестирования в области услуг телеприсутствия. Для построения модельной сети используются: терабитное ядро, разнообразное серверное оборудование, голографические вентиляторы, 3D-камеры и проекторы, роботы-аватары и многофункциональные роботы, терминальные устройства дополненной реальности, а также интернет вещей для создания моделей сверхплотных сетей. Приводятся первые результаты испытаний, на основе которых в дальнейшем могут быть разработаны требования к параметрам качества обслуживания и восприятия при предоставлении услуг телеприсутствия.

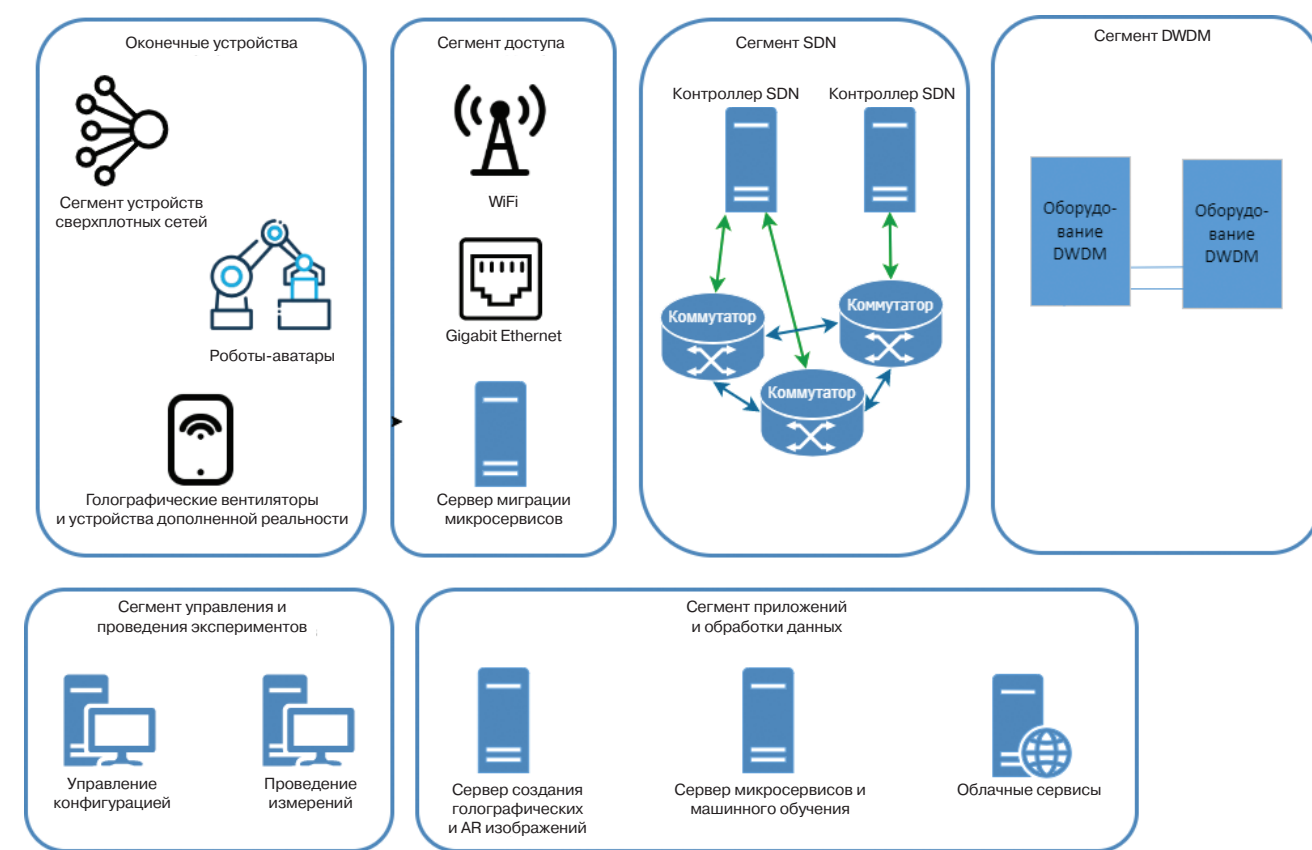
Ключевые слова: модельная сеть, услуги телеприсутствия, голографические коммуникации, дополненная реальность, трехмерное пространство, роботы-аватары, многофункциональные роботы.

ВВЕДЕНИЕ

Наступило время сетей связи пятого [1, 2] и последующих поколений [3, 4], принципиально отличающихся от сетей предыдущих поколений не только гетерогенностью [5, 6], но и численными характеристиками. Причем численные характеристики настолько отличаются от известных до настоящего времени, что в соответствии с законом диалектики Гегеля [7] количество переходит в качество. Естественно, имеем в виду сверхплотные сети [8, 9] и сети связи с ультрамалыми задержками [10, 11]. Первым современные сети связи обязаны концепции интернета вещей [12, 13], а вторым — концепции тактильного интернета [14, 15].

Уже более 25 лет каждый этап развития сети сопровождается созданием модельных сетей соответствующего уровня. Так было для цифровых АТС в ЛОНИИС [16], для пакетных сетей связи следующего поколения в — ЦНИИС [17], для интернета вещей — на кафедре сетей связи и передачи данных в СПбГУТ [18, 19]. Пришло время для создания модельной сети в области сверхплотных сетей и сетей связи с ультрамалыми задержками. Однако в эволюционный процесс создания модельных сетей вмешалась пандемия и создание модельной сети нового поколения потребовало учесть требования к сетям связи в новых условиях [20].

Рисунок 1
Структура модельной сети



Речь идет об услугах телеприсутствия, широкомасштабное внедрение которых ранее планировалось на 2030 г. [21, 22]. Эти услуги могут оказаться незаменимыми в условиях пандемии и, естественно, требуют проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также обучения бакалавров, магистров и аспирантов. Все это и привело к созданию на кафедре сетей связи и передачи данных СПбГУТ модельной сети нового поколения в области услуг телеприсутствия.

АРХИТЕКТУРА МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ

На рис. 1 приведена структура модельной сети, состоящая из трех сегментов: сетей высокой плотности; передачи изображений дополненной реальности (ДР) и голографических изображений; роботов-аватаров и многофункциональных роботов. Кроме того, для проведения исследований на сетевом уровне созданы сегмент высокопроизводительного ядра сети на базе отечественного оборудования DWDM производства компании T8 [23] и сегмент программно-конфигурируемой сети SDN [24, 25].

Также в рамках модельной сети развернуты сегменты управления конфигурацией и проведения экспериментов, сегмент приложений и обработки данных, позволяющий создавать трехмерные видеоизображения для голографических приложений и приложений ДР, а

также использовать возможности машинного обучения при создании приложений для роботов-аватаров.

Рассмотрим возможности ядра сети, поскольку от него во многом зависит, сможем ли мы вообще работать с услугами телеприсутствия, так как из литературы известно, что передача голографических изображений с требуемым качеством может потребовать терабитных скоростей.

ЯДРО МОДЕЛЬНОЙ СЕТИ

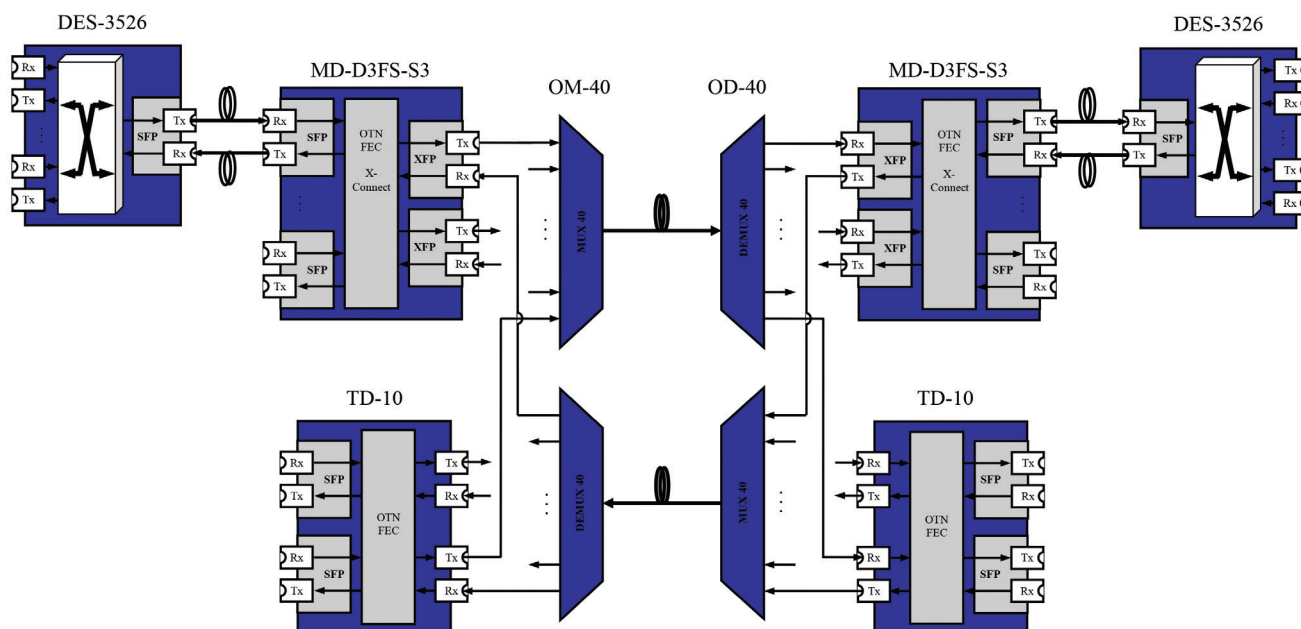
На рис. 2 представлена структура ядра модельной сети, реализованного с использованием мультисервисной DWDM-платформы «Волга» и коммутаторов DES-3526 от D-Link. Мультисервисная платформа предназначена для построения высокоскоростных DWDM-сетей и в данном исполнении позволяет организовать до 40 каналов с пропускной способностью до 100 Гбит/с каждый. Таким образом, суммарная пропускная способность составляет до 4 Тбит/с.

DWDM-платформа имеет следующую структуру.

1. Управляемые оптические мультиплексоры (OM-40) и демultipлексоры (OD-40). Они предназначены для объединения отдельных сигналов DWDM-каналов в один спектрально-уплотненный линейный оптический сигнал при мультиплексировании и для разделения спектрально-уплотненного линейного оптического сигнала

Рисунок 2

Структура ядра модельной сети



на отдельные сигналы DWDM-каналов при демультимплексировании. Уровень сигнала в каждом оптическом канале мультиплексора регулируется встроенным оптическим аттенуатором с шагом перестройки 0,1 дБ.

2. Оптический сигнал DWDM-канала подается на один из входных портов, далее — на переменный оптический аттенуатор, с выхода которого поступает на волновод, где происходит объединение отдельных компонентных сигналов DWDM-каналов в единый агрегатный спектрально-уплотненный линейный оптический сигнал. В демультимплексоре с помощью фильтров осуществляется разделение линейного оптического сигнала на отдельные сигналы DWDM-каналов. Блоки поддерживают до 40 каналов.
3. Транспондер (TD-10) и агрегирующий транспондер (MD-D3FS). Транспондер выполняет 3R-регенерацию клиентского оптического сигнала 10 Гбит/с и передает его на вход оптического DWDM-канала мультиплексора. Таким образом выполняется адаптация клиентского сигнала для его передачи по DWDM-каналу. Сигнал, поступающий с демультимплексора, подвергается обратному преобразованию. Клиентские интерфейсы формируются с помощью XFP-модулей и могут быть следующими: 10GE, STM-64, OTU2, а линейный интерфейс — OTU2. Скорость передачи информации составляет 10,7 Гбит/с. В транспондере TD-10 поддерживается передача одного или двух клиентских сигналов, алгоритмы коррекции ошибок при этом не используются.

Агрегирующий транспондер осуществляет 3R-регенерацию и передает один клиентский сигнал STM-64 или объединяет два клиентских потока GE, STM-1 либо STM-4 в линейный сигнал OTN OTU1. Как клиентские, так и линейные интерфейсы организуются с помощью SFP-модулей. Следует заметить, что в отличие от TD-10 агрегирующий транспондер поддерживает процедуры коррекции ошибок FEC G.709 или Super-FEC G.975.

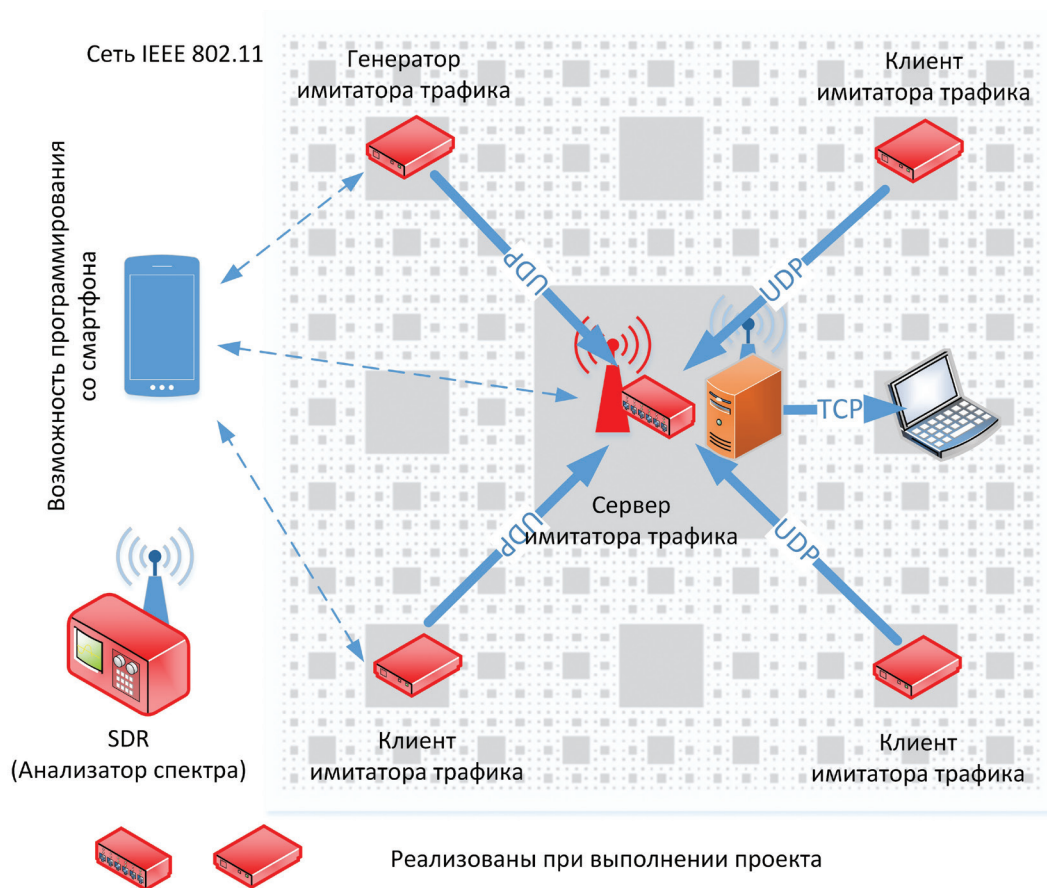
Таким образом, в данной комплектации DWDM-платформа позволяет поддерживать клиентские интерфейсы STM-1, STM-4, GE, STM-16, 10GE, STM-64 и OTU2 со скоростями от 155 Мбит/с (155 520 кбит/с) до 10,7 Гбит/с.

Как следует из рис. 2, со стороны клиентских интерфейсов к системе DWDM подключены коммутаторы DES-3526 от D-Link, реализующие топологию «звезда». Для организации интерфейсов, обеспечивающих связь коммутаторов с системой DWDM, используются SFP-модули (Mini GBIC), поддерживающие скорости передачи информации от 155 Мбит/с (155 520 кбит/с) до 10 Гбит/с (10,7 Гбит/с), а со стороны терминалов поддерживаются интерфейсы Ethernet, Fast Ethernet и Gigabit Ethernet со скоростями от 10 Мбит/с до 2 Гбит/с. При этом существует возможность программно изменять пропускную способность каждого порта с шагом 1 Мбит/с.

В ходе экспериментальных исследований между оконечными станциями DWDM-системы устанавливается переменный оптический аттенуатор, шаг изменения затухания в котором составляет 0,05 дБ. Увеличение затухания аттенуатора приводит к возрастанию веро-

Рисунок 3

Структура сегмента сети высокой плотности



ятности ошибки в системе, что в случае применения протоколов с переспросом порождает временную задержку, а при использовании протоколов со стиранием вызывает потерю пакетов.

СЕГМЕНТ СЕТЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

На рис. 3 представлена структура сегмента модельной сети высокой плотности, позволяющего имитировать работу беспроводной сети с высокой плотностью узлов. Сегмент включает в себя набор программируемых контроллеров, поддерживающих беспроводные интерфейсы связи, которые дают возможность имитировать работу узлов сети высокой плотности различной конфигурации. При их размещении в ограниченном пространстве возникают взаимные влияния, характерные для сетей с высокой плотностью устройств.

Для исследования функционирования сети стенд содержит программно-определяемое радио (SDR) и точки доступа. Разработанное программное обеспечение позволяет реализовать функции генерации трафика пользователей и гибко управлять использованием ресурсов сети.

На рис. 4 приведены результаты наблюдения за скоростью передачи данных между точкой доступа и кли-

ентским устройством при увеличении числа соседних устройств, производящих трафик в рабочем канале (от 0 до 4 устройств). На рис. 5 показана аналогичная зависимость при загрузке трафиком соседнего канала (а) и энергетический спектр, полученный с помощью SDR (б).

Приведенные примеры иллюстрируют возможности модельной сети в части организации исследований состояния сети высокой плотности доступными средствами за достаточно малое время, что позволяет использовать сегмент сети в образовательном процессе. Все элементы сегмента модельной сети могут гибко изменять функциональность, а в качестве терминалов и средств программирования могут быть использованы обычные смартфоны, что даст возможность значительно увеличить число устройств, используемых для исследований и обучения на модельной сети.

На представленном сегменте сети высокой плотности возможно исследование влияние структуры сети, определяемой различными фрактальными фигурами, что может быть использовано для планирования конкретных сетей связи высокой плотности. В качестве таких фигур могут быть выбраны салфетки Серпинского, кривые Гильберта, Пеано и др. [24].

Рисунок 4

Результаты анализа зависимости скорости передачи от загрузки канала в условиях влияния соседних устройств

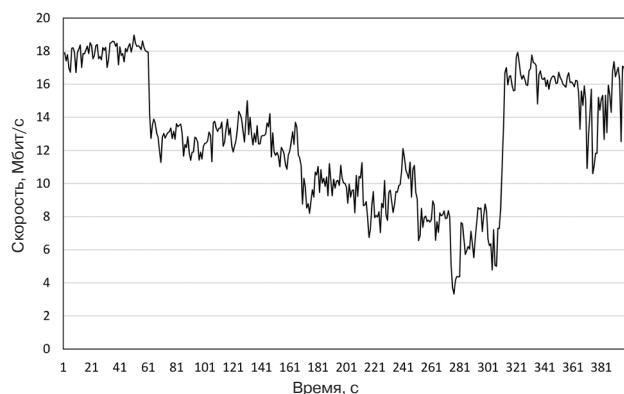
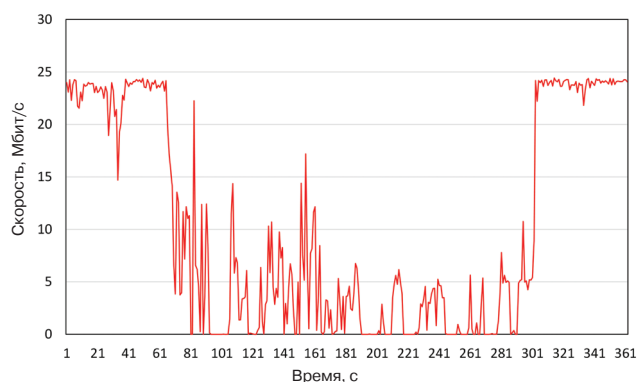
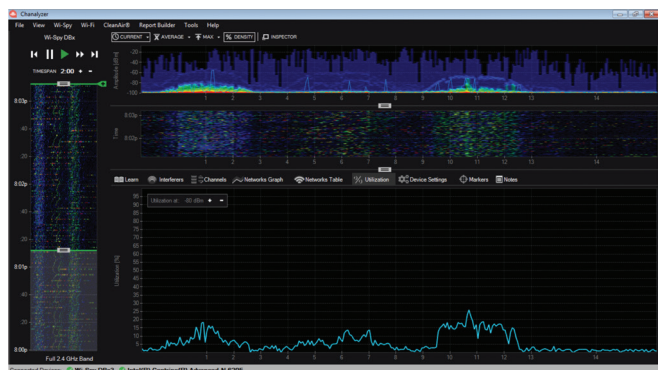


Рисунок 5

Результаты анализа зависимости скорости передачи от загрузки соседнего канала



а)



б)

СЕГМЕНТ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В обозримом будущем одной из наиболее востребованных услуг телеприсутствия видится передача по сети голографических копий человека и изображений дополненной реальности.

Существует несколько подходов к формированию голографических изображений или изображений ДР. Все

эти подходы подразумевают видеофиксацию объекта с помощью нескольких камер с разных ракурсов. При этом могут применяться как обычные камеры, записывающие информацию в видимом спектре радиоволн, так и камеры, которые дополнительно к этому могут зафиксировать расстояние до объекта (глубину сцены), чаще всего с помощью инфракрасных излучателей и датчиков. Использование данных о глубине позволяет сократить общее число камер, однако в этом случае требуются математические модели формирования трехмерных объектов из массива данных о цвете частей объекта и расстоянии до них. В лаборатории используются камеры с измерением глубины Microsoft Kinect и Intel RealSense.

После сбора информации с помощью камер встает вопрос о том, какое представление лучше выбрать для передачи данных по сети. В частности, можно передавать весь массив изображений со всех камер, однако следует заметить, что такой подход потребует значительной пропускной способности сети, так как в перспективе массово будут использоваться камеры с высоким разрешением, глубиной цвета и числом кадров в секунду. При этом даже для одной камеры требуемая полоса пропускания может составлять десятки гигабит в секунду, а для создания трехмерного видеоизображения потребуются десятки или даже сотни камер.

Другим подходом является формирование на передающей стороне непосредственно трехмерного объекта с последующей передачей по сети данных о составляющих его объемных элементах вместо многомерного массива видеоизображений. Такой подход, с одной стороны, позволяет в некоторых случаях заметно уменьшить требования к полосе пропускания сети, а с другой — требует заметных вычислительных ресурсов на передающей стороне, необходимых для создания трехмерного объекта по данным с множества камер.

Воспроизведение голографических изображений и изображений ДР возможно также с использованием нескольких подходов. Если для приложения нужен только взгляд на трехмерный объект с одного ракурса, могут быть применены технологии формирования стереоизображения с помощью очков с цветными линзами, активных 3D-очков и других аналогичных технологий. В этом случае требуется передача всего двух видеоизображений — по одному для каждого глаза. При этом изображение может быть выведено как на монитор или проектор, так и на голографический вентилятор, что позволяет создать иллюзию голограммы (в лаборатории используют голографические вентиляторы DseeLab-65H и N20).

Однако более интересна задача воспроизведения трехмерных объектов с разных ракурсов. Тогда несколько пользователей смогут одновременно рассматривать видеоизображение, при этом каждый получает свой вариант в соответствии с его положением относительно объекта. Наиболее простой вариант воспроизведения таких объектов — очки ДР (в лаборатории используются

очки производства Epson) или смартфоны с поддержкой ДР. Более дорогостоящими вариантами являются сложные системы с применением интерференции световых волн.

На рис. 6 приведена зависимость для оценки влияния затухания на скорость передачи голографических изображений, из которой видно, что существенное уменьшение скорости наблюдается уже при 24 дБ. Это подтверждает гипотезу о том, что при расстояниях примерно 100 км (односторонняя задержка из-за среды распространения составляет около 1 мс) предоставление услуг телеприсутствия затруднено. Соответственно, при круговой задержке будем иметь радиус цифрового кластера около 50 км.

На рис. 7 представлена зависимость потерь пакетов при передаче голографических изображений от затухания. Соответственно, мы можем еще раз убедиться в том, что расстояния в районе 100 км являются критичными для предоставления услуг телеприсутствия с требуемым качеством обслуживания и/или качеством восприятия.

СЕКТОР РОБОТОВ-АВАТАРОВ И МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РОБОТОВ

Для этого сектора получены результаты по удаленному управлению многофункциональным роботом Dobot Magician. Обладая пятью насадками, он может выполнять следующие функции:

- печатать 3D-объекты — насадка 3D Printer;
- писать и рисовать — захват для ручки;
- выполнять лазерную гравировку — насадка-лазер;
- перемещать объекты — вакуумный захват и механический захват с пневматическим приводом.

Проведены экспериментальные исследования по удаленному управлению многофункциональным роботом для функции перемещения объектов. На рис. 8 показана зависимость коэффициента доставки команд от затухания. Видно, что эффект 100 км при односторонней задержке может быть и в таком случае. Следует отметить, что при этом робот Dobot Magician зависает в пространстве и не может выполнить операцию по перемещению объекта.

ВЫВОДЫ

1. Сети связи пятого и последующих поколений требуют создания модельных сетей, учитывающих их особенности: сверхплотность и ультрамалые задержки. В условиях пандемии особую значимость приобретают услуги телеприсутствия.
2. Ядро модельной сети построено на базе оборудования DWDM с возможностью обеспечения скоростей передачи данных до 4 Тбит/с.
3. Модельная сеть состоит из трех взаимосвязанных сегментов: сетей высокой плотности, передачи голографических изображений и

Рисунок 6

Влияние затухания на скорость передачи голографических изображений

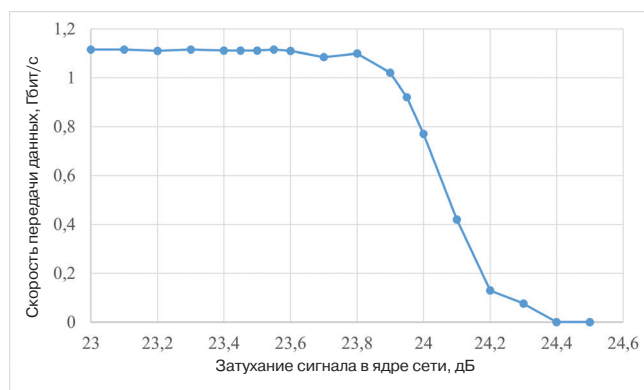


Рисунок 7

Влияние затухания на долю потерянных пакетов

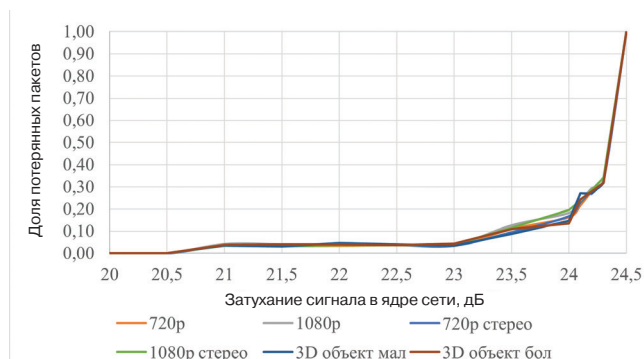
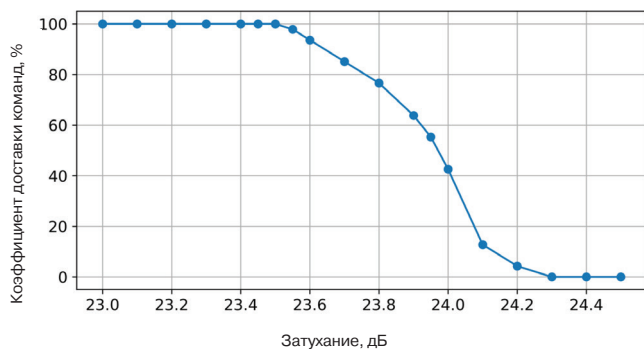


Рисунок 8

Влияние затухания на коэффициент доставки пакетов



изображений дополненной реальности; роботов-аватаров и многофункциональных роботов.

4. Первые результаты экспериментальных исследований подтверждают полученные авторами ранее положения о необходимости децентрализации сети и ограничении радиуса цифровых кластеров в 50 км для круговой задержки.

Исследование выполнено в рамках исполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2021 год

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бутенко, В.В.** Сети 5G/IMT-2020&IoT – основа цифровой трансформации / В.В. Бутенко, В.В. Веерпалу, Е.Е. Девяткин, Д.Н. Федоров // Электросвязь. – 2018. – № 12. – С. 4-9.
2. **Бородин, А.С.** Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 5. – С. 45-49.
3. **Leppanen, K.** Key Drivers and Research Challenges for 6G / K. Leppanen, M. Latvaaho // Fifth ITU Workshop on Network 2030. – Geneva, Switzerland, 2019, 14-16 October. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Pages/programme.aspx>.
4. **Кучерявый, А.Е.** Сети связи 2030 / А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 11. – С. 52-56.
5. **Andreev, S.** Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks / S. Andreev, M. Gerasimenko, O. Galinina et al. // IEEE Wireless Communications, 2014. – Vol. 21, № 6. – P. 86-96.
6. **Yastrebova, A.** Future Networks 2030: Architecture and Requirements // A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy et al. // The 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), November 2018, Moscow // Proceedings. – 2018. – P. 31-36.
7. **Гегель, Г.В.** Ф. Наука логики / Г.В.Ф. Гегель. – СПб.: Наука, 1997.
8. **Galinina, O.** 5G Multi-RAT LTE-WiFi Ultra-Dense Small Cells: Performance, Dynamics, Architecture and Trends / O. Galinina, A. Pyattaev, S. Andreev et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – March 2015. – P. 1224-1240.
9. **Тонких, Е.В.** Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности / Е.В. Тонких, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – № 1. – С. 51-55.
10. **Li, Z.** 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts / Z. Li, M. Uusitalo, H. Shariatmadari, B. Singh // 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – Tokyo, Japan. – 8-9 October 2018. – P. 6.
11. **Кучерявый, А.Е.** Сети связи с ультримальными задержками / А.Е. Кучерявый // Труды НИИР. – 2019. – № 1. – С. 69-74.
12. **Кучерявый, А.Е.** Самоорганизующиеся сети / А.Е. Кучерявый, А.В. Прокопьев, Е.А. Кучерявый. – СПб.: Любавич, 2011. – С. 212.
13. **Кучерявый, А.Е.** Интернет Вещей / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2013. – № 1. – С. 21-24.
14. **Кучерявый, А.Е.** Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44-46.
15. **Maier, M.** The tactile internet: vision, recent progress, and open challenges / M. Maier, M. Chowdhury, B.P. Rimal, D.P. Van // IEEE Communications Magazine. – 2016. – № 54(5). – P. 138-145.
16. **Кучерявый, А.Е.** Государственный парк систем коммутации / А.Е. Кучерявый, В.Н. Осипов // Вестник связи. – 1999. – № 3. – P. 35-38.
17. **Васильев, А.Б.** Тестирование сетей связи следующего поколения / А.Б. Васильев, Д.В. Тарасов, Д.В. Андреев, А.Е. Кучерявый. – М.: ЦНИИС, 2008. – 142 с.
18. **Kirichek, R.** Internet of Things Laboratory Test Bed / R. Kirichek, A. Koucheryavy // International Conference on Wireless Communication, Networking and Application. WCNA 2016. – LNEE – Vol. 348. – P. 485-494.
19. **Kirichek, R.** Model networks for internet of things and SDN / R. Kirichek, A. Vladiko, Z. Makharov, A. Koucheryavy // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – 2016. – P. 76-79.
20. **Бородин, А.С.** Сети связи и пандемия / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – № 5. – С. 8-10.
21. **Li, R.** Network 2030: Market Drivers and Prospects / R. Li // First ITU Workshop on Network 2030. – New York City, US. – 2 October 2018. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201810/Pages/Programme.aspx>.
22. **Vega, M.T.** Towards Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions / M.T. Vega // 4th ITU Workshop on Network 2030. – S.-Petersburg, Russia. 21-23 May 2019. – P. 45-52. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201905/Pages/programme.aspx>.
23. **Листвин, В.Н.** DWDM системы / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков // Техносфера, 2015. – P. 338.
24. **Muthanna, A.** Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain / A. Muthanna, A.A. Ateya, A. Khakimov et al. // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2019. – T. 8, № 1. – C. 15.
25. **Volkov, A.** SDN Load Prediction Algorithm Based on Artificial Intelligence / A. Volkov, K. Proshutinskiy, A.B. Adam et al. // In Communications in Computer and Information Science. Springer. – 2019. – Vol. 1141. – P. 27(40). – <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-43>.
26. **Тонких, Е.В.** Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов / Е.В. Тонких, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2021. – № 4. – С. 55-62.

Получено 20.12.21

Архитектура системы индивидуализированного управления спасением абонента

В.К. Сарьян, ФГУП НИИР, научный консультант, академик РАН РА, д.т.н.; sarian@niir.ru

Р.В. Мещеряков, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), главный научный сотрудник, профессор РАН, д.т.н.; MRV@ieee.org

Д.В. Босомыкин, ФГУП НИИР, директор НТЦ; dnb@niir.ru

А.А. Захарова, ИПУ РАН, главный научный сотрудник, д.т.н.; zaawmail@gmail.com

Н.В. Козлова, ФГУП НИИР, начальник отдела; nvkozlova@niir.ru

УДК 621.391

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.002

Аннотация. На основе обзора средств и технических решений, применяемых в условиях чрезвычайных ситуаций, изложен новый подход к организации информационной системы индивидуализированного управления спасением абонента и представлена ее архитектура. Сформулированы и описаны принципы, на которые следует опираться при проектировании и реализации данной системы. В качестве объекта управления при проектировании системы принято поведение человека в критических условиях. Отмечены преимущества, перспективы развития и применения предлагаемой системы.

Ключевые слова: массовая информационная услуга, чрезвычайная ситуация, индивидуализированное управление спасением абонента, информационно-управляющая система.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях вследствие усилившейся природной и техногенной нагрузки на окружающую среду, которой является биосфера и находящиеся в ней объекты, связанные с жизнедеятельностью человека, постоянно растет число чрезвычайных ситуаций (ЧС) и инцидентов. Следует отметить, что источником угроз для человека зачастую становится не отдельный фактор, а комплекс таковых.

Все это делает актуальным поиск новых решений проблемы защиты населения и территорий от ЧС, включая прогнозы и выявление угроз и опасностей, основанных на современных математических методах и методах моделирования с целью предупреждения и информирования о целесообразных/необходимых действиях в условиях ЧС в конкретной обстановке.

ЧС сопровождаются не только материальными, но и людскими потерями, поэтому в условиях чрезвычайной ситуации всегда ставится задача оперативного и эффективного принятия решения по ликвидации ее последствий [1–3]. Однако важно рассматривать ЧС как фактор риска для людей, когда необходимо обеспечить каждого человека или группу людей поддержкой, в том числе информационной, при эвакуации или безопасном поведении.

При этом процесс принятия решений по ликвидации ЧС (особенно на первоначальной стадии развития) характеризуется неполным и некачественным представлением информации, а также малым резервом времени

для формирования решений.

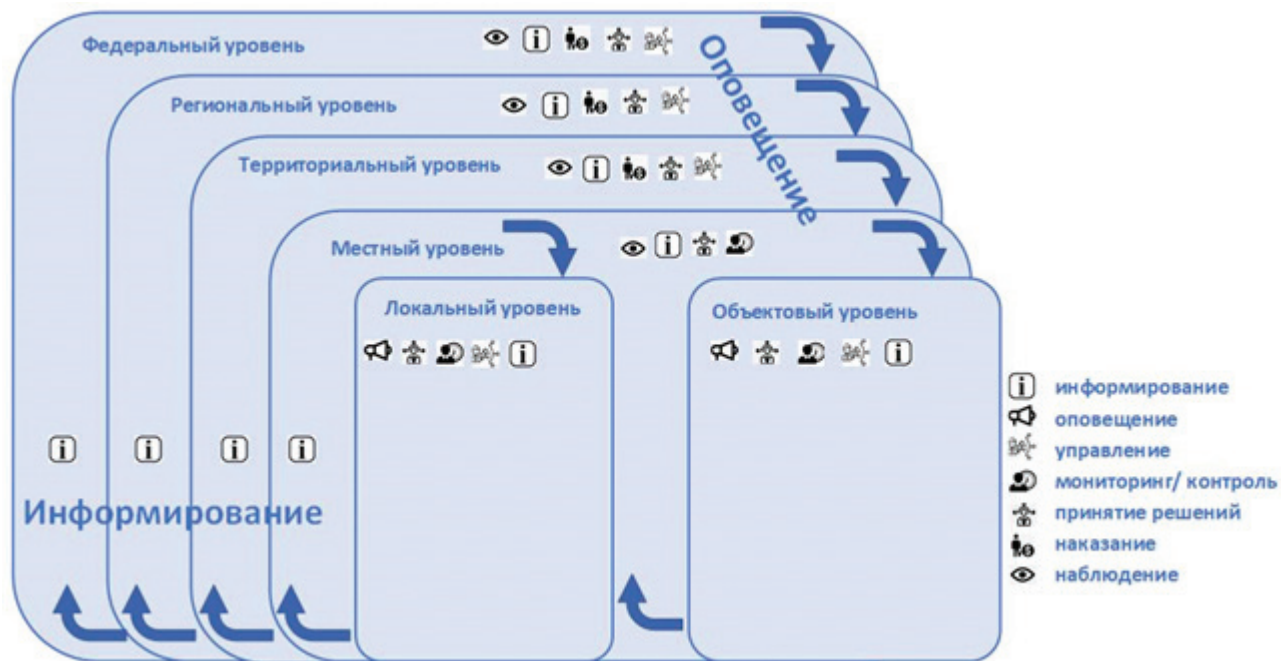
Сложность указанной проблемы заключается в ее многогранности, требующей учета целого комплекса различных аспектов: социально-экономических, организационных, технических, управленческих, информационных, кадровых, психологических и т.д. Попытка совместного рассмотрения этих аспектов, в свою очередь, требует разработки новых концепций с использованием современных достижений научной мысли. Разработка научных основ поведения и организации управляемых сложных систем, в том числе человеко-машинных систем, в экстремальных (чрезвычайных, критических, кризисных) ситуациях является важной и актуальной проблемой, требующей комплексного решения.

Именно поэтому в рамках данной работы рассматриваются вопросы создания системы индивидуализированного управления спасением абонента в условиях ЧС, которые в комплексе решают указанную выше проблему.

Развитие технологий в настоящее время ориентируется на оказание различных сервисов населению. Активно развиваются не только разные способы распространения развлекательного контента, но и бизнес-сервисы, в том числе интернет-магазины, службы доставки и т.п. При этом важным элементом любой системы является клиентоориентированность и получение конечного продукта на рынке услуг. Вместе с тем нормативное регулирование в области телекоммуникаций и искусственного интеллекта (ИИ) показывает, что

Рисунок 1

Схема уровней управления в условиях ЧС



важно проводить исследования и создавать продукты на основе современных достижений в области связи и технологий, нацеленные на спасение человека в сложных или критических условиях.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В соответствии с ГОСТ 22.0.02 чрезвычайные ситуации различают по:

- характеру возникновения (военные, техногенные, биолого-социальные и природные);
- масштабу проявления (локальные, местные, территориальные, региональные, федеральные, трансграничные).

Имеется ряд федеральных отраслевых стандартов и нормативных документов, регламентирующих действия ответственных лиц и лиц, оказавшихся в ЧС (ГОСТ 22.2.05, 22.2.04, 22.2.03, 22.2.09, Положения о порядке оповещения в ЧС и т.п.). Однако все эти меры нацелены на массовое оповещение и информирование об общих мерах в условиях возникшей ЧС.

Источниками ЧС выступают различные явления, носящие природный, техногенный (в том числе антропогенный) или смешанный характер. Явления, которые нельзя отнести к управлению, принято называть обстановкой, а совокупность обстановки и принимаемого решения — ситуацией.

Системы централизованного оповещения по уровням делят на федеральные, региональные, территориальные, местные, локальные и объектовые, каждая из которых несет информационную и управляющую нагрузку.

Таким образом, обобщенная схема уровней управле-

ния в условиях ЧС или ситуациях, опасных для жизни и здоровья людей, объектов хозяйственного и промышленного назначения, представлена на рис. 1, где показано прямое управление и оповещение, а также отмечены функции, выполняемые на разных уровнях. Обратный контур предусматривает информирование на всех уровнях. При этом принятие решений предполагается на всех уровнях, а мониторинг состояния наблюдаемого объекта и реализация мер — на нижних уровнях.

Рассмотрим историю создания информационных и управляющих систем, которые применялись и применяются для контроля и управления в условиях ЧС (см. таблицу) [2, 4, 5].

Начало развития обеспечения процесса управления в условиях ЧС ознаменовало создание автоматизированных информационно-управляющих систем. В настоящее время создано и используется большое число систем, предназначенных для автоматизации отдельных рабочих мест специалистов, обеспечивающих управление в условиях ЧС и поддержку механизмов государственного, межгосударственного и международного управления и контроля за возможными ЧС. Эти средства выполняют расчетные и информационно-справочные функции, обеспечивают поддержку принятия решений.

Имеется также ряд специализированных отраслевых решений, например, для информационной поддержки принятия решений при химических загрязнениях применяют такие системы, как RISKWIT, ATMOSPHERE, CARIS, ЭСПЛА и др. Для экспертной оценки риска промышленных аварий и оптимизации мер безопасности

Системы информирования и управления в условиях ЧС

Название	Функции	Особенности	География
Глобальная информационная сеть по стихийным бедствиям (ГИССБ или GDIN)	Предоставление информации, связанной со стихийными бедствиями, и поддержка принятия решений	Объединяет ряд международных, правительственных, неправительственных и коммерческих организаций в области реагирования на чрезвычайные ситуации.	США
Распределенная система сбора и анализа информации IMIS	Графическое представление данных, сбор данных по радиоактивности окружающей среды, раннее предупреждение, представление текущей ситуации и прогнозирование радиационной обстановки.	Распределенная система сбора и анализа информации, интегрированная с экспертной системой, географической информационной системой и средствами обработки баз данных	ФРГ
NEWS (National Emergency Management System) для стратегического планирования в FEMA (Федеральное агентство США по управлению ЧС)	Сбор, обработка и распределение информации в интересах организации действий в ЧС на федеральном уровне, уровне штатов и местном уровне	Интегрированная информационная система позволяет устанавливать эффективную связь всех гражданских органов со службами национальной безопасности	США
Специализированная геоинформационная система (ГИС) «Экстремум» (ВНИИ ГОЧС МЧС РФ с Центром исследования экстремальных ситуаций и Военно-инженерным университетом)	Поддержка картографических и атрибутивных баз данных, а также сценариев реагирования при землетрясениях, природных пожарах, наводнениях, техногенных катастрофах, моделирование для прогнозирования ЧС и их последствий	Комплексное программное средство, содержащее информацию о факторах техногенного риска на химически, пожаро- и взрывоопасных объектах, АЭС, ГЭС, плотинах, магистральных нефте- и газопроводах и др. База данных содержит каталог всех известных сильных землетрясений, данные мониторинга (сейсмологические, геофизические, GPS-наблюдения, инженерно-сейсмометрические и гидрологические наблюдения, космические снимки и пр.). Формируются долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные прогнозы возможных ЧС	РФ
Ситуационные центры	Поддержка руководителей для принятия стратегических или сложных оперативных решений	Комплексы специально организованных рабочих мест руководителей с использованием интерактивных интерфейсов, методов образного и ассоциативного мышления (при этом обеспечивается обобщенное объемное восприятие информации), а также методов ИИ	США, Норвегия, ФРГ, РФ и др.
Система RODOS	Поддержка принятия решений в реальном масштабе времени в условиях ЧС, связанных с радиационной опасностью в Европе	Состоит из подсистем анализа и оценки ситуации и выбора эффективных контрмер	Более 20 европейских институтов
Система PPS	Поддержка принятия решений в реальном масштабе времени в условиях ЧС	Применяется в условиях ЧС, связанных с радиационной опасностью, землетрясениями, наводнениями, пожарами, взрывами, бурями и т.д.	Внедрена в ряде Скандинавских стран
RECASS (Real-Time Ecological Analysis Support System)	Информационная поддержка решения задач чрезвычайных ситуаций, связанных с аварийным загрязнением окружающей природной среды, анализа и контроля	Предназначена для сбора, обработки, систематизации и хранения данных мониторинга, подготовки и представления результатов анализа состояния загрязнения на контролируемой территории, моделирования процессов распространения и трансформации загрязняющих веществ в окружающей среде.	РФ
Система DSS/IPS	Поддержка руководителей государственного и регионального уровня при разработке и принятии ими стратегических решений по контролю за промышленными загрязнениями окружающей среды	Обеспечивает сбор и организацию информации для проведения анализа потерь и затрат на обеспечение минимального или определенного уровня загрязнения и оценки наиболее значимых факторов загрязнения	Международный проект

на опасных производственных объектах разработана система tHAZARD 3.0 (МГТУ им. Н.Э. Баумана и ГУП НТЦ «Промышленная безопасность»), в которой реализована имитационная модель процесса возникновения происшествий в человеко-машинных системах для оценки техногенного риска конкретной ЧС.

Для обеспечения безопасности ядерных объектов и развития методов прогнозирования радиационной обстановки на ранней стадии разработана система НОСТРАДАМУС (ИБРАЭ РАН), где на основе стохастического моделирования атмосферного переноса моделируются сценарии развития ЧС. Моделирование процессов функционирования экстренных служб позволяет выполнять имитационная система CIS—KOSMAS.

Следует отметить, что с начала 2000-х гг. активно развивались специализированные ГИС-приложения. Это программные разработки на базе универсальных векторных ГИС. Например, ГИСППР для управления безопасностью промышленных объектов (на основе ГИС ArcView 3.0 и выше), система управления ЧС ком-

пании «Транзас» (г. Санкт-Петербург) для мониторинга, прогнозирования и передачи информации об аварии в режиме реального времени.

Анализ указанных выше решений показал, что, как правило, они представляют собой информационные системы, которые сопровождают деятельность по ликвидации последствий при возникновении ЧС или моделируют возможные ситуации, генерируя при этом информацию о том, какие необходимо принять меры по предупреждению или ликвидации ЧС. На основе данных систем формируется информационный пакет для оповещения разных категорий граждан (работники объектов, население окрестных территорий и т.п.).

Однако следует отметить, что в условиях ЧС управленческие действия отдельного человека или группы людей не является адресным (с учетом точной геолокации, локальных условий обстановки и угроз), а носит информирующий характер о факте возникновения угрозы. В отдельных случаях, если мониторинг обстановки позволяет осуществить заблаговременный прогноз, информирование осуществляется до наступления ЧС.

Существующие системы информирования и оповещения нацелены на предоставление сведений о наступающей угрозе, они, как правило, используют ограниченное количество каналов передачи информации, которые к тому же могут быть в условиях ЧС заблокированы. Данная услуга **не является индивидуализированной (персонифицированной)**, она нацелена на поддержку действий человека в общей ситуации, без учета его локального местонахождения, а также без оценивания степени угроз и возможных препятствий при его эвакуации или участии в ликвидации угроз.

Важно обеспечить информирование человека о рисках в режиме реального времени с учетом динамически изменяющейся обстановки (в том числе при возникновении новых рисков и угроз при неблагоприятном развитии ЧС). Такое информирование должно своевременно обеспечить обмен информацией, рекомендациями и мнениями между экспертами, лицами, принимающими решения, и людьми, подверженными риску. Во время аварий, техногенных и гуманитарных катастроф, эпидемий, пандемий и стихийных бедствий своевременное и эффективное информирование о рисках позволяет людям, подверженным наибольшему риску, использовать модели защитного поведения, а органам власти и экспертам — своевременно получать информацию о проблемах и потребностях людей в ЧС. В условиях тотального развития цифровизации в данный процесс вовлекаются современные технические решения и технологии, в том числе основанные на интеллектуальных средствах для поддержки принятия решений.

Следует отдельно отметить, что все чаще возникают кризисные ситуации, спровоцированные социально-экономическими или иными субъективными факторами (телефонный терроризм, несанкционированное агрессивное поведение групп людей и др. факторы, провоцирующие паническое поведение людей

Рисунок 2

Обобщенная схема агрегирования составных частей платформы ИУСА



и/или отдельного человека и приводящие к неадекватным действиям всех участников события). Для поддержки принятия решений и управления поведением людей, подвергающихся угрозам, необходимо создавать соответствующие средства и комплексную информационную технологию.

Также анализ показал, что ряд существующих решений реализован с применением импортных систем и технологий, что может повлиять на стабильность их работы в условиях угроз, кибератак и т.п. Необходимо разработать отечественную цифровую платформу и на ее основе создать комплексные решения по мониторингу, сопровождению ЧС и управлению поведением человека в таких условиях.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СПАСЕНИЕМ АБОНЕНТА

Поскольку основное функциональное назначение системы индивидуализированного управления спасением абонента (ИУСА) [6–9] — это комплексный подход к сбору, анализу, обработке данных, мониторингу и оперативному принятию решений в экстремальных условиях (лимит времени, изменение обстановки, изменение работоспособности каналов связи и т.п.), важно учитывать весь имеющийся научно-технологический задел при проектировании цифровой платформы. На рис. 2 представлена обобщенная схема агрегирования составных частей платформы, включающей в качестве цифровой основы ГИС, нормативную базу, репозиторий данных, а также модуль интеллектуального анализа данных (ИАД).

Эффективность работы системы оперативного управления безопасностью и поведением людей в условиях ЧС определяется временем реакции (периодом времени между поступлением исходной информации об угрозе возникновения ЧС и началом действий по информированию и сопровождению людей в безопасном направлении).

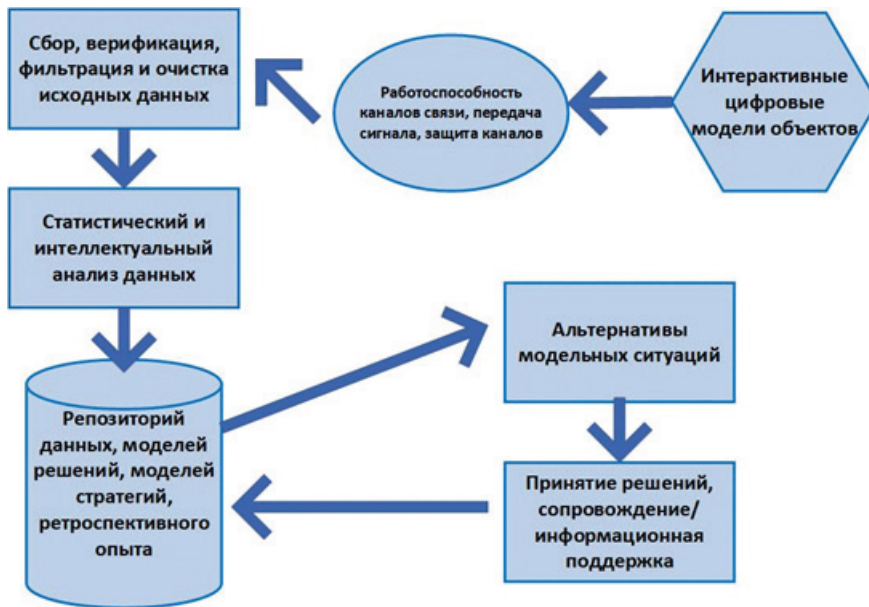
Виды информирования можно разделить на:

- превентивное (информирование до наступления ЧС);
- интерактивное (информирование с наступлением ЧС).

К важным недостаткам существующих систем следует отнести пробелы в учете социальных, экономических, политических и культурных факторов,

Рисунок 3

Обобщенная функциональная схема системы, реализующей ИУСА



влияющих на восприятие риска людьми и модели их поведения, направленные на снижение риска.

Именно поэтому важно создание новой массовой информационной услуги (ИУСА), которая учитывает в своей концепции следующие предлагаемые **принципы**:

- 1) возможность взаимодействия с обществом, когортой, индивидуумом с учетом их ментальных, этнических, профессиональных и иных особенностей;
- 2) интерактивность (способность в режиме реального времени реагировать на динамически изменяющиеся условия обстановки в ЧС);
- 3) подбор модели управления действиями отдельной личности, группы лиц и общества в целом с применением интеллектуальных методов и инструментов;
- 4) агрегирование опыта взаимодействия системы, предоставляющей ИУСА, в репозитории моделей обстановок и поведенческих схем, интеграция накопленного опыта для принятия решения в новых критических и чрезвычайных ситуациях;
- 5) соответствие уровню цифровизации происходящих в обществе и экономике страны процессов с обеспечением возможности создания цифровых двойников объектов (от здания до цифровой модели региона) с целью последующего расширения класса задач, решаемых на основе создаваемой цифровой платформы;
- 6) обеспечение физической и кибернетической безопасности, надежности и устойчивости работы всех элементов системы (от каналов передачи информации, до ядра системы управления) в различных условиях (в том числе в условиях комбинированных угроз);
- 7) развитие и внедрение современных методов ИИ на этапах сбора и обработки данных, принятия решений и поддержки динамического моделирования и взаимодействия с реципиентом (на разных уровнях агрегации абонентов);
- 8) возможность значительного масштабирования системы с учетом перспектив развития средств связи, а также с учетом особой безальтернативной роли существующих и новых спутниковых систем для

реализации доступа абонентов к ИУСА в условиях кризисных и чрезвычайных ситуаций различного масштаба.

В общем виде функциональная схема системы ИУСА представлена на рис. 3.

При этом следует отметить, что в большинстве реализованных на сегодняшний день систем объектом управления является контроль обстановки для принятия решений по ликвидации последствий аварий и катастроф. В рамках ИУСА объектом управления является человек, а динамически изменяющиеся условия (обстановка, модели поведения и т.п.) становятся ограничениями и условиями моделирования. При этом схема, представленная на рис. 3, может масштабироваться в соответствии с уровнями, показанными на рис. 1, а процессы информирования, оповещения и управления происходят в рамках указанных на схеме модулей обработки данных.

ПРЕИМУЩЕСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИУСА

Среди преимуществ, которые имеют изложенное выше решение по реализации платформы и созданная на ее основе система ИУСА, можно отметить:

- 1) возможность масштабирования решения как на уровне категорий абонентов с учетом их индивидуальных и групповых особенностей, так и на уровне архитектуры решений (от предприятия до региона);
- 2) предоставление важного инструмента управления массами людей в условиях хаоса, учитывающего поведенческие модели на уровнях общества, когорты, индивидуума;
- 3) возможность проведения мониторинга ситуации, накопления знаний для последующего использования в рамках интеллектуальных моделей поведения и действий;
- 4) создание репозитория поведенческих моделей, которое

позволит провести важные исследования в области развития методов слабого и сильного ИИ, создать новые инструменты визуальной аналитики, когнитивного моделирования, динамического моделирования на основе роевых алгоритмов, нейросетевых методов и т.п.

- 5) наличие инструмента для создания обучающих симуляторов и тренажеров гражданского и военного назначения (в зависимости от миссий и моделей) для руководящего состава, технического персонала и граждан;
- 6) предоставление важного инструмента исследования архитектурных, технических и информационно-аналитических решений в условиях появления новых технологий передачи, анализа и обработки данных;
- 7) создание и апробация комплексных/гибридных сетей связи и коммуникаций, обеспечивающих устойчивость и надежность работы системы, которая является отечественной разработкой;
- 8) возможность моделирования нагрузок (управление абонентами) любой величины, которая позволяет применять разрабатываемые математические, алгоритмические, программные и технические средства для развития и создания новых систем в области принятия решений, обеспечения информационной инфраструктуры и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор разработанных средств и технических решений, которые применяются в условиях чрезвычайных ситуаций, показал, что они, как правило, ориентированы на оценку ущерба от аварий и катастроф, а также являются средством поддержки принятия решений по применению различных регламентированных сценариев по организации спасения людей [4, 10, 11].

Именно поэтому предлагается сделать акцент на исследовании поведения людей в ЧС [6–9] и сформировать репозитории поведенческих моделей. Также обоснована необходимость создания платформы, которая позволяет агрегировать данные о состоянии окружающей среды и прогнозе его изменения и предлагать различные меры по сопровождению людей в критических и угрожающих жизни и здоровью ситуациях, что должно радикально снизить человеческие и материальные потери при возникновении ЧС.

Сформулированы принципы, которые предлагается применять при проектировании архитектуры системы индивидуализированного управления спасением абонента. Отмечено, что в качестве объекта управления при проектировании системы следует принять поведение человека в критических условиях. Также представлены перспективы развития и применения описываемой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артюхин, В.В.** Крупномасштабные чрезвычайные ситуации. Понятие и статистическая повторяемость / В.В. Артюхин, О.А. Морозова // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – № 1 (67). – Т. 18. – С. 8–15.
2. **Гришечкин, А.М.** Прогнозирование чрезвычайных ситуаций / А.М. Гришечкин, С.О. Потапова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1. – № 9. – С. 187–192.
3. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.04.2016 № 144.
4. **Ямалов, И.У.** Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций / И.У. Ямалов. – Изд. 4-е, электрон. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 291 с.
5. **Oubennaceur, K.** Flood risk mapping for direct damage to residential buildings in Quebec / K. Oubennaceur, K. Chokmani, M. Nastev et al. // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2019. – Vol. 33. – P. 44–54. – <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.09.007>.
6. **Сарьян, В.К.** Беспроводные локальные вычислительные сети в системе индивидуализированного управления спасением людей при ЧС / В.К. Сарьян, А.И. Парамонов, А.С. Викулов, Р.М. Якубовский // Электросвязь. – 2021. – № 1. – С. 51–59.
7. **Сарьян, В.К.** Перспективы снижения потерь от чрезвычайных ситуаций природного происхождения / В.К. Сарьян, А.А. Любушин, А.П. Назаренко, Ю.Н. Зарянов // Вестник ДВО РАН. – 2021. – № 1. – С. 83–93. – DOI:10.37102/0869-7698_2021_215_01_08.
8. **Sarian, V.** Mass service of individualized control for the population rescue in the event of all kinds of emergency situation / V. Sarian, A. Nazarenko // 4th ITU Workshop on Network 2030, Saint Petersburg, Russia, 21–23 May 2019. – www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201905/Documents/Sarian_Nazarenko_Presentation.pdf.
9. **Sarian, V.** Earthquakes and Waterfloods Monitoring System with the Application of the Internet of Things (IoT) / V. Sarian // Workshop on APEC TEL58, Chinese Taipei, 1 Oct. 2018. – www.apec-epwg.org/media/2289/16bed26f89ad133a998a79813e0c4bd4.pdf (дата обращения: 22.05.2020).
10. **Кононов, А.А.** Проблема когнитивных искажений в оценке опасности угроз и рисков природных и техногенных катастроф / А.А. Кононов, В.П. Авдоткин // Сборник статей международного конгресса «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий». – Ногинск, 2017. – С. 106–112.
11. **Виноградов, О.В.** Аспекты применения нейронных сетей для прогнозирования чрезвычайных ситуаций / О.В. Виноградов, О.А. Морозова // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – № 1 (67). – Т. 18. – С. 23–26.

Получено 08.12.21

Программная платформа для реализации и развертывания системы ИУСА

В.К. Сарьян, ФГУП НИИР, научный консультант, академик РАН РА, д.т.н.; sarian@niir.ru

О.Д. Борисенко, ФГБУН «Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН» (ИСП РАН), научный сотрудник; borisenko@ispras.ru

А.К. Петренко, ИСП РАН, заведующий отделом, д.ф.-м.н.; petrenko@ispras.ru

Д.В. Босомыкин, ФГУП НИИР, директор ИТЦ; dvb@niir.ru

Н.В. Козлова, ФГУП НИИР, начальник отдела; nvkozlova@niir.ru

УДК 621.391

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.003

Аннотация. Рассматриваются требования к технологиям разработки, развертывания и эксплуатации распределенных (облачных) программно-аппаратных систем, пригодных для обеспечения требований систем индивидуализированного управления спасением абонента (ИУСА). Предлагается в качестве основы для разработки и развертывания системы ИУСА использовать Технологическую платформу ИСП РАН. Описывается базовый состав Технологической платформы и приводятся примеры ее использования.

Ключевые слова: облачные вычисления, надежность, кибербезопасность, технологии разработки программного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта ФГУП НИИР по созданию системы индивидуализированного управления спасением абонента (ИУСА) [1] необходимо создание программной платформы, отвечающей требованиям этой системы. Программная платформа — часть инфраструктуры, цифровой основы геоинформационной системы (ГИС) (см. рис.2 на с. 24 [2]), при помощи которой создаются и на которой разворачиваются необходимые программные средства, обеспечивающие хранение, обработку данных, передачу потоков информации и обеспечение надежности и защищенности всех программных компонентов системы.

ИСП РАН предложил концепцию «Технологии разработки доверенного программного обеспечения». Эта технология объединяет в себе ряд методологических положений и инструментальную базу, которая позволяет при использовании новейших достижений компьютерных наук поддерживать весь комплекс работ по созданию и верификации программных систем ответственного назначения. Ядро технологии включает в себя архитектурные решения и инструменты, которые кратко будут описаны ниже.

Предлагается за основу Программной платформы ИУСА взять разработки ИСП РАН, которые уже используются в исследованиях и промышленных центрах обработки данных, эксплуатирующихся в информационных системах медицинской тематики. В качестве примера можно привести Научный центр мирового уровня на базе Сеченовского университета, где используется платформа для цифровой трансформации медицины. Опыт успешного использования платформы ИСП РАН для медицины, которая входит в число предметных областей, покрываемых системой ИУСА [1], дает основания

полагать, что наши предположения о целесообразности и возможности использования платформы ИСП РАН для задач ИУСА окажутся верными. Проведенные исследования подтвердили наше предположение.

АРХИТЕКТУРА ИУСА И ТРЕБОВАНИЯ ПО НАДЕЖНОСТИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Система ИУСА хранит и обрабатывает информацию, требующую тщательного управления доступом к данным и ресурсам системы, так как утечка данных или их искажения приведут к катастрофическим последствиям. Надежность системы ИУСА и устойчивость к спорадическим или спланированным инцидентам должна быть высокой, т.е. система должна обеспечивать выполнение основных функций с заданными характеристиками быстродействия и широты охвата во всех предусмотренных проектом ситуациях.

Представления об общей схеме системы достаточно, чтобы понять, что это будет чрезвычайно большая, сложная, многокомпонентная система, погруженная в сложное окружение управленческих и социальных связей и предоставляющая при этом сервисы с очень высокой степенью надежности, доступности и безопасности даже в условиях глобальных чрезвычайных ситуаций. Достижение этой цели невозможно без создания и широкого внедрения унифицированной платформы разработки, развертывания и эксплуатации программно-аппаратных решений. Следует заметить, что в рамках концепции ИУСА предлагается оперировать разнородной информацией, включая медицинские и биомедицинские данные. Делать это нужно с учетом семантики этих данных, так как принятие того или иного решения должно учитывать его последствия для здоровья или

даже жизни человека по чисто медицинским причинам, связанным с индивидуальными особенностями человека.

В составе системы ИУСА следует выделить как минимум три класса устройств:

- сенсоры, которые следят за состоянием и положением физических объектов и процессов (включая людей) и сообщают данные наблюдений в центры обработки данных;
- интеллектуальные устройства, имеющие помимо средств связи с центрами обработки данных возможности автономной обработки информации и взаимодействия с внешним миром (с человеком, с устройствами «умного дома», с автомобилем и проч.);
- компьютеры в центрах обработки данных, выполняющих обработку и накопление информации, подготовку решений и директив действия и др.

Перечисленные устройства почти всегда работают в составе агрегаций различной архитектуры, например, кластеры в дата-центрах или облака «умной пыли» (smart dust). В последнем случае, хотя сенсоры сами никакой интеллектуальной начинки не имеют, облако уже может иметь интеллект, т.е. обладать механизмами адаптации.

Перечисленные выше устройства и их агрегации для своего функционирования должны быть обеспечены (в зависимости от назначения и наличия ресурсов):

- операционными системами (все);
- телекоммуникационным стеком (все);
- средствами разработки, отладки и верификации (все);
- средствами мониторинга для оценки «живучести» (liveness) и уровня загрузки (техническая телеметрия) (все);
- средствами восстановления программных и аппаратных компонентов по требованиям режимов эксплуатации;
- средствами хранения информации (СУБД и распределенные СУБД);
- средствами анализа данных;
- средствами выработки решений;
- средствами моделирования программных и аппаратных средств;
- средствами моделирования процессов окружающего мира, включая социальные процессы;
- средствами моделирования и управления политиками информационной безопасности.

Помимо функциональных требований к платформе, требований по надежности и информационной безопасности, имеется важное требование технологической независимости, которое иногда трактуется как требование импортозамещения. Технологическая независимость означает, что весь программный комплекс должен полностью контролироваться российскими специалистами, которые должны быть в состоянии не только его эксплуатировать, но и выполнять полный спектр работ

по выявлению и устранению дефектов (в частности, уязвимостей по отношению к кибератакам) и работ по развитию и адаптации программных компонентов к изменяющимся требованиям и условиям эксплуатации.

Перечисленным требованиям удовлетворяет набор технологий, который разработан в ИСП РАН. Эти технологии предоставляют унифицированную технологическую платформу для разработки и эксплуатации широкого спектра прикладного программного обеспечения (ПО) для реализации функций ИУСА и удовлетворения требований федеральных регуляторов по обеспечению надежности и информационной безопасности программно-аппаратных комплексов ответственного назначения.

БАЗОВЫЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ИСП РАН

Для построения системы ИУСА необходимы следующие инструменты и технологии ИСП РАН [3]:

- Asperitas и другие облачные решения;
- система верификации AstraVer Toolset;
- статический анализатор бинарного кода BinSide;
- инструмент формирования отчетов об ошибках Casr;
- технология индексирования, поиска и анализа больших пространственно-временных данных Constructivity 4D;
- комплекс динамического анализа программ ИСП Crusher;
- система извлечения структуры документов Dedoc;
- платформа для создания цифровых двойников DigiTEF;
- технология верификации моделей крупных программных систем Klever;
- набор средств поддержки проектирования ответственных систем Masiw;
- ИСП Обфускатор;
- система анализа сетевого трафика Protosphere;
- платформа для анализа программ на основе эмулятора QEMU;
- система управления требованиями Requality;
- статический анализатор Svace;
- платформа для обработки данных Talisman;
- базовый семантический анализатор Texterra;
- среда анализа бинарного кода ТРАЛ.

Облачные решения, которые поддерживаются Технологической платформой ИСП РАН, состоят из базового слоя (не зависящего от предметной области) и слоя облачных приложений, создаваемых специально для целевой предметной области (например, для анализа социальных сетей, хранения и обработки медицинских данных, данных об инцидентах и т.д.). Базовый слой представляет собой комплексное решение, известное как Asperitas. В контексте анализа возможностей Asperitas для целей реализации системы ИУСА важно

Рисунок 1

Пример принципиальной схемы облачного решения для задач биомедицинской предметной области



учитывать как имеющиеся средства поддержки разработки и эксплуатации информационных систем, так и возможности и опыт адаптации Asperitas для решения типовых задач медицины, поскольку ИУСА требует комплексного решения задач информационного обеспечения, включая анализ и выработку управляющих решений на основе данных медицинского характера (например, важно знать о возможности самостоятельного передвижения индивида или необходимости использовать тот или иной тип транспортировки в соответствии с состоянием его здоровья). Анализ показал, что необходимые возможности в Asperitas имеются, а именно, в ходе разработки Asperitas были выдвинуты и реализованы следующие функциональные требования:

- 1) хранение большого объема данных;
- 2) управление доступом к данным, управление вычислительными ресурсами;
- 3) расширяемая программно-аппаратная инфраструктура;
- 4) мониторинг нагрузки и активности пользователей;
- 5) интеграция с внешними системами (в том числе с медицинскими информационными системами);
- 6) поддержка анализа различных типов биомедицинских данных.

Пример принципиальной схемы Платформы ИСП РАН для решения задач в области биомедицины представлен на рис. 1.

Возможности работы в предметной области медицины и сопряженных с ней областях важны для всех экспертных систем, входящих в общую экспертную систему ИУСА [1].

Пример функциональной схемы облачного решения для задач семантического анализа текстовых данных большого объема представлен на рис. 2. Основными компонентами, подсистемами и механизмами такого

решения на базе Asperitas являются:

- 1) минимальная служебная операционная система без пользовательских функций;
- 2) слой предоставления инфраструктуры по запросу (IaaS на базе OpenStack):
 - сервис предоставления виртуальных машин по запросу;
 - сервис виртуальных блочных устройств постоянного хранения данных;
 - сервис эластичного хранения объектных данных;
 - сервис виртуальных сетей;
 - сервис управления облачной средой;
- 3) слой представления платформенных сервисов по запросу (PaaS, оркестратор):
 - сервис оркестрации;
 - сервис развертывания кластеров для параллельной обработки данных;
 - сервис контейнерной виртуализации;
 - сервис предоставления виртуальных рабочих столов;
 - реестр ведения сервисов;
 - сервис визуализации и проведения экспериментов;
 - сервис хранения и обмена данными;
- 4) слой прикладных сервисов:
 - подсистема автоматизации анализа данных;
 - подсистема управления совместными исследованиями;
 - подсистема администрирования;
- 5) контейнеризация внутри виртуальных машин поверх слоя IaaS;
- 6) рабочие столы в веб-браузере по запросу на базе Linux контейнеров (Podman/Docker);
- 7) полностью изолированная установка из собственных источников без доступа к интернет.

Рисунок 2

Пример функциональной схемы облачного решения для задач семантического анализа текстовых данных большого объема

Подсистема автоматизации анализа данных на базе Talisman			Подсистема управления совместными исследованиями на базе Scinooop		Подсистема администрирования
Управляемые платформы (Managed PaaS)	СУБД по запросу	Кластеры параллельной обработки данных	Контейнерные среды	Распределенные фреймворки машинного обучения	Сервис предоставления виртуальных рабочих столов на базе Fanlight
Платформенный уровень (PaaS)	Сервис оркестрации на базе Michman				
	Реестр ведения сервисов и отслеживания топологий взаимосвязей				
Инфраструктура как сервис (IaaS) на базе Асперитас	Виртуальные машины по запросу		Программно-конфигурируемые виртуальные сети		Управление облаком
	Виртуальные блочные устройства		Эластичное хранение объектных данных		Отказоустойчивость
Аппаратное обеспечение					

В ходе разработки облачной инфраструктуры в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных были зарегистрированы следующие программные продукты:

- Асперитас, реестр Минкомсвязи отечественного ПО №5921 (основа подсистемы IaaS Платформы);
- Fanlight, реестр Минкомсвязи отечественного ПО №6066.

Как в коммерческих, так и в государственных медицинских организациях присутствует системная проблема хранения и анализа данных. Использование облачных технологий — одна из мировых тенденций в data science. Создаваемые системы должны базироваться на современной инфраструктуре хранения и анализа данных. Подобные системы крайне сложны и требуют наличия высоких компетенций разработчиков и экспертов. Проблема организации работы с биомедицинскими данными — непростая задача. Для того чтобы правильно спроектировать программно-аппаратную часть, зачастую необходимо понимание как информационных технологий, так и, до некоторой степени, биомедицины. Примером решения такой проблемы служит уже упомянутая платформа ИСП РАН, которая используется в медицинской отрасли в рамках программы по созданию Научных Центров Мирового Уровня в составе консорциума во главе с Сеченовским Университетом. На базе этой адаптированной Платформы развернуты сервисы анализа гистологических изображений, калькуляторы риска развития заболеваний, система работы с ЭКГ и др. Такие же работы предстоит выполнить и для других экспертных систем, но главное, что показал опыт практического использования платформы ИСП РАН для экспертной системы медицины (e-health): она вполне подходит и для реализации экспертной системы ИУСА в целом.

К ВОПРОСУ О КИБЕРУГРОЗАХ

Полный перечень и классификация опасностей (угроз) для такой большой и сложной системы, как система ИУСА, на начальной стадии разработки платформы составить трудно. Вместе с тем противодействие угрозам и устойчивость системы по отношению к вредоносным воздействиям связаны с известными характеристиками качества ПО — с надежностью и защищенностью.

Проблемы, связанные с низким уровнем этих характеристик качества, могут привести к сбоям или даже отказам в функционировании системы, утечке или потере важной информации, поэтому эти характеристики всегда оцениваются как критические.

Исследуя вопрос поиска и купирования уязвимостей, которые могут привести к реализации киберугроз, можно заключить, что имеется два основных подхода к решению этой задачи. Первый состоит в изучении, систематизации и каталогизации известных уязвимостей, которые активно собираются и анализируются мировым сообществом ИТ-специалистов и специалистов в области информационной безопасности, в реализации методов выявления и устранения уязвимостей, перечисленных в этих специальных каталогах. Второй подход состоит в поиске способов спецификации критериев корректности и защищенности программных систем в общем виде и поиске способов выявления нарушений таких критериев. В некоторых случаях удастся объединить возможности этих подходов.

Для реализации первого подхода, как правило, используются базы данных уязвимостей. Имеются отечественные базы данных, например:

- банк данных угроз безопасности информации (bdu.fstec.ru);
- публичные информационные ресурсы разработчика объекта оценки защищенности (ivk.ru, basealt.ru).

Среди зарубежных баз данных уязвимостей наиболее известны:

- сайт NIST (<https://nvd.nist.gov/vuln/search>);
- база данных уязвимостей Common Vulnerabilities and Exposures (cve.mitre.org);
- сайты компонентов сборки — компилятора GCC, систем Make, CMake.

Кроме того, можно использовать такие системы поиска известных уязвимостей как, например, системы автоматизированного отслеживания наличия известных уязвимостей OWASP Dependency Track (<https://dependencytrack.org/>).

Второй подход — это, по существу, создание методологии и технологий выявления и купирования угроз, потенциально ведущих к отказам или нештатному поведению программных систем ответственного назначения. Хотя гарантий отсутствия дефектов и уязвимостей в программных системах большого размера и сложности дать невозможно, современная наука и практика вырабатывают подход, который позволяет существенно повысить уровень доверия к характеристикам надежности и информационной безопасности программных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным вопросом для успеха реализации ИУСА является решение задачи интеграции разнородных данных. Совместные исследования ИСП РАН и НИИ Радио, проведенные в рамках подготовки проекта по созданию системы индивидуализированного управления

спасением абонентов, показали, что программная платформа ИСП РАН может быть взята за основу решения для целей ИУСА. Одним из аргументов в пользу этого утверждения является практический опыт эксплуатации этой платформы в приложениях медицинской направленности.

Помимо собственно инструментов, необходимым условием успешности реализации проекта ИУСА является совершенствование регламентов, которые определяют требования к надежности, защищенности и другим характеристикам качества программной составляющей ИУСА. Эта сфера деятельности также должна быть включена в план работ по ИУСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sarian, V.** Mass service of individualized control for the population rescue in the event of all kinds of emergency situation / V. Sarian, A. Nazarenko // 4th ITU Workshop on Network 2030, Saint Petersburg, Russia, 21–23 May 2019. – www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201905/Documents/Sarian_Nazarenko_Presentation.pdf. (дата обращения: 22.05.2020).
2. **Сарьян, В.К.** Архитектура системы индивидуализированного управления спасением абонента / В.К. Сарьян, Р.В. Мещеряков, Д.В. Босомыкин, А.А. Захарова, Н.В. Козлова // Электросвязь. – 2022. – № 1. – С. 21–26.
3. ИСП РАН – Инновации. Собственные технологии. – <https://www.ispras.ru/technologies/> (дата обращения: 25.11.2021).

Получено 08.12.21

Установление соединений в имитаторах зоновых сетей передачи данных специального назначения

Р.А. Бельфер, МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры «Информационная безопасность», к.т.н.; a.belfer@yandex.ru

А.В. Кравцов, НИИЦ ЦНИИ ВКС МО РФ, начальник отдела; skyak78@gmail.com

М.А. Басараб, МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», д.ф.-м.н.; bmic@mail.ru

УДК 621.392

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.004

Аннотация. Разработан защищенный от перехвата сообщений алгоритм установления в транспортной части имитатора зонной сети передачи данных (ПД) категории специального назначения, позволяющий имитировать работу объединенной сети по одному соединению (коммутируемому виртуальному каналу, КВК) в нескольких частных сетях (ЧС). В состав алгоритма входит процедура централизованной принудительной маршрутизации. Предлагается метод определения разовых ключей шифрования для защиты сообщений формирования принудительной маршрутизации и установления КВК. При выполнении этих функций ключи должны быть разовыми для каждого устанавливаемого КВК в каждой ЧС на каждом участке сети передачи данных между двумя смежными устройствами. Показано использование предложенного метода при большом числе устанавливаемых КВК в нескольких ЧС на имитаторе одной зонной сети, а также на имитаторе иерархической структуры национальной сети с несколькими зонными сетями.

Ключевые слова: имитатор сети, сеть передачи данных, разовые ключи шифрования, маршрутизация, принудительная маршрутизация, частная сеть.

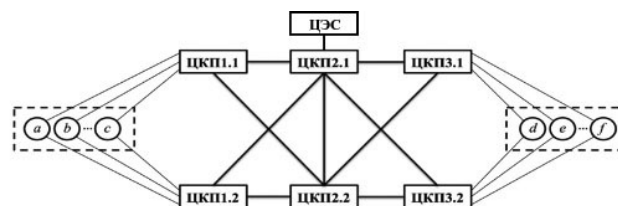
ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья продолжает цикл статей [1–5], посвященных разработке учебного имитатора объединенной сети передачи данных категории специального назначения. Работа ведется с 2017 г. специалистами кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана и Научно-исследовательского испытательного центра (НИИЦ) ЦНИИ ВКС МО РФ.

Под объединенной понимается отечественная сеть ПД категории специального назначения, которая включает в себя частные сети, обслуживающие государственные структуры, названные в п. 16 ФЗ «О связи» [6]. Каждая такая госструктура может интегрировать несколько частных сетей ПД. Актуальность построения таких сетей для нашей страны и поддержки уже действующих отмечена в резолюции конференции «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России-2015» [7].

Решение задач обеспечения информационной безопасности сетей ПД категории специального назначения отечественными нестандартизированными механизмами относится к компетенции российских специализированных научно-практических организаций. Перед создателями же учебного имитатора сети ПД стоит другая задача — разработать основные положения архитектуры сети ПД категории специального назначения, учитывающие высокие требования к количественным показателям качества обслуживания, к числу которых относится и информационная безопасность. В научно-исследовательских работах по созданию учебного имитатора сети ПД специального назначения использованы материалы зарубежных научных публикаций и международные стандарты по информационной безопасности

Конфигурация учебного имитатора объединенной сети ПД



сетей связи общего пользования (ССОП), модернизированных сетей электроснабжения, основанных на инфокоммуникационных сетях и технологиях для сбора информации об энергопотреблении Smart Grid, и др.

На рисунке в качестве примера одной из зонных сетей в составе национальной сети иерархической структуры [1] приведена конфигурация учебного имитатора объединенной сети ПД специального назначения.

Обозначим физические адреса узлов коммутации: ЦКП1.1 — 11, ЦКП1.2 — 12, ЦКП2.1 — 21, ЦКП2.2 — 22, ЦКП3.1 — 31, ЦКП3.2 — 32 и ЦЭС — 0, где ЦЭС — центр эксплуатации сети. В данных конфигурациях имитатора объединенной сети ПД оконечные пункты a (ОПа) и f (ОП f) принадлежат частной сети 1 (ЧС1), а оконечные пункты b (ОП b) и d (ОП d) — частной сети 3 (ЧС3). Физические адреса: 101 — для ОПа, 601 — для ОП f , 2101 — для ОП b , 2601 — для ОП d .

При передаче пакетов данных для защиты от перехвата их адресной части требуется канальное шифрование между узлами коммутации, а для защиты информационной части — сквозное шифрование между оконечными пунктами соединения [8].

Анализ децентрализованного алгоритма маршрутизации, принятого в сети ISDN, показал, что он сложнее, чем централизованный алгоритм принудительной маршрутизации, из-за чего могут возникнуть длительные простои секторов сети [2]. Поэтому в имитаторе сети ПД предлагается использовать технологию принудительной маршрутизации «от источника» — за счет формирования цепочки маршрутов в граничном узле абонентского доступа оконечного пункта источника установления соединения (КВК) [3].

На учебном имитаторе объединенной сети ПД разработан алгоритм установления двух КВК. Один из них — (ОПа — ОПf) КВК₁ — принадлежит ЧС1, а другой — (ОПb — ОПd) КВК₃ — ЧС3 [4]. Рассматривается мультиплексное использование каналов связи для передачи сообщений разных ЧС объединенной сети ПД. В указанной работе принята принудительная маршрутизация с установлением цепочек маршрутизации — без алгоритма их формирования; отсутствует формирование ключей канального шифрования для защиты сообщений установления КВК.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель статьи — разработка алгоритма установления КВК в транспортной части имитатора объединенной сети ПД специального назначения, состоящей из двух соединенных разных частных сетей: КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3.

Алгоритм включает в себя:

- формирование цепочек принудительной маршрутизации устанавливаемых КВК;
- определение разовых ключей шифрования к каждому устанавливаемому КВК в каждой частной сети для защиты от перехвата сообщений формирования принудительной маршрутизации;
- формирование разовых ключей канального шифрования к каждому устанавливаемому КВК в каждой частной сети для защиты от перехвата сообщений установления соединения.

Необходимость создания разовых ключей шифрования вызвана высокими требованиями к защите информационной безопасности не только при установлении КВК, но и при передаче пакетов данных, разъединении КВК, управлении сетью.

В настоящей статье объединенная сеть ПД имитатора моделируется так же, как в работе [4], на примере установления двух соединений — КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3.

Между всеми смежными узлами коммутации, а также между узлом коммутации и ЦЭС имитатора сети периодически определяется согласованный механизм шифрования по алгоритму ассоциации безопасности (Security Association, SA — набор параметров защищенного соединения) и выполняется взаимная аутентификация по стандартизированному алгоритму сети ISDN (ETSI ETS 300 841). Для защиты от повтора и перехвата сообщений злоумышленником все ключи шифрования должны быть разовыми. Для ЧС с высокими требова-

ниями к информационной безопасности алгоритмы шифрования могут отличаться.

Задача настоящей статьи, кроме разработки алгоритма установления по одному КВК двух разных ЧС с созданием разовых ключей, заключается еще и в том, чтобы дать предложения по созданию разовых ключей шифрования при более широком использовании имитатора сети ПД:

- при установлении в имитаторе сети не одного КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3, как принято в разрабатываемом алгоритме, а большого числа КВК в каждом из этих ЧС;
- при установлении в имитаторе сети большого числа КВК в более чем двух ЧС с учетом всех четырех граничных маршрутизаторов (см. рисунок);
- при установлении КВК нескольких ЧС в разных зонах сетей имитатора сети ПД иерархической структуры страны [1].

Решение этих задач не предусматривает разработку алгоритмов установления КВК с формированием цепочек принудительной маршрутизации.

На каждом участке между двумя узлами коммутации транспортной сети, между узлом коммутации и ЦЭС все приведенные выше ключи шифрования должны быть разовыми при установлении КВК частной сети ПД.

2. АЛГОРИТМ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ, ЗАЩИЩЕННОЙ ШИФРОВАНИЕМ

2.1. Формирование запросов на установление по одному КВК в двух разных ЧС

В граничных узлах коммутации ЦКП1.1 и ЦКП1.2 на абонентских доступах оконечных пунктов источников устанавливаемых КВК₁ ЧС1 (ОПа) и КВК₃ ЧС3 (ОПb) формируются сообщения — запрос цепочек маршрутизации (ЗЦМ): соответственно ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃. Эти сообщения включают в себя тип сообщения и следующие данные ЗЦМ₁ (в скобках указаны данные ЗЦМ₃):

- физический адрес ЦКП абонентского доступа оконечного пункта источника установления КВК — 101 (2101);
- физический адрес оконечного пункта абонентского доступа назначения установления КВК — 601 (2601);
- установление путей маршрутизации сообщений ЗЦМ от граничных маршрутизаторов в ЦЭС. Они одинаковые для ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃: ЦКП1.1 — ЦКП2.1 — ЦЭС и ЦКП1.2 — ЦКП2.1 — ЦЭС;
- счетчик установления КВК оконечным пунктом источника для защиты от злоумышленного повтора.

2.2. Передача запросов на установление КВК

Для защиты от перехвата сообщений ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃, включающих физические адреса оконечных пунктов устанавливаемых КВК, при передаче их в ЦЭС по

приведенным выше путям маршрутизации на каждом участке (ЦКП1.1 – ЦКП2.1, ЦКП1.2 – ЦКП2.1, ЦКП2.1 – ЦЭС) необходимо:

- выбрать согласованные механизмы шифрования по алгоритму ассоциации безопасности SA;
- выполнить взаимную аутентификацию по стандартизированному алгоритму ISDN (периодически);
- создать канальный ключ шифрования;
- передать в ЦЭС ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃, шифруя/дешифруя их на каждом участке ЦКП1.1 – ЦКП2.1, ЦКП1.2 – ЦКП2.1, ЦКП2.1 – ЦЭС.

2.3. Ключи шифрования/дешифрации ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃

Созданный при взаимной аутентификации головной ключ используется в качестве предварительного для вычисления ключа шифрования/дешифрации ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃.

Ключ шифрования ЗЦМ на участке между устройствами r и s определяется по формуле

$$K_{rs}(i) = \text{hash}(K_{rs} \| i \| M_i), \quad (1)$$

где K_{rs} – головной ключ взаимной аутентификации между устройствами r и s ; r и s – физические адреса устройств; M_i – текущий номер счетчика устанавливаемых КВК, источником (инициатором) которых служит оконечный пункт с физическим адресом i ; физический адрес i однозначно определяет номер ЧС; в частной сети M_i создает ключ шифрования ЗЦМ разовым.

Примем значения $M_{101}=1$ для ОП_а (КВК₁) и $M_{2101}=1$ для ОП_б (КВК₃). Приведем все ключи шифрования/дешифрации ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃:

ЗЦМ₁ ЦКП1.1 – ЦКП2.1 $K_{1121}(101) = \text{hash}(K_{1121} \| 101 \| 1)$;
 ЗЦМ₃ ЦКП1.1 – ЦКП2.1 $K_{1121}(2101) = \text{hash}(K_{1121} \| 2101 \| 1)$;
 ЗЦМ₁ ЦКП1.2 – ЦКП2.1 $K_{1221}(101) = \text{hash}(K_{1221} \| 101 \| 1)$;
 ЗЦМ₃ ЦКП1.2 – ЦКП2.1 $K_{1221}(2101) = \text{hash}(K_{1221} \| 2101 \| 1)$;
 ЗЦМ₁ ЦКП2.1 – ЦЭС $K_{210}(101) = \text{hash}(K_{210} \| 101 \| 1)$;
 ЗЦМ₃ ЦКП2.1 – ЦЭС $K_{210}(2101) = \text{hash}(K_{210} \| 2101 \| 1)$.

В ЦЭС содержатся все данные контроля поступивших сообщений и управления сетью, включающие необходимые для формирования цепочек маршрутизации состояния работоспособности каналов и узлов коммутации транспортной сети.

В ЦЭС для каждой частной сети Z встроены счетчики N_z текущего значения номера устанавливаемого КВК. Примем $N_1 = 1$ (для КВК₁), $N_3 = 1$ (для КВК₃). Эти значения ЦЭС устанавливает при поступлении в него ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃. Получив эти сообщения, ЦЭС выполняет функцию формирования цепочек принудительной маршрутизации с учетом работоспособности узлов коммутации и каналов связи. Контроль за их состоянием и локализация неисправностей выполняются ЦЭС при управлении сетью [3]. Поскольку функции управления сетью в современных телекоммуникациях являются

масштабными и сложными, их полная автоматизация, как отмечается в [9], практически невозможна. Остается полуавтоматическое управление с центра управления сетью (Network Operation Centre, NOC). В виртуальной частной сети VPN на базе MPLS принято такое же обозначение центра управления [10]. Это же относится к объединенной сети ПД категории специального назначения и, в частности, к функции управления сетью ЦЭС по формированию цепочек маршрутизации.

На основании полученных ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃ в ЦЭС происходит формирование двух сообщений, включающих цепочки принудительной маршрутизации: ЦМ₁ (для устанавливаемого КВК₁ ЧС1) и ЦМ₃ (для устанавливаемого КВК₃ ЧС3). Сообщения ЦМ₁ и ЦМ₃ включают в себя следующие значения (без скобок относится к ЧС1, в скобках – к ЧС3):

- принадлежность КВК определенной частной сети ЧС1 (ЧС3);
- текущий номер устанавливаемого КВК $N_1 = 1$ ($N_3 = 1$);
- пути принудительной маршрутизации («от источника»), устанавливаемые в граничные маршрутизаторы ЦКП1.1 и ЦКП1.2. Для упрощения изложения основных положений алгоритма примем пучки маршрутов (цепочки маршрутов устанавливаемых в имитаторе КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3) одинаковыми. В ЦКП1.1 – в пучках маршрутов КВК₁ и КВК₃ первого пути цепочки принудительной маршрутизации 11-21-31 и третьего пути 11-22-31; в ЦКП1.2 – цепочки принудительной маршрутизации второго пути 12-22-32 и четвертого пути 12-21-32. Все четыре пути маршрутизации сформированы в ЦЭС при условии работоспособного состояния всех узлов коммутации и каналов транспортной части имитатора объединенной сети ПД.

2.4. Ключи маршрутного шифрования/дешифрации ЦМ₁ и ЦМ₃

Сформулируем задачу – установить пути маршрутизации сообщений ЦМ₁ и ЦМ₃, обратные путям маршрутизации ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃; ЦЭС – ЦКП2.1 – ЦКП1.1 и ЦЭС – ЦКП2.1 – ЦКП1.2. Будем использовать механизмы шифрования/дешифрации ЦМ₁ и ЦМ₃, установленные на участках этих путей. Принятые в ЗЦМ физические адреса ОП источника КВК однозначно определяют, какому номеру ЧС принадлежит устанавливаемый КВК.

В ЦЭС для каждой ЧС предусмотрен счетчик номера КВК, поступившего на установление.

Определим ключи шифрования/дешифрации ЦМ₁ и ЦМ₃ за счет включения в формулы их расчета данных в ЦЭС о номерах КВК, устанавливаемых в частной сети Z (N_z). Для ЦМ₁ этим порядковым номером является N_1 , для ЦМ₃ – N_3 .

Ключ маршрутного шифрования на участке между

устройствами r и s ЦМ частной сети Z определяется по формуле

$$K_{rs}(Z, N) = \text{hash}(K_{rs} \| Z \| N), \quad (2)$$

где N – номер устанавливаемого КВК в частной сети Z .

Формула (2) справедлива для всех участков пути ЦМ₁ и ЦМ₃:

$$\begin{aligned} \text{ЦМ}_1 \text{ ЦКП1.1} - \text{ЦКП2.1} \quad K_{1121}(1,1) &= \text{hash}(K_{1121} \| 1 \| 1); \\ \text{ЦМ}_3 \text{ ЦКП1.1} - \text{ЦКП2.1} \quad K_{1121}(3,1) &= \text{hash}(K_{1121} \| 3 \| 1); \\ \text{ЦМ}_1 \text{ ЦКП1.2} - \text{ЦКП2.1} \quad K_{1221}(1,1) &= \text{hash}(K_{1221} \| 1 \| 1); \\ \text{ЦМ}_3 \text{ ЦКП1.2} - \text{ЦКП2.1} \quad K_{1221}(3,1) &= \text{hash}(K_{1221} \| 3 \| 1); \\ \text{ЦМ}_1 \text{ ЦКП2.1} - \text{ЦЭС} \quad K_{210}(1,1) &= \text{hash}(K_{210} \| 1 \| 1); \\ \text{ЦМ}_3 \text{ ЦКП2.1} - \text{ЦЭС} \quad K_{210}(3,1) &= \text{hash}(K_{210} \| 3 \| 1). \end{aligned}$$

2.5. Передача сообщений цепочек маршрутизации в граничные узлы коммутации

- Передадим из ЦЭС в ЦКП 2.1 зашифрованное ключом $K_{210}(1,1)$ сообщение ЦМ₁ и ключом $K_{210}(3,1)$ – сообщение ЦМ₃.
- Каждая дешифрованная ЦМ₁ и ЦМ₃ в ЦКП2.1 содержит все четыре пути принудительной маршрутизации. Одну часть ЦМ₁ (ЦМ₃) подготовим для передачи из ЦКП2.1 в ЦКП1.1, убрав цепочки принудительной маршрутизации второго и четвертого путей пучка маршрутизации (12-22-32 и 12-21-32). Вторую часть ЦМ₁ (ЦМ₃) определим для передачи из ЦКП2.1 в ЦКП1.2, убрав цепочки принудительной маршрутизации первого и третьего путей пучка маршрутизации (11-21-31 и 11-22-31).
- Передадим из ЦКП2.1 в ЦКП1.1 зашифрованное ключом $K_{1121}(1,1)$ сообщение ЦМ₁, содержащее часть цепочки маршрутизации (первый путь 11-21-31 и третий путь 11-22-31), и зашифрованное ключом $K_{1121}(3,1)$ сообщение ЦМ₃, содержащее эту же часть цепочки маршрутизации. Отправим из ЦКП 2.1 в ЦКП1.2 зашифрованное ключом $K_{1221}(1,1)$ сообщение ЦМ₁, содержащее часть цепочки маршрутизации (второй путь 12-22-32 и четвертый путь 12-21-32), и зашифрованное ключом $K_{1221}(3,1)$ сообщение ЦМ₃, содержащее эту же часть цепочки маршрутизации.

3. АЛГОРИТМ КАНАЛЬНОГО ШИФРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ КВК

3.1. Участки транспортной части сети ПД, подлежащие каналному шифрованию при установлении КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3

Раздел посвящен разработке алгоритма канального шифрования в транспортной части имитатора объединенной сети ПД при установлении двух соединений – КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3.

Запишем канальное шифрование между всеми смежными узлами коммутации имитатора, соединенными каналами ПД:

$$\begin{aligned} \text{ЦКП1.1} - \text{ЦКП2.1}, \quad \text{ЦКП2.1} - \text{ЦКП3.1}, \\ \text{ЦКП1.2} - \text{ЦКП2.2}, \quad \text{ЦКП2.2} - \text{ЦКП3.2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ЦКП1.1} - \text{ЦКП2.2}, \quad \text{ЦКП2.2} - \text{ЦКП3.1}, \\ \text{ЦКП1.2} - \text{ЦКП2.1}, \quad \text{ЦКП2.1} - \text{ЦКП3.2}, \\ \text{ЦКП2.1} - \text{ЦКП2.2}. \end{aligned}$$

В алгоритме формирования принудительной маршрутизации, представленном в разделе 2, дважды использовались приведенные смежные узлы коммутации транспортной сети имитатора ЦКП1.1 – ЦКП2.1 и ЦКП1.2 – ЦКП2.1: один раз при передаче сообщений ЗЦМ₁ и ЗЦМ₃, второй – при передаче сообщений ЦМ₁ и ЦМ₃. В подразделе 2.2 акцент сделан на проведение, в частности на этих участках, периодического согласования механизмов шифрования по алгоритму SA и взаимной аутентификации по стандартизированному алгоритму ISDN. Эта процедура выполняется одновременно на всех остальных приведенных участках имитатора сети, подлежащих каналному шифрованию.

В подразделе 2.4 выводится формула (2) для расчета ключа маршрутного шифрования ЦМ на этих участках транспортной сети. Формула (2) справедлива для канального шифрования сообщений «Запрос вызова» (ЗВ) на всех участках транспортной части имитатора сети, приведенных выше.

3.2. Сообщения, подлежащие каналному шифрованию

Функцию коммутации в имитаторе объединенной сети ПД выполняют все приведенные выше смежные узлы коммутации, обеспечивая в каждом из рассматриваемых КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3 установление соединений по четырем путям маршрутизации. Установление этих коммутируемых виртуальных каналов выполняется по специальному алгоритму путем передачи защищенных канальным шифрованием/дешифрованием сообщений «Запрос вызова» ЗВ₁ КВК₁ ЧС1 (ЗВ₃ КВК₃ ЧС3).

Приведем характеристики в составе каждого из этих сообщений в ЦКП1.1 и ЦКП1.2. Они включают в себя общую часть и отличаются только одной характеристикой – путями маршрутизации. В транспортной части имитатора сети ПД пути маршрутизации в КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3 одинаковые.

Состав общей части:

- физические адреса конечных пунктов ОП_а, ОП_б устанавливаемого КВК₁ ЧС1 (101 и 601) и ОП_а, ОП_б устанавливаемого КВК₃ ЧС3 (2101 и 2601);
- текущий номер $N_1=1$ для устанавливаемого КВК₁ ЧС1, текущий номер $N_3=1$ для устанавливаемого КВК₃ ЧС3;
- логический адрес $LCN=802$ КВК₁ ЧС1 ($LCN=2802$ КВК₃ ЧС3). Эти значения используются в работе [4] при формировании таблиц маршрутизации по логическим адресам;
- механизмы и ключи сквозного шифрования и контроля целостности информационной части пакетов данных (определены алгоритмом защищенного установления соединения на абонентском доступе имитатора объединенной сети ПД [5]).

Пути маршрутизации в ЦКП 1.1:

ЗВ₁(1): ЦКП1.1 – ЦКП2.1 – ЦКП3.1 – ОПф(1-й путь, ЧС1);
ЗВ₃(1): ЦКП1.1 – ЦКП2.1 – ЦКП3.1 – ОПд(1-й путь, ЧС3);
ЗВ₁(3): ЦКП1.1 – ЦКП2.2 – ЦКП3.1 – ОПф(3-й путь, ЧС1);
ЗВ₃(3): ЦКП1.1 – ЦКП2.2 – ЦКП3.1 – ОПд(3-й путь, ЧС3).

Пути маршрутизации в ЦКП 1.2:

ЗВ₁(2): ЦКП1.2 – ЦКП2.2 – ЦКП3.2 – ОПф(2-й путь, ЧС1);
ЗВ₃(2): ЦКП1.2 – ЦКП2.2 – ЦКП3.2 – ОПд(2-й путь, ЧС3);
ЗВ₁(4): ЦКП1.2 – ЦКП2.1 – ЦКП3.2 – ОПф(4-й путь, ЧС1);
ЗВ₃(4): ЦКП1.2 – ЦКП2.1 – ЦКП3.2 – ОПд(4-й путь, ЧС1).

3.3. Канальное шифрование сообщений установления КВК₁ ЧС1 и КВК₃ ЧС3

Зашифруем в ЦКП1.1 соответствующими механизмами сообщения 1-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(1): КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{1121}(1,1) = \text{hash}(K_{1121}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(1) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{1121}(3,1) = \text{hash}(K_{1121}||3||1)$. Отправим эти сообщения в ЦКП2.1. На приеме дешифруем ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1).

Зашифруем в ЦКП1.1 соответствующими механизмами сообщения 3-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(3): КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{1121}(1,1) = \text{hash}(K_{1121}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(3) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{1122}(3,1) = \text{hash}(K_{1122}||3||1)$. Отправим эти сообщения в ЦКП2.2. На приеме дешифруем ЗВ₁(3) и ЗВ₃(3).

Зашифруем в ЦКП1.2 соответствующими механизмами сообщения 2-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(2) КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{1222}(1,1) = \text{hash}(K_{1222}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(2) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{1222}(3,1) = \text{hash}(K_{1222}||3||1)$. Отправим эти сообщения в ЦКП2.2. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(2) и ЗВ₃(2).

Зашифруем в ЦКП1.2 соответствующими механизмами сообщения 4-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(4) КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{1221}(1,1) = \text{hash}(K_{1221}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(4) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{1221}(3,1) = \text{hash}(K_{1221}||3||1)$. Отправим эти сообщения в ЦКП2.1. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(4) и ЗВ₃(4).

Зашифруем в ЦКП2.1 соответствующими механизмами сообщения 1-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(1) КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{2131}(1,1) = \text{hash}(K_{2131}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(1) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{2131}(3,1) = \text{hash}(K_{2131}||3||1)$. Произведем изменения логических адресов в ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1) [4]. Отправим эти сообщения в ЦКП3.1. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1).

Зашифруем в ЦКП2.2 соответствующими механизмами сообщения 3-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(3) КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K(1,1)_{2231} = \text{hash}(K_{2231}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(3) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{2231}(3,1) = \text{hash}(K_{2231}||3||1)$. Произведем изменения логических адресов в ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1) [4]. Отправим эти сообщения в ЦКП3.1. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(3) и ЗВ₃(3).

Зашифруем в ЦКП2.2 соответствующими механизмами сообщения 2-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(2) КВК₁

ЧС1 канальным ключом $K_{2232}(1,1) = \text{hash}(K_{2232}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(2) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{2232}(3,1) = \text{hash}(K_{2232}||3||1)$. Произведем изменения логических адресов в ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1) [4]. Отправим эти сообщения в ЦКП3.2. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(2) и ЗВ₃(2).

Зашифруем в ЦКП2.1 соответствующими механизмами сообщения 4-го пути «Запрос вызова» ЗВ₁(4) КВК₁ ЧС1 канальным ключом $K_{2132}(1,1) = \text{hash}(K_{2132}||1||1)$ и «Запрос вызова» ЗВ₃(4) КВК₃ ЧС3 канальным ключом $K_{2131}(3,1) = \text{hash}(K_{2131}||3||1)$. Произведем изменения логических адресов в ЗВ₁(1) и ЗВ₃(1) [4]. Отправим эти сообщения в ЦКП3.1. На приеме дешифруем сообщения ЗВ₁(4) и ЗВ₃(4).

4. КЛЮЧИ КАНАЛЬНОГО ШИФРОВАНИЯ ПРИ ИМИТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ УСТАНОВЛЕНИЯ КВК

В разделе 2.3 в формуле (1) показан расчет ключей шифрования сообщений имитатора сети принудительной маршрутизации запросов цепочек маршрутизации ЗЦМ.

В разделе 2.4 в формуле (2) показан расчет ключей шифрования сообщений имитатора сети принудительной маршрутизации формирования цепочки маршрутизации. В разделе 3.1 отмечено, что эта формула справедлива и для канального шифрования сообщений установления соединений «Запрос вызова».

Как указано в разделе 1, задача настоящей статьи, кроме разработки алгоритма установления по одному КВК двух разных ЧС с созданием разовых ключей, заключается в том, чтобы дать предложения по созданию разовых ключей шифрования при более широком использовании имитатора сети ПД.

В случае имитации установления более чем по одному КВК в этих ЧС для расчета ключей канального шифрования и шифрования сообщений цепочки маршрутизации применяются данные номеров устанавливаемых КВК – счетчика ЦЭС для ЧС1 и счетчика ЦЭС для ЧС3. Подставляя эти значения в формулу (2), можно сделать так, чтобы ключи шифрования/дешифрации сообщений ЦМ₁, ЦМ₃ и ЗВ₁, ЗВ₃ на всех участках путей их маршрутизации были разовыми для КВК каждой из этих ЧС (ЧС1 и в ЧС3).

Если рассматривать всю конфигурацию имитатора зоной сети ПД специального назначения со всеми частными сетями в ней (см. рисунок), то для расчета ключей канального шифрования/дешифрации сообщений ЦМ и ЗВ на всех участках путей их маршрутизации в ЦЭС для каждой ЧС должны быть предусмотрены счетчики текущих номеров устанавливаемых КВК. Подставляя значения этих счетчиков в формулу (2), получаем для КВК каждой ЧС имитатора зоной сети разовые ключи шифрования/дешифрации сообщений ЦМ и ЗВ на всех участках путей их маршрутизации.

То же самое относится к созданию разовых ключей КВК частных сетей в каждой зоной сети имитатора

национальной сети ПД категории специального назначения иерархической структуры [9].

Текущий номер устанавливаемых КВК, инициатором которых служит оконечный пункт с физическим адресом i , создает по формуле (1) ключ шифрования сообщений ЗЦМ разовым в частной сети при всех приведенных вариантах использования имитатора сети ПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе создания учебного имитатора объединенной сети ПД категории специального назначения разработан защищенный от перехвата сообщений алгоритм установления в транспортной части сети двух коммутируемых виртуальных каналов разных частных сетей. При этом используется разработанный под управлением центра эксплуатации сети алгоритм принудительной маршрутизации — в отличие от принятой в ISDN

децентрализованной маршрутизации, недостаточно надежной по причине сложности алгоритма.

Предложены формулы определения ключей канального шифрования для защиты от перехвата сообщений установления КВК, а также формулы определения ключей шифрования для защиты от перехвата некоторых сообщений формирования принудительной маршрутизации. Все ключи шифрования — разовые к каждому устанавливаемому КВК в каждой частной сети на каждом участке между двумя узлами коммутации транспортной сети, между узлом коммутации и ЦЭС.

Показана процедура создания ключей шифрования разовыми не только на имитаторе одной зоновой сети в разработанном алгоритме с одним устанавливаемым КВК в каждой из двух ЧС, но и при большом числе КВК и ЧС, а также на имитаторе иерархической структуры сети страны, включающем в себя несколько зоновых сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Басараб, М.А.** Учебные имитаторы объединенной сети ПД спецназначения и задачи имитатора иерархической структуры / М.А. Басараб, Р.А. Бельфер, А.В. Кравцов // Электросвязь. — 2020. — № 3. — С. 62-68.
- 2. Басараб, М.А.** Сравнение процедур коррекции маршрутизации в имитаторе сети ПД специального назначения и в ОКС7 / Басараб М.А., Р.А. Бельфер, Е.В. Глинская, А.В. Кравцов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. — 2020. — № 4. — С. 43-47.
- 3. Басараб, М.А.** Управление учебным имитатором зоновых сетей передачи данных специального назначения / М.А. Басараб, Р.А. Бельфер, А.В. Кравцов // Электросвязь. — 2021. — № 1. — С. 56-61.
- 4. Басараб, М.А.** Алгоритм безопасного установления/разъединения соединения на транспортном участке объединенной сети ПД спецназначения / М.А. Басараб, Р.А. Бельфер, Е.В. Глинская, А.В. Кравцов // Первая мяля. — 2020. — № 2. — С. 22-25.
- 5. Басараб, М.А.** Алгоритм установления защищенного соединения на абонентском доступе имитатора объединенной сети ПД специального назначения / М.А. Басараб, Р.А. Бельфер, Е.В. Глинская, А.В. Кравцов // Первая мяля. — 2019. — № 8. — С. 46-51.
- 6.** Федеральный закон Российской Федерации «О связи» № 126-ФЗ от 07.07.2003 (редакция от 05.01.2018).
- 7.** Резолюция конференции «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России 2015» // Connect. — 2015. — № 9. — С. 78-88.
- 8. Столингс, В.** Основы защиты сетей. Приложения и стандарты / В. Столингс. — М.: Вильямс, 2002. — 324 с.
- 9. Keeney, John.** A Recommender-System for Telecommunications Network Management Actions / John Keeney, Sven van der Meer, Gabriel Hogan // IEEE International Symposium on Integrated Network Management. — 2013. — 763 p.
- 10. Behringer, Michael H.** MPLS VPN Security Cisco Press / Michael H. Behringer. — 2005. — P. 312.

Получено 13.11.21

Проблема обеспечения функциональной устойчивости систем критически важных объектов

О.А. Остроумов, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, докторант, к.т.н.; oleg-26stav@mail.ru

УДК 621.39 + 004.05

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.005

Аннотация. Показано, что для обеспечения цели создания систем управления и систем связи необходимо выполнение определенных требований и целевых установок, которые задаются на этапе проектирования; для обеспечения выполнения целей систем в процессе их функционирования реализуются функции, поддерживаемые временным, материальным и людским ресурсом. На основе метода анализа рассматривается задача поддержки функциональной устойчивости системы связи, отмечено влияние на нее нарушений функционирования критически важных объектов в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов и управляющих воздействий.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, критически важные объекты, система связи, система управления, функции и задачи системы связи, функциональная устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемым элементом любой технической системы управления является система связи, обеспечивающая доставку команд от управляющего объекта к управляемому. Система связи, как и система управления, представляет собой сложную функционально-динамическую, многообъектную, распределенную в пространстве иерархическую структуру.

В процессе работы она подвергается воздействию различных внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, которое носит случайный характер [1–4]. При этом изменяются состояния объектов системы и их местоположение в пространстве, структурные и функциональные связи.

Возможно состояние, когда элементы системы работоспособны, но не выполняют свои функции или система не реализует вообще никакие функции. Для того чтобы обеспечивать устойчивое функционирование систем связи и управления, а также восстановление утраченных функций, необходимо управлять ресурсами этих систем.

Функциональной динамичностью системы будем считать свойство системы изменять во времени качество выполнения и количество своих функций и задач, их обеспечивающих, в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов и управляющих воздействий.

Под *устойчивостью функционирования системы*, включающей в себя критически важные объекты и объекты критической информационной инфраструктуры, понимается способность системы обеспечивать выполнение заданных функций при выходе из строя ее отдельных элементов из-за воздействия различных дестабилизирующих факторов и деструктивных воздействий.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Для обеспечения функционирования системы связи и системы управления необходима определенная последовательность действий, направленных в первую очередь на контроль выполнения системами целевого предназначения и своих функций.

Невыполнение функции или предпосылки к ее невыполнению приводят (могут привести) к невыполнению системой своего целевого предназначения. Важные функции (процессы, обеспечивающие выполнение целевого предназначения, или цели) системы являются критически важными функциями, процессами для системы; объекты, обеспечивающие выполнение этих функций, — критически важные объекты для системы.

Критичность объекта, процесса, функции, задачи, ресурса — все это свойства объекта, процесса, функции, задачи, ресурса, характеризующие зависимость от них других объектов, процессов, функций, задач.

Критически важный объект сложной функционально-динамической и организационно-технической системы — это объект, нарушение (прекращение) функционирования которого, т.е. невыполнение задач, функций и целей системы, приведет (может привести) к нарушению (прекращению) функционирования всей системы, а также к другим тяжелым последствиям.

Критически важный объект системы связи — это объект системы связи, нарушение (прекращение) функционирования которого, т.е. невыполнение задач, функций и целей системы связи, приведет (может привести) к нарушению (прекращению) функционирования всей системы связи, а также к другим тяжелым последствиям.

Критически важный процесс системы связи — процесс, невыполнение и/или нарушение сроков и качества выполнения которого приведет (может привести) к невыполнению и/или нарушению требований, предъявляемых к системе, и/или цели (целей) системы.

Критически важная функция системы связи — это функция, невыполнение и/или нарушение сроков и качества выполнения которой приведет (может привести) к невыполнению и/или нарушению требований, предъявляемых к системе, и/или цели (целей) системы.

Критически важная задача системы связи — минимальное действие, характеризующее определенным ресурсом и временными ограничениями. Оно обеспечивает реализацию функции (функций) системы, невыполнение и/или нарушение сроков и качества выполнения которой приведет (может привести) к невыполнению и/или нарушению сроков и качества выполнения функции (функций), которую она обеспечивает.

Критически важный ресурс системы связи — материальный объект, личный состав (персонал), время — все, что необходимо для реализации задачи (задач), невыполнение и/или нарушение сроков и качества выполнения (которых) приведет (может привести) к невыполнению и/или нарушению сроков и качества выполнения функции (функций), которую она обеспечивает.

Функции системы состоят из простейших задач, выполнение которых возможно при достаточном уровне обеспечения их соответствующими ресурсами. При этом для сложной организационно-технической системы, такой как система связи или система управления, ресурсами выступают время, необходимое для выполнения задач, материальные ресурсы — в основном техника, поддерживающая процесс управления через обмен различными сообщениями между людьми. Третьим основным ресурсом, обеспечивающим функционирование систем, являются люди.

ЧЕЛОВЕК КАК РЕСУРС СИСТЕМЫ

Можно ли рассматривать специалиста как ресурс? Ответ на данный вопрос содержится в концепции управления человеческими ресурсами (КУЧР) [5, 6]: человек является ресурсом, обеспечивающим функционирование системы, в которую он входит. Данная концепция имеет долгую историю — об этом говорили еще в Древней Греции [7]. Эволюцией КУЧР в современном мире стала концепция менеджмента, или управления человеческими ресурсами, направленная на повышение качества и эффективности функционирования организаций.

Основной идеей КУЧР является определение отношения организации к человеку как к ресурсу, личности, капиталу [6]. При этом выявляется общая ценность каждого индивида для организации в целом, сопровождаемая экономическим обоснованием способов управления, в котором учитываются его профессиональный уровень подготовки, личностные качества, мотивация к деятельности, общая культура, коммуникабельность, образование, вовлеченность в деятельность организации и взаимодействие в коллективе. КУЧР служит лишь инструментом, позволяющим повысить эффективность управления организацией и ее персоналом. Основоположник инструментализма Д. Дьюи подчеркивал, что

значение и ценность любых инструментов заключается не в них самих, а в их способности и работе, которые проявляются в действии [5, 8]. Деятельность каждой организации индивидуальна, и отсутствие результата применения концепции должно привести к отказу от ее использования либо к ее совершенствованию и адаптации под нужды конкретной организации для достижения целей обеспечения функционирования системы, повышения ее эффективности и качества управления.

Ключевым моментом процесса управления является принятие решения на какое-либо управляющее воздействие. Автоматизация лишь облегчает этот процесс за счет использования большого количества вспомогательных данных, предоставляемых системой поддержки принятия решения. Однако при отсутствии автоматизации процесс принятия решения наглядно характеризует принцип меритократии. Суть его в сборе умных, независимо мыслящих людей в одном месте и предоставлении им права открыто высказывать разные точки зрения по определенному вопросу. Результатом должно стать формирование наилучшего коллективного решения, основанного на компетенциях участников обсуждения, и преодоление возникающих в ходе дискуссии разногласий [5, 9]. При этом участники должны обладать определенными качествами, честно и открыто высказываться по теме обсуждения.

Автоматизация управления или коллективное решение направлены на повышение качества и быстроты принятия решения лицами, имеющими на это право. Если рассматривать процесс управления, то в нем всегда участвует человек, принимающий решение, исходя из предоставленной ему информации, собственного опыта, интуиции, компетентности и других качеств. Характер такого решения будет зависеть, в том числе, от окружения руководителя, а также от эффективного и устойчивого функционирования систем обеспечения управления, системы связи и автоматизированных систем управления. Данные системы позволяют своевременно получать достоверную информацию о состоянии управляемых объектов.

ТРЕБОВАНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Функционирование системы осуществляется в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов. При этом воздействие может быть произведено на любой элемент системы, который в результате может прекратить выполнять свои функции, что может повлечь за собой невыполнение системой своих функций и целевого предназначения.

Устойчивость функционирования систем в условиях воздействия различных факторов определяется в первую очередь надежностью и живучестью.

Надежность — это параметр, задаваемый на момент запуска техники в массовое производство, а о надежности системы можно говорить как о совокупной на-

дежности ее элементов, которая зависит главным образом от условий эксплуатации техники при наличии соответствующих специалистов, ее эксплуатирующих.

Живучесть характеризует вероятность функционирования системы в условиях воздействия внешних искусственных дестабилизирующих факторов, в том числе различных видов оружия.

Требования к системам по надежности и живучести, определяющие устойчивость ее функционирования, носят прогностический характер и не рассматривают количественно и качественно выполнение системой функций и задач, а также не учитывают процесс ее функционирования.

Анализ функционирования системы через процесс обусловлен увеличением размерности современных систем и сложности связей между их элементами, необходимостью контроля большого количества параметров, характеризующих элементы системы и ее саму. При этом устойчивое функционирование отдельных элементов системы не гарантирует, что вся система будет функционировать так же стабильно. Основным средством обеспечения выполнения функций являются ресурсы системы: правильное управление (основанное на достоверной информации о состоянии системы, реализации функций и задач, а также обеспеченности их необходимым ресурсом) может гарантировать ее функциональную устойчивость.

УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

При функционировании любой системы связи определяется ее цель. Модель системы связи может быть представлена в виде множества целей $A = \{A_1, A_2, \dots, A_a\}$, достигаемых выполнением функций $F = \{F_1, F_2, \dots, F_c\}$, на основе выполнения задач $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_d\}$ с использованием ресурсов системы $E = \{M, \mu(t, k)\}$, где $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ — множество ресурсов системы; M — ресурс; t — время; $k(x, y)$ — характеристики, определяющие пространственное расположение объекта [10–12].

Функционирование системы связи можно представить в виде следующих отображений:

$$\begin{aligned} S1: F &\rightarrow A; \\ S2: Z &\rightarrow F; \\ S3: E &\rightarrow Z, \end{aligned}$$

где $S1$, $S2$ и $S3$ характеризуют уровень выполнения целей, функций, задач соответственно.

Выполнение каждой цели, требования, функции, задачи реализуется объектами, расположенными в пространстве и имеющими определенные характеристики, которые с течением времени могут меняться. Рассмотрим множество объектов системы $V = \{v_r\}$ и множество критически важных объектов $V^* = \{v_r^*\}$ (символ * характеризует критически важные объекты, процессы, задачи, функции), при этом $\forall V^* \in V (v_r \in V, v_r^* \in V^*, v_r^* \in V)$. Каждый объект характеризуется пространственно-временными характеристиками и может рассматриваться

как ресурс системы связи. Ресурс является основным элементом, позволяющим системе выполнять свои функции.

Поскольку в процессе функционирования системы связи объекты выполняют определенные функции и задачи, обеспечивающие цели, можно рассмотреть следующее отображение, характеризующее функционирование системы:

$$\begin{aligned} S1: V \times F &\rightarrow A; \\ S2: V \times Z &\rightarrow F; \\ S3: V \times E &\rightarrow Z. \end{aligned}$$

В условиях обеспечения функциональной устойчивости системы связи осуществляется постоянное управляющее воздействие на ее элементы, представляющее собой множество управляющих воздействий $U = \{U_1, U_2, \dots, U_u\}$. Тогда отображение

$$\begin{aligned} S1: U \times V \times F &\rightarrow A; \\ S2: U \times V \times Z &\rightarrow F; \\ S3: U \times V \times E &\rightarrow Z \end{aligned}$$

характеризует выполнение системой целевой функции с учетом реализации органами управления соответствующих управляющих воздействий.

ПОНЯТИЕ КРИТИЧНОСТИ

В условиях функционирования системы часть объектов, процессов, функций и задач, ресурсов, обеспечивающих выполнение целевого предназначения системы, имеет критически важное значение. При этом критичность объектов, процессов, функций и задач, ресурсов может быть статической или динамической. Большинство задач, выполняемых системой и ее элементами в данный момент времени, являются критическими и характеризуют функциональную устойчивость всей системы.

Под статической критичностью понимается критичность объектов, процессов, функций и задач или ресурсов, присущая им как свойство постоянно, под динамической критичностью — критичность объектов, процессов, функций и задач или ресурсов, возникающая в момент обеспечения целевого предназначения системы, т.е. в момент их выполнения или задействования.

Под функциональной устойчивостью понимается способность сложной организационно-технической системы в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов обеспечивать выполнение целевой функции системы. Совокупность отображений, характеризующих функционирование сложной системы, имеет вид

$$\begin{aligned} S1: U \times V^* \times F^* &\rightarrow A; \\ S2: U \times V^* \times Z^* &\rightarrow F^*; \\ S3: U \times V^* \times E &\rightarrow Z^*. \end{aligned}$$

Сложная функционально-динамическая и организационно-техническая система в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов является функционально устойчивой, если на интервале времени Δt существует по крайней мере одно состояние, позволяющее за счет ее синтеза и управления ресурсом

выполнить возложенные на нее задачи и функции, в первую очередь критические, и обеспечить реализацию целевого предназначения системы с качеством не ниже $K_{\min}$:

$$\forall (D_{\Delta t} \in D, V_{\Delta t} \in V, F_{\Delta t} \in F) \exists k^* (E_{\Delta t} \in E) K, \langle k^*, V_{\Delta t}, F_{\Delta t} \rangle - K_{k^*} \geq K_{\min},$$

где $D_{\Delta t}$ — множество дестабилизирующих факторов из множества D (множество дестабилизирующих факторов, которые могут воздействовать на систему), нарушающих функционирование системы (создающих предпосылки к этому) и действующих на интервале времени Δt ; $V_{\Delta t}$ — множество объектов системы, характеризующих пространственно-временными характеристиками, обеспечивающих выполнение множества функций $F_{\Delta t}$ на интервале времени Δt ; $F_{\Delta t}$ — множество функций, выполняемых системой и ее элементами на интервале времени Δt ; $E_{\Delta t}$ — множество ресурсов, необходимых для обеспечения выполнения задач и функций системы на интервале времени Δt ; $K = \{k_z\}$, $k_z = \langle E_1, E_2, \dots, E_z \rangle$ — множество распределений ресурсов по задачам, обеспечивающим выполнение функций на интервале времени Δt ; K_{k^*} — вектор уровня реализации наборов задач и функций, выполнение которых обеспечивается распределением ресурса k^* на интервале времени Δt в условиях воздействия дестабилизирующих факторов; $K_{\min}$ — минимальный уровень качества реализации наборов задач и функций, выполнение которых обеспечивается распределением ресурса k^* на интервале времени Δt в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, при котором система выполняет целевое предназначение.

Каждый вектор K_{k^*} является набором величин, характеризующих качество выполнения задач и функций в соответствии с целевой функцией, и представляет собой множество $K_{k^*} = \{q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1j}, \dots, q_{ij}\}$, где индекс i — количество выполняемых задач j функции.

Каждый элемент вектора K_{k^*} можно представить как множество величин, характеризующих уровень качества выполнения j функции $N_j = \{q_1, q_2, \dots, q_i\}$.

Множество уровней качества функционирования системы можно записать как множество множеств $N = \{N_1, N_2, \dots, N_j\}$, не пересекающихся с элементами q_i , при этом каждый элемент q_i множества N_j может быть упорядочен по правилу $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_i$.

Множество N является частично упорядоченным и может быть записано в виде квазиматрицы j -го порядка со строками, характеризующими значения множества N_j [13–15]:

$$N = \begin{bmatrix} q_1 & \dots & q_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ q_j & \dots & q_{ij} \end{bmatrix} = \|q_{ij}\|. \quad (1)$$

При воздействии различных дестабилизирующих факторов, длительном сроке эксплуатации, нарушениях при эксплуатации показатель качества выполнения задач и функций может снижаться, а величина q_{ij} смещается влево по матрице (1), что приводит к снижению функциональной устойчивости системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные системы связи и системы управления представляют собой сложные функционально-динамические и организационно-технические объекты, содержащие в своем составе большое количество элементов. Высокая стоимость таких систем и их элементов, потенциальная опасность последствий нарушения (сбоев, прекращения) функционирования требуют обеспечения их высокого уровня надежности и живучести.

Данные показатели имеют вероятностную характеристику и закладываются на этапе проектирования системы, когда ее функции, задачи и цели четко определены. Однако до момента ввода системы в эксплуатацию проходит много времени, в течение которого перечень задач, функций, а иногда и целей может измениться, сама система усложняется, поэтому не всегда оказывается способна выполнять заданные требования.

Анализируя работу системы, необходимо определять ее функциональную устойчивость. Принципиальным отличием функциональной устойчивости от надежности и живучести и подходов к ее оценке является необходимость контроля системы в режиме, близком к реальному времени, через изучение процессов выполнения системой и ее элементами задач и функций.

Методы обеспечения функциональной устойчивости направлены на декомпозицию системы до ресурсов, обеспечивающих выполнение объектами системы задач и функций, а также управление ими (ресурсами) в условиях поддержания вектора качества выполнения функций и задач системы в требуемом интервале времени.

Когда система реализует процесс управления ресурсами и их распределением, требования планов, характеризующих функционирование системы, остаются неизменными.

При невозможности обеспечения требуемого количества и качества выполняемых функций, при возникновении конфликтной ситуации (критичности объектов, процессов, задач, функций) для ухода от конфликта осуществляется синтез системы с учетом выполнения регламентов. Его цель — перераспределить ресурсы и последовательность выполнения задач и функций с учетом прогнозирования состояния системы и ее элементов и выполнения ими своих задач и функций, обеспечения их ресурсом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лепешкин, О.М.** Оптимизация структуры комплекса технических средств в информационно-управляющих системах государственного управления / О.М. Лепешкин, Р.С. Гаппов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 5. – С. 129-132.
2. **Груздев, Д.А.** Мониторинг информационно-телекоммуникационных сетей / Д.А. Груздев, П.В. Закалкин, С.И. Кузнецов, С.П. Тесля // Труды учебных заведений связи. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 46-50.
3. **Синюк, А.Д.** Аудит безопасности в системе управления безопасностью взаимодействия систем доменных имен / А.Д. Синюк, О.А. Остроумов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 52-58.
4. **Сурмин, Ю.П.** Теория систем и системный анализ: учебное пособие / Ю.П. Сурмин. – К.: МАУП, 2003. – 368 с.
5. **Иванова, О.Э.** Методология как основание концепции управления человеческими ресурсами / О.Э. Иванова // Альманах современной науки и образования. – 2019. – Т. 12, вып. 4. – С. 81-85. – Тамбов: Грамота. – DOI: 10.30853/manuscript.2019.4.16.
6. **Legge, K.** Human resource management: A critical analysis / K. Legge // New Perspectives on Human Resource Management. – L.-N.Y.: Routledge, 1989. – P. 19-40.
7. **Kaufman, B.** The development of HRM in historical and international perspective: ed. by P. Boxall, J. Purcell, P. Wright / B. Kaufman // The Oxford Handbook of Human Resource Management. – Oxford University Press, 2007. – P. 19-47. – DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199547029.003.0002.
8. **Дьюи, Д.** Реконструкция в философии. Проблемы человека: пер. с англ. Л.Е. Павловой / Д. Дьюи. – М.: Республика, 2003. – 494 с.
9. **Далио, Р.** Принципы. Жизнь и работа: пер. с англ. Ю. Константиновой / Р. Далио. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2018. – 608 с.
10. **Лепешкин, О.М.** Синтез модели процесса управления социальными и экономическими системами на основе теории радикалов: специальность 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лепешкин Олег Михайлович; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2014. – 428 с.
11. **Лепешкин, О.М.** Выполнение регламента процесса управления – критерий определения критичности системы / О.М. Лепешкин, О.А. Остроумов, Н.В. Савищенко // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность»: сборник статей III Всероссийской науч.-техн. конф. – Анапа, 2021. – С. 625-634.
12. **Лепешкин, О.М.** К вопросу о понятии критически важного объекта / О.М. Лепешкин, О.А. Остроумов, И.С. Черных, М.А. Остроумов // Труды VI Межвузовской науч.-практ. конф. «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». – Санкт-Петербург, 2021. – С. 17-20.
13. **Левин, В.И.** Логическая теория надежности сложных систем / В.И. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
14. **Королев, А.Н.** Функциональная устойчивость навигационно-информационных систем / А.Н. Королев // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 559-565. – DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-559-565.
15. **Коцыняк, М.А.** Управление системой обеспечения безопасности информационно-телекоммуникационной сети на основе алгоритмов функционирования искусственной нейронной сети / М.А. Коцыняк, М.А. Карпов, О.С. Лаута, В.Е. Дементьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 3-10.

Получено 24.11.21

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ»



- по каталогу «Роспечать» – индекс 71107
- ООО «Урал-Пресс» – <http://www.ural-press.ru>
- «Пресса России» – индекс 41411
- в редакции журнала «Электросвязь»

Тел. +7 (495) 647-17-65 | E-mail: elsv@garnet.ru | Сайт: www.elsv.ru

Формирование телекоммуникационных направлений с высокой структурно-поточковой устойчивостью

С.А. Ясинский, ФГУП ЦНИИС–ЛО ЦНИИС, ведущий научный сотрудник, доцент, д.т.н.; yasinsky777@mail.ru

А.Н. Зюзин, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, преподаватель, к.т.н.; alexz01@bk.ru

УДК 621.395.741

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.006

Аннотация. Приводится обоснование подхода к моделированию распределения информационных потоков для телекоммуникационных направлений сети электросвязи высокой структурно-поточковой устойчивости на основе квазиравномерного распределения нагрузок Шеннона и метода распределения информационных потоков, базирующегося на основе золотой пропорции и последовательности Фибоначчи.

Ключевые слова: телекоммуникационное направление, информационный поток, высокая структурно-поточковая устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт системного проектирования и анализа действующих первичных сетей связи и перспективных телекоммуникационных сетей (ТКС) показывает, что учет их структурной устойчивости (СУ) не всегда является достаточным условием построения. Во многих случаях для учета в математических моделях требуется введение понятия потоковой устойчивости (ПУ). Так как учитывать ПУ без обоснования СУ нет возможности, то приходим к выводу: ПУ следует учитывать совместно с СУ или после формирования структуры ТКС. Исходя из этого, введем наряду с понятием структурной устойчивости понятие структурно-поточковой устойчивости (СПУ) телекоммуникационных направлений (ТКН) без резервирования. Совокупность значений структурно-поточковой устойчивости ТКН определяет общую СПУ сети электросвязи.

Известным методам и методикам оптимизации распределения канального ресурса первичных сетей связи или распределения информационных потоков (РИП) в ТКС присущ недостаток [1, 2], который зачастую закладывается изначально в самой целевой функции минимизации стоимости прокладки кабельно-линейных сооружений (волоконно-оптических кабелей) и распределения образуемых на их основе потенциальных ресурсов (каналов передачи, оптических волокон и длин волн), косвенно выражаемой минимальной суммой используемого кабеля или минимальными рангами путей передачи информационного потока (по минимуму числа транзитных сетевых элементов), умноженной на значение информационного потока для каждого независимого пути (НЗП) [2]. Следовательно, для устранения этого недостатка предлагается отказаться от исполь-

зования целевой функции минимизации стоимости на прокладку оптоволоконных кабелей и оптимизировать РИП по аналогии с квазиравномерным распределением нагрузок Шеннона [3].

ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ РИП ДЛЯ ТКН

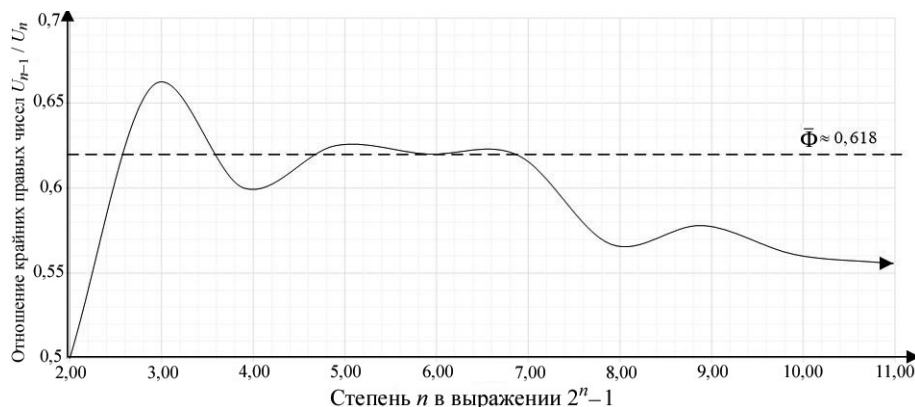
В соответствии с выведенным Шенноном доказательством существования квазиравномерного распределения нагрузок между множеством реле для наиболее экономичных схем в виде n -ярусного разделительного дерева $(1, 2, 4, \dots, 2^{n-1})$ для $n = 1, 2, \dots, 11$ был получен следующий треугольник квазиравномерного распределения чисел (математическая модель) [3]:

$$\begin{aligned}
 n=1 & - 1 \\
 n=2 & - 1, 2 \\
 n=3 & - 1, 3, 3 \\
 n=4 & - 1, 4, 5, 5 \\
 n=5 & - 1, 7, 7, 8, 8 \\
 n=6 & - 1, 12, 12, 12, 13, 13 \\
 n=7 & - 1, 21, 21, 21, 21, 21 \\
 n=8 & - 1, 36, 36, 36, 36, 37, 37 \\
 n=9 & - 1, 63, 63, 64, 64, 64, 64, 64 \\
 n=10 & - 1, 113, 113, 113, 113, 114, 114, 114, 114 \\
 n=11 & - 1, 204, 204, 204, 204, 205, 205, 205, 205, 205.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Анализ полученного распределения Шеннона показал, что в образованном треугольнике чисел (1) крайние правые из них представляют усеченную до числа 21 последовательность Фибоначчи $(1, 2, 3, 5, 8, 13, 21)$ при $n = 1, \dots, 7$, а при $n = 8, \dots, 11$ эта закономерность нарушается, так как усеченная последовательность 37, 64, 114, 205 не содержит числа из последовательности

Рисунок 1

Зависимость отношения крайних правых чисел U_{n-1}/U_n от $n = 1, \dots, 11$ в треугольнике Шеннона



Фибоначчи (34, 55, 89, 144) [4].

Зависимость от отношений крайних правых чисел (U_{n-1}/U_n) в образованном треугольнике между соседними ярусами (уровнями) с ростом степени $n = 1, \dots, 7$ в выражении $2^n - 1$ стремится в виде затухающего колебательного процесса к обратному значению $\bar{\Phi} = 0,618033988... \approx 0,618 \approx 0,62$ от золотой пропорции $\Phi = 1,618033988$, так как $\bar{\Phi} = 1/\Phi$. Следовательно, эти отношения равны: $1/2 = 0,5$ для $n = 2$; $2/3 = 0,66...$ для $n = 3$; $3/5 = 0,6$ для $n = 4$; $5/8 = 0,625$ для $n = 5$; $8/13 = 0,615...$ для $n = 6$; $13/21 = 0,619...$ для $n = 7$.

Однако, когда $n \rightarrow \infty$, то зависимость отношений крайних правых чисел (U_{n-1}/U_n) между соседними уровнями треугольника (1) продолжает быть колебательной, но по другому закону, и в пределе она стремится к обратному значению числа 2, т.е. к $0,5$, так как $1/2 = 0,5$. И действительно, эти отношения равны: $21/37 = 0,567...$ для $n = 8$; $37/64 = 0,578...$ для $n = 9$; $64/114 = 0,561...$ для $n = 10$ и $114/205 = 0,556...$ для $n = 11$ и т.д. На рис. 1. приведена зависимость отношения крайних правых чисел U_{n-1}/U_n от $n = 1, \dots, 11$ в треугольнике Шеннона (1).

С учетом полученного практического эффекта квазиравномерного распределения Шеннона и выявленной закономерности в виде усеченной последовательности Фибоначчи при $n = 1, \dots, 7$, этот подход к исследованию может быть использован для получения рационального решения задачи РИП методом последовательности Фибоначчи [4], который был улучшен использованием золотой пропорции [5].

При $n = 1, \dots, 7$ вектор направленности коэффициента РИП стремится к $\bar{\Phi}$, а при $n = 8, \dots, 11$ и т.д. этот вектор меняет направление, стремясь к $0,5$. Т.е. коэффициент РИП изменяется в диапазоне от $\bar{\Phi}$ до $0,5$. Его предлагается относить к уровню распределения с высокой СПУ (ВСПУ), так как в нем обеспечивается распределение, близкое к парето-оптимальному (отношения степени СПУ к стоимости сети электросвязи) [6, 7].

Основу РИП с ВСПУ методом золотой пропорции для ТКС в виде корреспондирующей пары узлов связи из заданного множества $Z = \{z_k; k = 1, M\}$ для ТКС со-

ставляет математическая модель следующего вида [5, 6, 7]:

$$v_{k_{\text{св.тр.}}(z_k), \Pi}^{\text{НЗП}}(K_{\text{РИПВГ}}) = \frac{K_{\text{РИПВГ}}^{\Pi-1} \cdot 100\%}{\sum_{\Pi=1}^{k_{\text{св.тр.}}(z_k)} K_{\text{РИПВГ}}^{\Pi-1}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{РИПВГ}} = \bar{\Phi}$ — коэффициент распределения информационных потоков для допустимой верхней границы (ВГ) области распределения с ВСПУ; $k_{\text{св.тр.}}(z_k)$ — требуемый (тр.) коэффициент связности с множеством НЗП ($\Pi = 1, k_{\text{св.тр.}}(z_k)$). Эти распределения можно получить с

необходимой точностью, округляя полученные значения до определенного знака после запятой.

Например, при $k_{\text{св.тр.}}(z_k) = 2$ в результате расчетов по формуле (2) получим с точностью до одного знака после запятой:

$$v_{2, \Pi=1}(\bar{\Phi}) = \bar{\Phi} \cdot 100\% \approx 61,8\%;$$

$$v_{2, \Pi=2}(\bar{\Phi}) = \bar{\Phi}^2 \cdot 100\% \approx 38,2\%.$$

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод: несмотря на сохранение квазиравномерного распределения чисел на каждом уровне треугольника (1), межуровневая стабилизация распределений в виде затухающего колебательного процесса происходит до седьмого уровня включительно, а после седьмого уровня наступает дестабилизация относительно $\bar{\Phi} \approx 0,62$ с последующим убыванием значений отношений (U_{n-1}/U_n) в пределе до числа $0,5$ по мере увеличения значения n . Это значит, что моделирование квазиравномерного распределения, которое приводится Шенноном, можно методом аналогий использовать для решения задач РИП в ТКС, где в качестве допустимой ВГ области ВСПУ распределения предлагается использовать выражение (2), которое ранее применялось в качестве базового (эталонного) распределения для

сравнительной оценки степени ВСПУ и необходимых затрат, реализуемых на практике при формировании ТКН для ТКС.

РИП для ТКН высокой структурно-потоковой устойчивости

В соответствии с начальным значением отношений крайних правых чисел (U_{n-1}/U_n) в образованном треугольнике Шеннона между соседними ярусами ($1/2 = 0,5$ для $n = 2$) и с учетом убывания этих отношений при $n \rightarrow \infty$ в пределе до числа 0,5, предлагается в качестве нижней границы (НГ) области допустимого распределения с ВСПУ использовать следующее выражение:

$$v_{k_{\text{св.тр.}}(z_k), \Pi}^{\text{НЗП}}(0,5) = \frac{0,5^{\Pi-1} \cdot 100\%}{\sum_{\Pi=1}^{k_{\text{св.тр.}}(z_k)} 0,5^{\Pi-1}}, \quad (3)$$

где $0,5 = K_{\text{РИП НГ}}$ — коэффициент РИП для допустимой НГ области распределения. Например, при $k_{\text{св.тр.}}(z_k) = 2$ в результате расчетов по формуле (3) получим с точностью до одного знака после запятой:

$$v_{2, \Pi=1}(0,5) = 0,6666... \cdot 100\% \approx 66,7\%;$$

$$v_{2, \Pi=2}(0,5) = 0,3333... \cdot 100\% \approx 33,3\%.$$

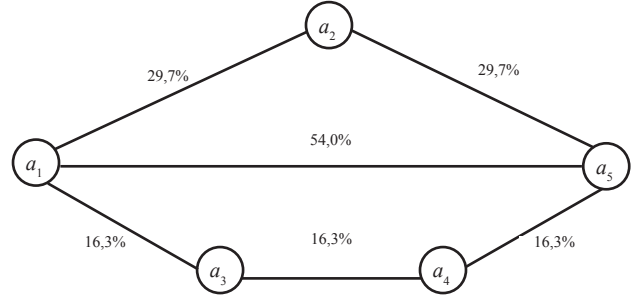
В выражении (2) принят коэффициент РИП $K_{\text{РИП ВГ}} = \bar{\Phi}$ в качестве допустимого при расчете ВГ распределения для оценки степени ВСПУ и необходимых затрат, реализуемых на практике при формировании ТКН для ТКС. Обосновав граничные значения допустимой области распределения с ВСПУ (для НГ $K_{\text{РИП НГ}} = 0,5$, а для ВГ $K_{\text{РИП ВГ}} = 0,618... = \bar{\Phi}$), определим область допустимых решений (ОДР) для решения задачи РИП по сформированным ТКН ($z_k \in Z$) с требуемой ВСПУ и наличием средств для компенсации необходимых затрат на создание ТКС. Эту ОДР можно рассчитывать с учетом заранее обоснованного выбора коэффициента РИП в следующих допустимых границах:

$$K_{\text{РИП НГ}} = 0,5 \leq K_{\text{РИП ВСПУ}} \leq K_{\text{РИП ВГ}} = 0,618... = \bar{\Phi}. \quad (4)$$

По аналогии с обоснованными выше выражениями (2) и (3) для расчета допустимой НГ и ВГ для заданного допустимого коэффициента РИП в пределах (4) пред-

Рисунок 2

Пример РИП на графе для ТКН с $k_{\text{св.тр.}}^{\text{НЗП}} = 3$, рассчитанный по формуле (5) при $K_{\text{РИП ВСПУ}} = 0,55$



лагается следующая математическая модель распределения с возможной степенью ВСПУ ТКН:

$$v_{k_{\text{св.тр.}}(z_k), \Pi}^{\text{НЗП}}(K_{\text{РИП ВСПУ}}) = \frac{K_{\text{РИП ВСПУ}}^{\Pi-1} \cdot 100\%}{\sum_{\Pi=1}^{k_{\text{св.тр.}}(z_k)} K_{\text{РИП ВСПУ}}^{\Pi-1}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{РИП ВСПУ}}$ — коэффициент РИП для области допустимых распределений ТКН с высокой структурно-потоковой устойчивостью.

В таблице приведены результаты расчетов с помощью обоснованных формул (2), (3) и (5) при $k_{\text{св.тр.}}^{\text{НЗП}} = 1,3$ с заданным в качестве примера $K_{\text{РИП ВСПУ}} = 0,55$ и точностью до одного знака после запятой (рис. 2).

На рис. 2 отражено множество из пяти узлов связи $A = \{a_i; i = 1, 5\}$, на основе которого задана одна корреспондирующая пара узлов $z_1 = (a_1 - a_5)$ из всего множества $Z = \{z_k; k = 1, M\}$ для ТКС. На первом НЗП $\pi_{z_1(1)} = (a_1, a_5)$ образуется $\approx 54,0\%$ информационных потоков, на втором НЗП $\pi_{z_1(2)} = (a_1, a_2, a_5)$ — $\approx 29,7\%$, на третьем НЗП $\pi_{z_1(3)} = (a_1, a_2, a_4, a_5)$ — $\approx 16,3\%$ информационных потоков, что позволяет выполнить требования к ВСПУ при $k_{\text{св.тр.}}^{\text{НЗП}} = 1,3$ и заданном в качестве примера $K_{\text{РИП ВСПУ}} = 0,55$.

Обоснованный выше уровень для коэффициентов РИП с ВСПУ является составной частью общего интервала возможного изменения коэффициента РИП

$$0 < K_{\text{РИП}} \leq 1,0, \quad (6)$$

где НГ соответствует $K_{\text{РИП}} \rightarrow 0$ — случаю отсутствия пу-

Расчетные значения РИП по формулам (2), (3) и (5) при $\pi_{z_1(1)} = (a_1, a_5)$ и $K_{\text{РИП ВСПУ}} = 0,55$

$k_{\text{св.тр.}}^{\text{НЗП}}(z_k)$	Процентное соотношение РИП относительно 100% для ранжированных НЗП ($\Pi = \overline{1,3}$)								
	по формуле (2)			по формуле (3)			по формуле (5)		
	$\Pi=1$	$\Pi=2$	$\Pi=3$	$\Pi=1$	$\Pi=2$	$\Pi=3$	$\Pi=1$	$\Pi=2$	$\Pi=3$
1	100,0			100,0			100,0		
2	$\approx 61,8$	$\approx 38,2$		$\approx 66,7$	$\approx 33,3$		$\approx 64,5$	$\approx 35,5$	
3	50,0	$\approx 30,9$	$\approx 19,1$	$\approx 57,1$	$\approx 28,6$	$\approx 14,3$	$\approx 54,0$	$\approx 29,7$	$\approx 16,3$

тей в ТКН; ВГ соответствует $K_{\text{РИП}} = 1$ — случаю равномерного РИП между всеми путями в ТКН $z_k \in Z$.

Следовательно, коэффициент РИП в рамках уровня ВСПУ (4), когда $\bar{\Phi} \geq K_{\text{РИП ВСПУ}} \geq 0,5$, занимает среднюю часть общего интервала (6). Это позволяет определить верхнюю (сверхвысокую СПУ) и нижнюю части неисследованных ранее уровней СПУ в этом совмещенном интервале (6) и интервале (4). В свою очередь, нижнюю часть в общем интервале можно после обоснования границы раздела декомпозировать на два подуровня — с умеренной и низкой СПУ [7].

В качестве параметров для оценки степени СПУТКН ($z_k \in Z$) предлагается использовать наряду с требуемым коэффициентом связности по НЗП ($k_{\text{св.тр.}(z_k)}^{\text{НЗП}}$) еще и коэффициент группирования (пропорциональности) в системах передачи между распределяемыми информационными потоками ($K_{\text{гр.}}$) [5].

Взаимный переход между $K_{\text{РИП}}$ и $K_{\text{гр.}}$ предлагает производить с помощью следующих выражений:

$$K_{\text{РИП}} = \frac{1}{\sqrt{K_{\text{гр.}} + 1}} \text{ и } K_{\text{гр.}} = \frac{1}{K_{\text{РИП}}^2} - 1. \text{ В результате расчетов}$$

с использованием этих выражений получены соответствующие значения коэффициентов группирования для граничных значений уровня ВСПУ:

$$K_{\text{РИП}} = \bar{\Phi} = 0,618... \text{ соответствует } K_{\text{гр.}} = 1,618... = \Phi;$$

$$K_{\text{РИП}} = 0,5 \text{ соответствует } K_{\text{гр.}} = 3.$$

Например, в системах передачи синхронной цифровой иерархии коэффициент группирования (мультиплексирования) транспортных модулей STM-N кратен числу $K_{\text{гр.}} = 4$, т.е. в пересчете значе-

$$\text{ние } K_{\text{РИП}} = \frac{1}{\sqrt{K_{\text{гр.}} + 1}} = \frac{1}{\sqrt{4 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{5}} = 0,44721.... \text{ Однако}$$

$K_{\text{РИП}} \approx 0,447$ меньше нижней границы коэффициента РИП уровня ВСПУ с $K_{\text{РИП}} = 0,5$, что равнозначно несоответствию $K_{\text{гр.}} = 4$ в STM-N уровню ВСПУ. Поэтому $K_{\text{гр.}} = 4$ в STM-N предлагается после обоснования отнести к уровню умеренной СПУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа подхода к моделированию РИП для ТКН сети электросвязи на основе квазиравномерного распределения нагрузок Шеннона обоснована ОДР коэффициентов РИП с ВСПУ.

Предложена общая математическая модель распре-

деления информационных потоков в ТКН с разной степенью ВСПУ.

Приведены математические выражения для взаимных переходов между коэффициентом РПИ и коэффициентом группирования (мультиплексирования) в транспортных (линейных) модулях цифровых систем передачи ТКС.

Полученные результаты исследований предлагается использовать на этапе системного проектирования (синтеза) в качестве подхода к определению области допустимых распределений с моделированием нижней и верхней границы для коэффициентов распределения информационных потоков, обеспечивающих построение телекоммуникационных сетей с высокой структурно-поточковой устойчивостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гурин, Л.С.** Задачи и методы оптимального распределения ресурсов / Л.С. Гурин, Я.С. Дымарский, А.Д. Меркулов. — М.: Советское радио, 1968. — 464 с.
2. **Давыдов, Г.Б.** Сети электросвязи / Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. — М.: Связь, 1977. — 360 с.
3. **Шеннон, К.Э.** Работы по теории информации и кибернетике / К.Э. Шеннон. — М.: Издательство иностранной литературы, 1963. — 830 с.
4. **Ясинский, С.А.** Алгоритм распределения информации и канального ресурса в информационно-вычислительных сетях методом чисел Фибоначчи / С.А. Ясинский // Проблемы передачи и обработки информации в информационно-вычислительных сетях: Тезисы докладов 7-го Международного НТС. — М.: НИЦПРИС, 1997. — № 3. — С. 20-21.
5. **Ясинский, С.А.** Распределение канального ресурса методами «золотой» пропорции и чисел Фибоначчи / С.А. Ясинский // Сборник рефератов депонированных рукописей. Серия В. Выпуск № 4. — М.: ЦВНИ МО РФ, 1998. — 13 с.
6. **Ясинский, С.А.** Унифицированные математические модели для анализа и синтеза элементов телекоммуникационных сетей: монография / С.А. Ясинский. — СПб.: Военный университет связи, 2003. — 184 с.
7. **Ясинский, С.А.** Метод базового распределения канального ресурса телекоммуникационных направлений с повышенной структурной устойчивостью / С.А. Ясинский // Информация и Космос. — 2009. — № 2. — С. 58-66.

Получено 25.11.21

Влияние нелинейности передающих трактов на характеристики OFDM сигналов

М.Л. Маслаков, АО «Российский институт мощного радиостроения», ведущий научный сотрудник, к.т.н.; maslakovml@gmail.com
Е.П. Сауленко, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, студент; evgeniisaulenko@gmail.com

УДК 621.391.832

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.007

Аннотация. Рассмотрены характеристики OFDM сигналов при их передаче через усилительные тракты с нелинейными искажениями. Приведены выражения комбинационных составляющих для тестового двухтонового сигнала. Исследовано влияние нелинейности на энергетические характеристики OFDM сигналов. Показаны результаты моделирования характеристик OFDM сигналов при прохождении через нелинейные системы, описываемые моделями третьей и пятой степени.

Ключевые слова: нелинейность, OFDM сигналы, фазовая манипуляция, пик-фактор, отношение сигнал/шум.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при прохождении сигналов через усилительные тракты радиопередающих устройств в выходных сигналах возникают искажения. Так, в выходном сигнале могут наблюдаться частотные и фазовые искажения, вызванные неидеальностью амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристик (ФЧХ) системы. Указанные виды искажений относятся к линейным и проявляются в основном на краях полосы частот передающего тракта.

Однако наряду с линейными искажениями в передающих усилительных трактах имеют место нелинейные искажения сигналов на выходе, представляющие собой изменения формы колебаний. При этом в частотном спектре выходного сигнала появляются комбинационные составляющие, отсутствовавшие в исходном входном сигнале.

Измерение уровня нелинейных комбинационных искажений на выходе усилительного тракта усилителя мощности передатчика осуществляют по методу двух тонов [1, 2]. Так, например, для современных передатчиков КВ диапазона характерные значения уровня нелинейности составляют около $-30 \dots -32$ дБ в диапазоне частот от 3 до 5 МГц и порядка -38 дБ для частот более 5 МГц [2, 3].

Однако в современных системах передачи данных применяются сложные спектрально-эффективные сигналы, полученные с использованием технологии ортогонального частотного уплотнения OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) [4]. Очевидно, что оценка уровня нелинейности на основе двухтонового сигнала в соответствии с ГОСТ [1, 2] не позволяет в полной мере оценить влияние нелинейности на характеристики сигналов OFDM. Исследованию этого влияния посвящен ряд публикаций, среди которых можно выделить [5] и [6]. Так, в [5] рассматривается влияние нелинейности на вероятностные характеристики OFDM сигналов, при этом учитываются применяемые кодовые конструкции. В [6] и [7] определено влияние нелинейности на отно-

шение мощности помехи к мощности неискаженного сигнала, однако, результаты получены для тестового двухтонового сигнала и для сигнала OFDM со случайными, а не информационными фазами.

В данной работе проведено исследование и статистический анализ энергетических характеристик OFDM сигналов с различным числом поднесущих при прохождении через нелинейные системы, описываемые моделями третьей и пятой степени.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

В качестве модели нелинейного передающего тракта воспользуемся аналитическими моделями третьей [8] и пятой степени. Рассмотрим их подробнее.

Модель третьей степени, или кубическая модель, определяется выражением

$$u(t) = s(t) + as(t)^3, \quad (1)$$

где $u(t)$ — сигнал на выходе нелинейного передающего тракта; $s(t)$ — сигнал на входе нелинейного передающего тракта; a — некоторый коэффициент.

Пусть передаваемый сигнал является двухтональным, т.е.

$$s(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (2)$$

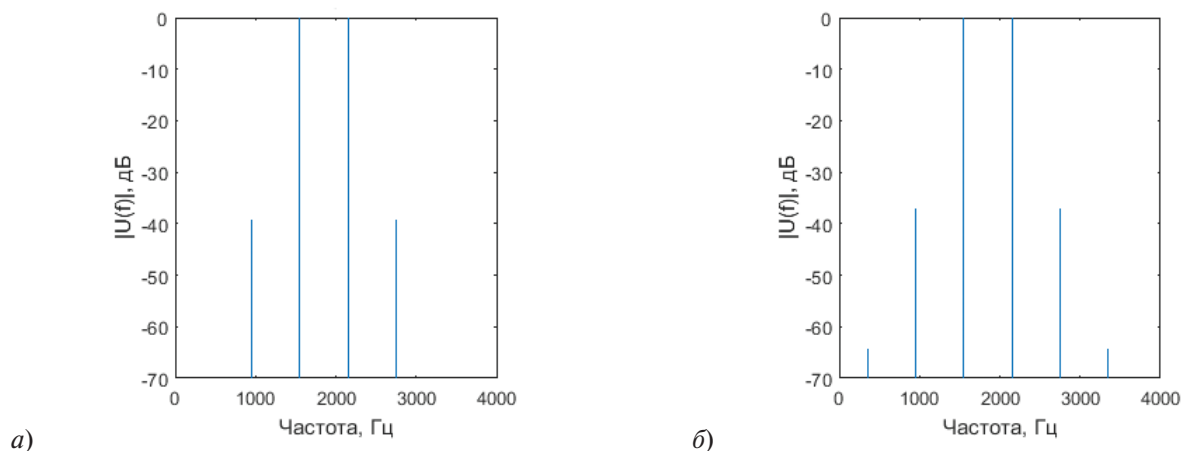
где A_1, A_2 — амплитуды передаваемых тонов; ω_1, ω_2 — частоты тонов; φ_1, φ_2 — их начальные фазы.

При измерении уровня нелинейности амплитуды тонов устанавливают одинаковыми. Для упрощения последующих выкладок примем их равными 1, тогда, подставив (2) в (1), получим

$$\begin{aligned} u(t) = & \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \times \\ & \times [1 + a(1 + \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2) \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \varphi_1)) + \\ & + \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2) + \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \varphi_1)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Рисунок 1

Примеры АЧХ двухтонального сигнала на выходе нелинейного элемента, описываемого моделью третьей (а) и пятой (б) степени



При раскрытии скобок в выражении (3) помимо основных тонов можно выделить несколько комбинационных составляющих, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Комбинационные составляющие двухтонового сигнала при прохождении через нелинейную систему, описываемую моделью третьей степени

$\frac{3a}{4} \cos((2\omega_1 - \omega_2)t + 2\varphi_1 - \varphi_2)$	(4)
$\frac{3a}{4} \cos((2\omega_2 - \omega_1)t + 2\varphi_2 - \varphi_1)$	(5)
$\frac{a}{4} \cos(3\omega_1 t + 3\varphi_1)$	(6)
$\frac{a}{4} \cos(3\omega_2 t + 3\varphi_2)$	(7)
$\frac{3a}{4} \cos((2\omega_1 + \omega_2)t + 2\varphi_1 + \varphi_2)$	(8)
$\frac{3a}{4} \cos((2\omega_2 + \omega_1)t + 2\varphi_2 + \varphi_1)$	(9)

Отметим, что слагаемые, определяемые выражениями (6)–(9), оказываются за пределами полосы пропускания стандартного канала 0,3–3,4 кГц и могут быть отфильтрованы обычным полосовым фильтром. Вместе с тем слагаемые (4) и (5) оказываются внутри полосы пропускания и вносят искажения в излучаемый сигнал. Аналогичные комбинационные составляющие могут быть получены и для модели нелинейности пятой степени, описываемой выражением

$$u(t) = s(t) + as^3(t) + bs^5(t), \quad (10)$$

где a, b – соответствующие коэффициенты модели.

При этом

$$b < a. \quad (11)$$

В табл. 2 приведены лишь те комбинационные составляющие, которые попадают в полосу канала 0,3–3,4 кГц.

Таблица 2

Комбинационные составляющие двухтонового сигнала при прохождении через нелинейную систему, описываемую моделью пятой степени

$\left(\frac{3a}{4} + \frac{25b}{8}\right) \cos((2\omega_1 - \omega_2)t + 2\varphi_1 - \varphi_2)$	(12)
$\left(\frac{3a}{4} + \frac{25b}{8}\right) \cos((2\omega_2 - \omega_1)t + 2\varphi_2 - \varphi_1)$	(13)
$\frac{5b}{8} \cos((3\omega_1 - 2\omega_2)t + 3\varphi_1 - 2\varphi_2)$	(14)
$\frac{5b}{8} \cos((3\omega_2 - 2\omega_1)t + 3\varphi_2 - 2\varphi_1)$	(15)

Отметим, что выражения (12) и (13) для гармоник $(2\omega_1 - \omega_2)$ и $(2\omega_2 - \omega_1)$ подобны выражениям (4) и (5), полученным для модели третьей степени, однако, коэффициент соответствующей гармоники для модели пятой степени отличается. Слагаемые, определяемые выражениями (14) и (15), ранее отсутствовали для модели третьей степени. При этом, в силу условия (11), данные составляющие спектра значительно меньше по сравнению с гармониками, определяемыми из выражений (12) и (13).

На рис. 1 приведены АЧХ двухтонального сигнала с несущими частотами 1550 и 2150 Гц на выходе нелинейного усилительного элемента, описываемого моделью третьей и пятой степени.

На рис. 1 $|U(f)|$ – это АЧХ сигналов, определяемых выражениями (1) и (10).

Однако в случае передачи многочастотного OFDM сигнала вывести подобное (3) аналитическое выражение весьма затруднительно ввиду большого числа несущих. При этом отметим, что несущие OFDM сигнала

выбирают из условия [4]

$$\omega_k = 2\pi \frac{k}{T_{sym}} = k\omega_1,$$

где k — номер несущей частоты; T_{sym} — длительность OFDM символа; ω_1 — частота первой ортогональной гармоники.

Таким образом, значения частот всех комбинационных слагаемых OFDM сигнала, прошедшего через нелинейную систему, также будут кратны ω_1 . Однако фазы различных комбинационных составляющих могут быть отличны от истинной фазы соответствующей гармоники. В результате эффект соответствующих комбинационных слагаемых будет подобен влиянию шума, что приведет к уменьшению отношения сигнал/шум (ОСШ) и, как следствие, к увеличению вероятности ошибки на бит.

ОБ ОЦЕНКАХ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК OFDM СИГНАЛОВ

Среди характеристик OFDM сигналов наибольший интерес представляют энергетические показатели [9], позволяющие количественно описать влияние искажений на исходный сигнал. В данной работе будут исследованы две такие величины: пик-фактор (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) и обозначенное ранее отношение сигнал/шум.

Пик-фактором сигнала называют отношение его максимальной мгновенной мощности к средней (см., например, [4, 9]), значение которого определяют из выражения

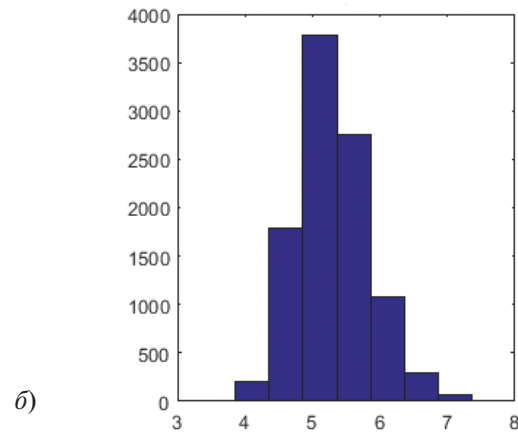
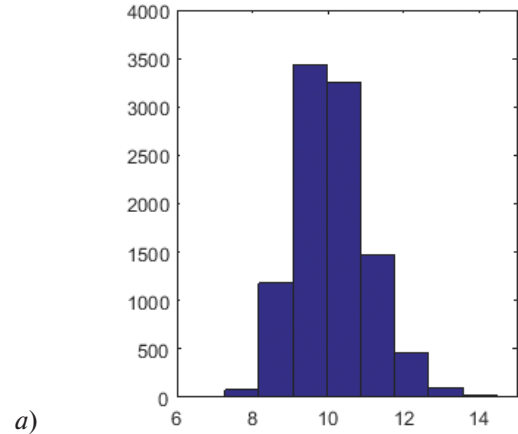
$$\Pi = \max_{t \in [0; T_{sym}]} \frac{p(t)}{P_{cp}},$$

где $p(t)$ — мгновенная мощность, рассчитываемая как $p(t) = s(t)s^*(t)$; $s^*(t)$ — сопряженный к $s(t)$ сигнал; P_{cp} — средняя мощность, получаемая по формуле

$$P_{cp} = \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} p(t) dt.$$

Рисунок 2

Гистограмма распределения пик-фактора OFDM сигнала без искажений (а) и на выходе нелинейного элемента, описываемого моделью третьей степени (б)



Влияние комбинационных составляющих, получаемых при прохождении сигнала через нелинейную систему, эквивалентно добавлению шумовой составляющей к передаваемому сигналу. Эквивалентное значение ОСШ определим как величину, равную отношению средней мощности сигнала $s(t)$ к средней мощности искажений, вносимых полиномиальной моделью m -й степени:

Таблица 3

Измерение PAPR для OFDM сигналов с BPSK

Параметры сигналов	Количество поднесущих									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
M_n	8,02	8,76	9,15	9,43	9,61	9,75	9,87	9,97	10,06	10,13
$M_{n,3}$	6,91	6,86	6,61	6,39	6,15	5,94	5,75	5,58	5,44	5,31
$M_{n,5}$	6,66	6,29	5,82	5,44	5,10	4,82	4,59	4,38	4,21	4,06
D_n	1,60	1,40	1,24	1,18	1,10	1,06	1,01	0,99	0,97	0,89
$D_{n,3}$	1,33	1,12	0,86	0,72	0,58	0,50	0,42	0,36	0,33	0,28
$D_{n,5}$	1,26	0,95	0,63	0,46	0,34	0,27	0,21	0,18	0,15	0,13

Таблица 4

Измерение эквивалентного значения ОСШ для OFDM сигналов с BPSK

Параметры сигналов	Количество поднесущих									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$M_{h^2,3}$	32,06	27,21	24,63	23,09	22,04	21,24	20,64	20,11	19,65	19,25
$M_{h^2,5}$	30,13	24,66	21,91	20,34	19,29	18,46	17,80	17,24	16,74	16,30
$D_{h^2,3}$	9,30	5,55	4,52	3,85	3,25	2,71	2,33	1,99	1,70	1,41
$D_{h^2,5}$	9,58	6,41	4,98	3,85	2,98	2,37	1,92	1,58	1,31	1,09

Таблица 5

Измерение PAPR для OFDM сигналов с QPSK

Параметры сигналов	Количество поднесущих									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
M_{Π}	10,15	12,71	14,25	14,32	15,48	16,38	17,13	18,25	18,71	19,13
$M_{\Pi,3}$	8,84	10,40	11,22	11,70	12,00	12,21	12,32	12,36	12,39	12,41
$M_{\Pi,5}$	8,50	9,52	9,76	9,70	9,51	9,29	9,04	8,79	8,56	8,34
D_{Π}	1,03	0,62	0,42	0,33	0,26	0,22	0,19	0,18	0,16	0,15
$D_{\Pi,3}$	0,87	0,62	0,52	0,48	0,44	0,41	0,39	0,38	0,36	0,33
$D_{\Pi,5}$	0,85	0,70	0,60	0,53	0,44	0,37	0,32	0,28	0,24	0,21

Таблица 6

Измерение эквивалентного значения ОСШ для OFDM сигналов с QPSK

Параметры сигналов	Количество поднесущих									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$M_{h^2,3}$	27,69	22,64	19,99	17,94	16,30	14,89	13,79	12,87	12,09	11,37
$M_{h^2,5}$	25,70	19,35	15,48	13,00	11,35	10,20	9,35	8,72	8,23	7,81
$D_{h^2,3}$	3,54	1,71	2,18	2,28	1,83	1,32	0,94	0,66	0,47	0,36
$D_{h^2,5}$	3,34	1,95	1,13	0,48	0,29	0,21	0,18	0,18	0,17	0,15

$$h_o^2 = \frac{P_{cp}}{\frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} (s(t) - u(t))^2 dt}$$

Отметим, что данные характеристики являются случайными величинами, поэтому для их анализа необходимо рассматривать не мгновенные значения, а их средние значения и дисперсии, основываясь на некоторой выборке. Как показано в [9], необходимая точность достигается при проведении 10^4 экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование анализируемых величин было произведено в среде MATLAB. Для модели третьей степени в (1) значение коэффициента $a = 0,015$, что соответствует уровню нелинейности -38 дБ для двухтонального сигнала; для модели пятой степени значения коэффициентов в выражении (10) составляют $a = 0,014$ и $b = 0,0005$, что также соответствует уровню нелинейности -38 дБ. Результаты моделирования для выборки объемом 10^4 для различных вариантов OFDM сигналов при количестве поднесущих от 10 до 100 и ис-

пользовании двоичной фазовой манипуляции (BPSK) и квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) представлены ниже.

В качестве результатов приведены рассчитанные значения математического ожидания M случайных величин Π и h_o^2 для исходного сигнала $s(t)$ и для сигнала $u(t)$, переданного через нелинейную систему, описываемую моделями третьей или пятой степени, а также соответствующие дисперсии D .

В табл. 3 представлены значения математического ожидания M_{Π} пик-фактора исходного сигнала $s(t)$ с модуляцией BPSK, рассчитанные на основе выборки объемом 10^4 , а также значения соответствующей дисперсии D_{Π} . Здесь же приведены математические ожидания $M_{\Pi,3}$ и $M_{\Pi,5}$ и дисперсии $D_{\Pi,3}$ и $D_{\Pi,5}$ пик-фактора сигнала $u(t)$, прошедшего через нелинейную систему, описываемую соответственно моделями третьей или пятой степени.

Для примера на рис. 2 показаны гистограммы распределения значения пик-фактора OFDM сигнала без искажений и после прохождения нелинейного усилительного тракта, описываемого моделью третьей степени. Представленный здесь результат соответствует

случаю OFDM сигнала со 100 поднесущими и BPSK модуляцией.

В табл. 4 приведены математические ожидания $M_{h_s^2,3}$ и $M_{h_s^2,5}$, а также дисперсии $D_{h_s^2,3}$ и $D_{h_s^2,5}$ для эквивалентного значения отношения сигнал/шум BPSK сигнала $u(t)$, прошедшего через нелинейную систему, описываемую, соответственно, моделью третьей или пятой степени, полученные путем численного моделирования. Как и ранее объем выборки при моделировании составлял 10^4 .

Аналогичные результаты получены для случая QPSK модуляции и приведены в табл. 5 и 6.

Из приведенных результатов видно, что при прохождении OFDM сигнала через нелинейную систему возникают искажения, которые эквивалентны уменьшению ОСШ. Однако пик-фактор OFDM сигнала в этом случае уменьшается, а значит, мощность передатчика используется более эффективно. Вследствие этого, вклад нелинейных искажений в отношение сигнал/помеха на входе радиоприемника будет незначителен.

Эффект уменьшения пик-фактора после прохождения OFDM сигнала через нелинейную систему объясняется следующим. Представим спектральные составляющие сигнала $s(t)$, иначе говоря, поднесущие OFDM сигнала, в виде единичных векторов на комплексной плоскости. Тогда соответствующие комбинационные составляющие будут представлять собой сонаправленные или противоположно направленные векторы

с некоторыми малыми коэффициентами, зависящими от коэффициентов выбранной модели a и b (см. выражения (1) и (10)).

В результате геометрического сложения векторов комбинационных составляющих, имеющих случайные фазы, с векторами поднесущих OFDM сигнала $s(t)$ на соответствующих частотах, произойдет увеличение или уменьшение модулей спектральных составляющих сигнала $u(t)$. АЧХ такого сигнала будет неравномерной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование влияния нелинейных передающих систем на энергетические характеристики OFDM сигналов. При этом в реализованной модели были учтены инерционные и фильтрующие эффекты, присутствующие в реальных усилителях радиопередающих средств.

Из полученных результатов видно, что пик-фактор таких сигналов уменьшается, т.е. мощность передатчика используется более эффективно, вследствие чего вклад нелинейных искажений в отношение сигнал/помеха на входе радиоприемника оказывается незначительным.

В силу того, что в качестве модуляции используется фазовая модуляция различной позиционности, отдельного внимания заслуживает рассмотрение влияния нелинейности на статистические характеристики фаз OFDM сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51742-2001. Передатчики радиовещательные стационарные с амплитудной модуляцией диапазонов низких, средних и высоких частот. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2001. – 43 с.
2. ГОСТ Р 51903-2002. Передатчики радиосвязи стационарные декаметрового диапазона волн. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2002. – 50 с.
3. Березовский, В.А. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / В.А. Березовский, И.В. Дулькейт, О.К. Савицкий. – М.: Радиотехника, 2011. – 442 с.
4. Бакулин, М.Г. Технология OFDM: учебное пособие для вузов / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2016. – 352 с.
5. Назаров, Л.Е. Влияние нелинейности передатчика на многочастотные сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием / Л.Е. Назаров, А.С. Зудилин // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 12.
6. Шинаков, Ю.С. Пикфактор сигналов OFDM и нелинейные искажения в радиоборудовании систем беспроводного доступа / Ю.С. Шинаков // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 58-65.
7. Немировский, М.С. Влияние нелинейности амплитудной характеристики передатчика на основные параметры радиолиний / М.С. Немировский // Радиотехника. – 2009. – № 11. – С. 53-61.
8. Смаль, М.С. Измерение параметров кубической модели нелинейности усилительного устройства / М.С. Смаль, В.В. Егоров // Сборник докладов Второй Всероссийской научной конференции «Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации» – СПб.: ГУАП, 2021. – С. 169-171.
9. Рашич, А.В. Расчет пик-фактора многочастотных сигналов с ортогональным и неортогональным частотным уплотнением / А.В. Рашич, Т.Н. Нгуен, В.А. Сальников // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2018. – Т. 11, Вып. 3. – С. 37-48.

Получено 03.11.21

Алгоритм первоначальной синхронизации в комбинированных системах с расширенным спектром

Б.В. Султанов, Пензенский государственный университет, профессор, д.т.н.; bovl.2012@yandex.ru

В.В. Дорошкевич, Пензенский государственный университет, старший преподаватель; dor.w.w@yandex.ru

УДК 621.391.26

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.008

Аннотация. Рассматривается алгоритм реализации первоначальной синхронизации (поиска) в системах с расширенным спектром, основанных на использовании комбинации псевдослучайной перестройки рабочей частоты, задаваемой линейной псевдослучайной последовательностью, и прямого расширения спектра. Показано, что установление двойной первоначальной синхронизации возможно на основе алгоритма быстрого рекуррентного поиска практически без увеличения его сложности. Предлагаемое решение апробировано на имитационной модели, полученные при этом количественные данные подтверждают его эффективность.

Ключевые слова: комбинация, прямое расширение спектра, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, первоначальная синхронизация.

ВВЕДЕНИЕ

Технология расширения спектра сигналов — перспективное направление развития современных телекоммуникационных систем, позволяющее получить такие преимущества, как повышенная помехоустойчивость по отношению к преднамеренным и непреднамеренным помехам, возможность обеспечения низкой вероятности обнаружения факта передачи информации и др. [1]. Сущность этой технологии заключается в преднамеренном расширении полосы частот, занимаемой сигналом-переносчиком сообщений и значительно превышающей ту, которая необходима для передачи этих сообщений с заданными скоростью и критерием качества. При этом в конечном итоге отмеченные выше преимущества проявляются тем в большей степени, чем шире полоса частот сигнала-переносчика.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Расширение спектра может осуществляться разными методами. В настоящее время наибольшее распространение получили методы прямого расширения спектра (ПРС) и псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). При этом ППРЧ позволяет обеспечить распределение энергии передаваемого сигнала в наиболее широком диапазоне частот W . Дополнительное расширение диапазона может быть достигнуто в комбинированных системах с расширенным спектром, построенных на основе сочетания этих методов.

В таких системах расширение спектра передаваемого

сигнала $u(t)$ на интервале T_c методом ПРС производится путем его балансной модуляции бинарной псевдослучайной последовательностью $\{c_n\}$ с периодом N . Эта последовательность состоит из равновероятных элементов, принимающих значения ± 1 и генерируемых с частотой $f_{\text{ПРС}}$, в N раз превышающей частоту $f_c = 1/T_c$. В результате ширина спектра W_u сигнала $u(t)$ увеличивается в N раз и становится равной $W_{\text{ПРС}} = NW_u$.

Расширение спектра методом ППРЧ происходит за счет управляемого датчиком псевдослучайного кода скачкообразного изменения частоты несущего колебания при модуляции передаваемого сигнала данными. При этом величина $W_{\text{ПРС}}$ представляет собой минимально необходимую разность частот между двумя смежными скачками несущей частоты $f_{h,k}$ и $f_{h,k-1}$.

В том случае, когда в процессе ППРЧ используются M «прыгающих» частот, общая ширина спектра W_{ss} формируемого таким образом сигнала составит $W_{ss} = MW_{\text{ПРС}} = MNW_u$, а его энергетический спектр на k -м скачке частоты, характеризуемом соответствующим значением мгновенной несущей частоты $f_{h,k}$, в области положительных частот будет иметь максимум, располагающийся на частоте $f = f_{h,k}$.

Для снятия расширения спектра в приемнике необходимо иметь:

- 1) опорную последовательность гармонических колебаний с частотами $\hat{f}_{h,k} = f_{h,k}$, что возможно лишь после установления синхронизации между выходным сигналом опорного генератора прием-

ника, формирующего последовательность перестраиваемых рабочих частот $\hat{f}_{h,k}$, и принимаемым сигналом (это позволяет снять расширение спектра, обусловленное ППРЧ);

- 2) опорную последовательность $\{\hat{c}_n\}$, синфазную с псевдослучайной последовательностью $\{c_n\}$ (позволяет снять прямое расширение спектра).

Обе задачи должна решить система синхронизации, входящая в состав приемника и являющаяся наиболее сложным и ответственным его элементом.

Процедура синхронизации состоит из двух стадий:

- первоначальная синхронизация (поиск), обеспечивающая временное выравнивание сравниваемых сигналов с точностью приблизительно до половины длительности одного элемента расширяющей последовательности (скачка частоты при ППРЧ и одного элемента последовательности $\{\hat{c}_n\}$ при ПРС);
- точная синхронизация (слежение), приводящая к их полному совпадению [1, 2].

При этом наиболее продолжительной и сложной является процедура поиска. Необходимость двойной синхронизации в системах с ПРС/ППРЧ в общем случае существенно усложняет решение задачи.

Вместе с тем, при использовании на этапе ППРЧ в качестве датчика псевдослучайного кода, задающего закон изменения рабочей частоты, регистра сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС) становится возможной реализация рекуррентного поиска с применением авторегрессионного спектрального оценивания (АСО). С его помощью код РСЛОС определяется на основе L (количества разрядов РСЛОС) — последовательно выполняемых оценок частоты следующих друг за другом скачков, причем из каждого двоичного числа, соответствующего очередной оценке, используется лишь один старший или наиболее значимый бит (НЗБ).

Подробно алгоритмы реализации этой процедуры применительно к системе с ППРЧ представлены в [3]. Не вдаваясь в детали, отметим, что необходимым условием их применения является соответствие максимума энергетического спектра сигнала ППРЧ на k -м скачке мгновенному значению частоты $f_{h,k}$.

Однако, как отмечалось выше, таким же свойством обладает и энергетический спектр сигнала ПРС/ППРЧ, что позволяет применить данный подход определения $f_{h,k}$ и к комбинированной системе ПРС/ППРЧ. При этом задача фазирования последовательностей $\{\hat{c}_n\}$ и $\{c_n\}$ в комбинированной системе при небольших значениях N (например, $N \leq 10$) оказывается аналогичной устранению первоначальной неопределенности начала поиска, обусловленной несинхронностью моментов скачкообразного изменения частоты принимаемого сигнала с границами интервалов оценивания в приемнике в системе с ППРЧ [3].

В такой ситуации алгоритм поиска заключается в следующем. Вначале осуществляется запоминание

последовательности $\{y_3(k)\}$, содержащей $2N_c$ отсчетов входного сигнала, выбранных за время $2T_c$. Далее параллельно во времени рекуррентным методом на основе АСО вычисляются N оценок текущего значения управляющего кода РСЛОС. Для вычисления i -й оценки ($i = \overline{1, N}$) в качестве входного сигнала используется фрагмент $\{y_7^i(k)\}$ запомненной последовательности $\{y_3(k)\}$ длительностью N_c , сдвинутый относительно ее начала

на $(i-1) \frac{N_A}{N}$ отсчетов:

$$y_7^i(k) = \begin{cases} y_7(k) & \text{при } (i-1) \frac{N_A}{N} < k \leq (i-1) \frac{N_A}{N} + N_A; \\ 0 & \text{при других } k. \end{cases}$$

После этого проводится тестирование правильности полученных результатов, реализуемое параллельно во времени с помощью N корреляторов. На один из их входов подается сигнал, пришедший из канала, а на второй — опорный сигнал, формируемый как промодулированная последовательностью $\{c_n\}$ совокупность отсчетов несущего колебания с частотой $f_{h,k}$, задаваемой соответствующей оценкой управляющего кода РСЛОС. Синхрокод РСЛОС, обеспечивший наилучший положительный результат тестирования, принимается за окончательное решение задачи поиска. При этом становится решенной и задача фазирования последовательностей $\{\hat{c}_n\}$ и $\{c_n\}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ

Предлагаемое решение было апробировано путем имитационного моделирования. Как уже отмечалось, дополнительное расширение спектра, получаемое в результате комбинирования ППРЧ и ПРС, позволяет в конечном итоге усилить преимущества, присущие подобным системам. Влияние ширины спектра сигнала на их помехоустойчивость, возможности обеспечения низкой вероятности обнаружения факта передачи и некоторые другие изложены в [1, 4–7].

С помощью моделирования покажем, как за счет комбинирования ППРЧ с ПРС можно повысить помехоустойчивость предлагаемой процедуры поиска. В основу базового варианта модели были заложены параметры, позволяющие сопоставить результаты, полученные в данной работе, с их аналогами, имеющими место в системе с ППРЧ, описанной в [3]. Исследовался наиболее эффективный из рассмотренных в [3] методов рекуррентного поиска, построенный на основе алгоритма идентификации параметров решетчатой структуры на базе блочной обработки данных.

Для передачи данных, осуществляемой с тактовой частотой $f_t = 1/T_t = 1 \text{ кГц}$, использовалась двухпозиционная частотная манипуляция с информационными частотами $f_1 = 2 \text{ кГц}$ (символ 1) и $f_2 = 1 \text{ кГц}$ (символ 0).

Наличие балансной модуляции бинарной псевдослучайной последовательностью $\{c_n\}$ с периодом $N = 10$ на каждом скачке несущей частоты передаваемого сигнала позволило в 10 раз увеличить длительность скачка T_c и сделать ее равной $T_c = T_T = 0,001$ с, сохранив ширину полосы частот, соответствующей спектру одного скачка, $\Delta f_{\text{ск}} = 2/T_c = 20$ кГц. Это обстоятельство позволяет увеличить помехоустойчивость предлагаемого алгоритма поиска, так как в результате увеличения T_c возрастает объем усреднения, реализуемого в процессе идентификации параметров линейного предсказателя, и мешающее влияние шума снижается.

Расширение спектра сигнала методом ППРЧ осуществлялось под управлением бинарной псевдослучайной последовательности, формируемой посредством РСЛОС, содержащего девять разрядов. Структура РСЛОС задается характеристическим полиномом вида $P(x) = x^9 + x^5 + 1$. При этом максимальное значение общей ширины диапазона частот передаваемого сигнала оставалось таким же, как и в случае, рассмотренном в [3], и составило $\Delta f_{\text{max}} = W + f_1 = 10222 \cdot 10^3$ МГц, где $W_{\text{SS}} = (2^9 - 1)\Delta f_{\text{ск}} = 10,22$ МГц, а частота дискретизации f_d выбрана равной 24 МГц.

В процессе моделирования в качестве помехи, присутствующей в канале, рассматривался аддитивный белый гауссовский шум с дисперсией, обеспечивающей необходимое отношение сигнал/шум (ОСШ), задаваемое как $h = 10 \lg(P_{\text{сигн}}/P_{\text{ш}})$, где $P_{\text{сигн}}$ – мощность передаваемого сигнала; $P_{\text{ш}}$ – мощность шума в полосе частот $0 - 0,5f_d$. Итогом работы моделирующих программ стала оценка вероятности P ошибочного определения НЗБ при реализации рекуррентного поиска на основе АСО.

Объем выборки, реализованный в описываемом вычислительном эксперименте, составлял 10^5 (т.е. значение P оценивалось по результатам анализа 10^5 скачков частоты). При этом относительная погрешность оценки с доверительной вероятностью $P_d = 0,95$ не превышала $2 - 20\%$ при изменении значений P в диапазоне соответственно $10^{-1} - 10^{-3}$. Исследование проводилось при ОСШ $h = -12$ дБ, $h = -15$ дБ и $h = -20$ дБ, т.е. при тех же условиях, что и в [3]. Оценка величины P осуществлялась при значениях порядка M линейного предсказателя, изменявшихся в диапазоне от 12 до 20 с шагом 4.

Полученные результаты представлены в табл. 1 в графах ППРЧ+ПРС. Для наглядной иллюстрации преимуществ предлагаемого алгоритма поиска в графах ППРЧ приведены значения P , получаемые при тех же условиях, когда для достижения такого же значения Δf_{max} применялся метод ППРЧ. Из таблицы видно, что рассматриваемый подход оказывается в определенной степени приемлемым и при таких низких значениях ОСШ, при которых его аналог в системе с ППРЧ практически не работоспособен.

В [3] предлагалось повысить помехоустойчивость рекуррентного поиска в системе с ППРЧ и обеспечить возможность его применения при малых ОСШ за

Таблица 1

Зависимость вероятности ошибочного определения НЗБ от порядка линейного предсказателя при различных ОСШ

Порядок линейного M предсказателя		$M = 12$	$M = 16$	$M = 20$
$h = -12$ дБ	ППРЧ	0,0059	0,0042	0,0027
	ППРЧ+ПРС	0,0021	0,0016	0,0008
$h = -15$ дБ	ППРЧ	0,0553	0,0372	0,0278
	ППРЧ+ПРС	0,0039	0,0026	0,0015
$h = -20$ дБ	ППРЧ	0,3537	0,3393	0,3320
	ППРЧ+ПРС	0,048	0,0306	0,0161

Таблица 2

Зависимость вероятности ошибочного определения НЗБ от порядка линейного предсказателя при ОСШ $h = -20$ дБ и увеличенной частоте дискретизации

Порядок линейного M предсказателя		$M = 12$	$M = 16$	$M = 20$
$h = -20$ дБ	ППРЧ	0,0135	0,0076	0,0051
	ППРЧ+ПРС	0,0025	0,0022	0,0012

Таблица 3

Зависимость вероятности ошибочного определения НЗБ от порядка линейного предсказателя при ОСШ $h = -12$ дБ и временном сдвиге $T_{\text{сдв}} = T_c/10$.

Порядок M линейного предсказателя	$M = 12$	$M = 16$	$M = 20$
Вероятность P ошибочного определения НЗБ	0,0033	0,0019	0,0012

счет увеличения частоты дискретизации f_d при той же длительности одного скачка $T_c = 0,1T_T = 10^{-4}$ с, которая приводит к увеличению объема усреднения, уменьшающего влияние шума. При этом оказывается возможным и целесообразным расширить диапазон частот передаваемого сигнала, что, как уже отмечалось, усиливает преимущества подобных систем.

В частности, увеличив число L разрядов РСЛОС до 13 при том же значении $\Delta f_{\text{ск}} = 20000$ Гц, получаем $W = (2^{13} - 1)\Delta f_{\text{ск}} = 163820 \cdot 10^3$ Гц. Выбрав $f_d = 360$ МГц, можно обеспечить работоспособность алгоритма и при ОСШ $h_d = -20$ дБ, что иллюстрируется данными, представленными в [3] и приведенными в табл. 2. Однако, как видно из таблицы, применение при тех же условиях алгоритма с комбинацией ППРЧ и ПРС, в котором $N = 10$ и $T_c = T_T = 0,001$ с, позволяет получить заметный дополнительный выигрыш в помехоустойчивости.

Рассмотрим далее влияние на величину P временного сдвига $T_{\text{сдв}}$, возникающего вследствие несовпадения моментов скачкообразного изменения частоты принимаемого сигнала с границами интервалов оценивания. Как отмечалось выше, устранение этого сдвига в предлагаемом алгоритме первоначальной синхронизации в системе с комбинацией ППРЧ и ПРС одновременно решает задачу фазирования последовательностей $\{\hat{c}_n\}$ и $\{c_n\}$. В табл. 3 представлены значения P , характеризую-

ющие возможности алгоритма в системе с параметрами базового варианта имитационной модели и полученные при ОСШ $h = -12$ дБ, $T_{\text{сдв}} = T_c/N = T_c/10$ и различных порядков линейного предсказателя.

Как видно из приведенных данных, предложенный алгоритм поиска в рассматриваемых условиях способен обеспечить надежный результат, что и обеспечивает возможность его практической реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье алгоритм практически без дополнительного увеличения его сложности может быть использован при десятикратном расширении спектра системы с ППРЧ за счет добавления ПРС. В том случае, если ширина спектра систем с ППРЧ и комбинацией ППРЧ+ПРС остается одинаковой, применение данного алгоритма обеспечивает существенное повышение помехоустойчивости процедуры поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Simon, M.K.** Spread Spectrum Communication Handbook / M.K. Simon, J.K. Omura, R.A. Sholtz, B.K. Levitt // Electronic Edition, Mc Graw-Hill, Inc., New York. – 2002. – Р. 1214.
2. **Журавлев В.И.** Поиск и синхронизация в широкополосных системах / В.И. Журавлев. – М.: Радио и связь, 1986. – 240 с.
3. **Султанов, Б.В.** Исследование метода быстрого поиска в системах с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Б.В. Султанов, Н.Б. Румянцева, С.Л. Зефи-ров // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 6. – С. 583-591.
4. **Прокис, Д.Ж.** Цифровая связь / Д.Ж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 798 с.
5. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под общей ред. А.В. Назаренко. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
6. **Феер, К.** Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер; пер. с англ. под ред. В.П. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
7. **Борисов, В.И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.

Получено 30.11.21

Использование временных задержек при первичной обработке звуковых сигналов

С.Л. Мишенков, МТУСИ, профессор кафедры ТиЗВ им. С.И. Катаева, д.т.н.; rn3aa@yandex.ru
Е.С. Епифанова, ФГУП ТТЦ «Останкино», инженер, магистр; epifelen@gmail.com

УДК 654.19

DOI: 10.34832/ELSV.2022.26.1.009

Аннотация. Показано, что применение современных многомикрофонных технологий первичной обработки звуковых сигналов приводит к уничтожению «глубинной» локализации звуковой картины в звуковых каналах вещания и при звукоусилении. Цифровые методы обработки сигналов позволяют дополнить звукорежиссерские пульта программы управляемых временных задержек сигналов от микрофонов и их групп, а также в канале реверберации. Анализируются значения временных задержек сигналов от источников при реальном исполнении и выбираются аналогичные значения задержек, которые обеспечивают глубинное восприятие звуковой картины и плавность их регулировок. Рекомендуется введение специальных индикаторов 2D/3D местоположения воспринимаемых слушателем источников звука.

Ключевые слова: звуковые каналы вещания и звукоусиления, глубинная локализация.

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель первичной обработки сигналов звукового вещания или звукоусиления — создание у слушателя иллюзии звучания, задуманного авторами (композитором и исполнителями), в предполагаемых условиях исполнения (большой или малый концертный зал, комната, на природе и т.д.).

Прямой, неискаженный перенос звучания от исполнителя к слушателю невозможен по причине воздействия акустических, визуальных и других факторов в местах исполнения и звуковоспроизведения. Например, длительность и динамика фортепьянной пьесы при ее исполнении в разных помещениях различны.

Первый этап первичной обработки сигналов осуществляют исполнители: дирижер, солисты и ансамбль. В случае ансамблевой игры дирижер управляет соотношениями громкостей звучания различных инструментов, их групп.

Особенно сложно сформировать звучание, которое отображает пространственное расположение исполнителей в каждой мизансцене или рассадке ансамбля, как оно задумано авторами или режиссерами.

Следует отметить, что первые попытки передать объемное звучание были предприняты сразу после изобретения телефона — в 1881 г. Эксперименты с трансляцией оперных спектаклей из театров в Париже на Всемирную выставку и в Москве в квартиры слушателей проводились сразу по двум телефонным линиям (два микрофона в зале и два звуковоспроизводящих капсюля у слушателя).

Прошло 140 лет непрерывного совершенствования

всех звеньев звукового тракта, включая электроакустические преобразователи (микрофоны и звуковоспроизводящие системы), каналы передачи электрических сигналов, элементы записи сигналов на разные носители, а также различных видов обработки электрических сигналов. К середине XX века показатели качества каналов могли достигать уровня, при котором вносимые искажения становились незаметными для любых экспертов, что послужило основой для более подробных исследований и коррекции принципов звуковоспроизведения в помещениях, где происходили прослушивание и первичная обработка сигналов в звуковых каналах.

Основное внимание уделялось акустике помещений при звуковоспроизведении и кинопоказе, а также коррекции акустики залов с помощью электроакустических методов. Совершенствовались теория и методы построения многоканальных систем звуковоспроизведения. Например, акустическая система Московского панорамного кинотеатра «Мир» основывалась на девятиканальной системе, громкоговорители которой размещались равномерно по стенам круглого помещения. В больших концертных залах перешли к амбиофоническим системам, которые позволяли повысить равномерность уровня акустического давления по всей озвучиваемой площади. В бытовых акустических системах воцарилась двухканальная стереофония, некоторое время делались попытки внедрения на ее основе матричной квадрофонии.

Перечисленные системы обеспечивают локализацию звука по фронту или периметру помещения для прослу-

шивания, приближаясь к имитации акустики первичного помещения, в котором находились источники звука, но не касаются формирования самого сигнала при его электроакустических преобразованиях для первичной обработки.

ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Классическая двухканальная стереофония (один стереомикрофон для всего ансамбля и одна пара акустических систем в месте воспроизведения) на некоторой части помещения прослушивания позволяет передать глубину источника звука.

Принятая в настоящее время система первичной обработки сигналов (много микрофонов с последующим сложением с помощью панорамных регуляторов) приводит звучание всех сигналов в одну плоскость, так как исключает влияние задержки распространения звука между исполнителями в первичном помещении.

Окончательно исключает возможность глубинного восприятия работа авторегуляторов в каналах связи, которые сжимают диапазон уровней для повышения громкости воспроизведения у слушателя.

Необходимость передачи информации по глубине звуковой картины обоснована в работах А.Н. Качеровича, который продемонстрировал вариант глубинной стереофонии, когда микрофоны и громкоговорящие системы направлены на фронтальные и задние стены помещений с источником звука и слушателем. Демонстрация проходила при воспроизведении специальной фонограммы с фильмофонографа и стандартной части художественного фильма в кинозале Научно-исследовательского кинофотоинститута (НИКФИ).

Вспомним отличающееся «естественностью» звучание даже монофонических передач из концертных залов, записанных с помощью одного микрофона на весь ансамбль, и сравним их с современными многомикрофонными, при которых времена начала звучания у всех исполнителей практически совпадают.

Выделение восприятия первого плана звукорежиссерами производится увеличением громкости, что, конечно, нарушает громкостной и тембральный баланс, задуманный автором. Этот вывод справедлив для звуковых картин речевых и музыкальных действий.

Необходимо отметить, что искажаются и реверберационные отклики зала, которые определяются расположением каждого источника звука.

Для корректной звукопередачи многоплановых ансамблевых сцен 2D необходимо в каждый из микрофонных каналов ввести регулируемую звукорежиссером линию задержки сигналов и дополнить состав пультов дисплеями, отображающими зоны кажущегося расположения микрофонов (исполнителей) в плоскости действия каждой мизансцены или рассадки ансамбля в плоскости сцены. В программное обеспечение таких индикаторов полезно заложить возможность имитации

искажения глубинного восприятия звука для сигналов на выходе каналов связи у слушателя. Эти же системы можно применять для выделения тех или иных звучаний, подчеркивающих творческие замыслы. Требуют доработки и устройства (их программное обеспечение) для создания искусственной реверберации.

Для внедрения «иммерсивных» 3D-систем звукопередачи (распределение кажущихся источников звука по фронту, глубине и высоте) необходимо применение специфических стереомикрофонов и «панорамных» преобразователей, работающих в вертикальной плоскости. Отображение расположений виртуальных зон звукоизвлечения на индикаторных дисплеях также должно стать трехмерным.

Для работы систем кинопоказа и телевидения (включая голографические), передающих объем и точную локализацию действия, следует обеспечить соответствие звуковых и видеокартин. Можно представить себе автоматическое сопровождение местоположений видеообъектов издаваемыми ими звуками. Такая задача решается с помощью компьютеров, распознающих заданные образы и управляющих локализацией места звукоизлучения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Для определения требуемых времен задержки необходимо проанализировать время пробега звука между исполнителями, располагающимися на разных планах в различных мизансценах и рассадках музыкантов и солистов. Музыканты при ансамблевом исполнении находятся не ближе одного метра друг от друга, в пределах принятой рассадки (американская или европейская) для больших симфонических оркестров.

Большинство различных театральных и концертных действий происходит на сцене или при некотором ее выносе в зал. Использование всей площади зала возможно, но этот вариант можно рассматривать как трюковый: его следует предусмотреть в требованиях к специальному оборудованию для реализации неких экстравагантных действий.

Анализ нормативных документов по проектированию и планов наиболее популярных классических и современных залов и их сцен [1] позволяет сформулировать значения заданных временных задержек в каналах, опираясь на реальные задержки распространения звука, происходящие при исполнении в реальных сценических условиях, при акустическом исполнении оркестровой музыки в условиях концертного или театрального зала.

Были проанализированы планы 15 наиболее известных сцен мира. Точных размеров, как во всех цирках (диаметр любой арены — 13 м), найти не удалось. Площадь сцены любого драматического или музыкального театра не превышает 22х22 м². Портал сцены не более 11–13 м. Авансцена во многих залах имеет ширину, практически равную ширине зала: до 30–35 м при глубине 3–5 м.

Музыканты большого симфонического оркестра (100–110 инструменталистов) располагаются в основном в квадрате, сторона которого не превышает портала, хотя некоторые инструменты, например арфы или рояль, могут быть вынесены на крылья авансцены. Площадь театральной оркестровой ямы меньше, но меньше и численность исполнителей (меньше численности большого симфонического оркестра). Во всяком случае, удаление / оркестранта от дирижера не превышает 15–20 м. При больших расстояниях визуальная связь между ними затрудняется, как и контроль звучания каждого инструмента дирижером.

Значительно больше расстояния от оркестранта до дирижера при выступлениях военных духовых оркестров, на парадах, но в этом случае и роль дирижера упрощается до задания строгого ритма, который вырабатывается на многочисленных репетициях (соответственно уставу — два шага в секунду).

Приняв скорость распространения звука в воздухе $v = 340$ м/с и максимальное расстояние от заднего ряда музыкальных инструментов до выдвинувшегося вперед солиста $l = 25$ м, можно утверждать, что время t пробега звуковой волны между ними будет примерно равно

$$t = l/v = 25/340 \text{ с} = 0,0735 \text{ с} = 75 \text{ мс.}$$

С учетом этого значения и должны проектироваться временные задержки сигналов в каждом микрофонном или групповом канале пульта звукорежиссера. Необходимо отметить, что объединяемые при обработке звукорежиссером группы инструментов находятся на одинаковых планах при принятой рассадке оркестра, что может ограничить требуемое количество устройств временных задержек числом объединяемых групп и запасом для солирующих инструментов.

Дифференциальный порог в оценке времени двух следующих друг за другом сигналов составляет 2 мс [2], что позволяет выполнить переключение линий задержки ступенчатым через 2 мс. Дифференциальный порог (2 мс) определяется для очень коротких импульсов (0,1–0,2 мс).

Прямого ответа на вопрос, допустима ли неточность по времени поступления двух и более сложных звуков, нет, но бесспорно, что именно атака задает тембр — различия в звучаниях, которые и определяют узнавание инструментов.

Бытует мнение, что разнотой во вступлениях приводит к интерференционной картине звукового поля нескольких источников, формирующей периодическую неравномерность суммарной амплитудно-частотной

характеристики. На самом же деле звуки даже от двух одинаковых инструментов, излучающих в одной точке, обязательно сформируют интерференционную картину из-за некоторой неточности их настройки, что как раз и отличает живое ансамблевое звучание от точного — до фазы звучания дважды одного и того же инструмента. Общеизвестна предварительная расстройка трех струн, соответствующих одной клавише рояля, придающая звучанию теплый, модулированный свертонизкой частотой, суммарный звук.

Звучание скрипичной группы не может быть заменено усиленным в 12 раз звучанием одной скрипки. Аналогично: певцы поют хором не только для увеличения громкости.

В настоящее время недостаточно изучено слуховое восприятие изменения фазовых соотношений между составляющими суперпозиции сложных сигналов, в котором может быть заложена основа более совершенной обработки звуковых сигналов и нормирования каналов передачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для восстановления глубинной локализации источников в звуковой картине при многомикрофонной технологии необходимо использовать задаваемые звукорежиссером задержки сигналов в микрофонных, групповых каналах и канале реверберации. Значения временной задержки — 0–75 мс, со скачками регулировки не более 2 мс. Данные дополнения необходимы для первичной обработки сигналов, подаваемых в каналы звукового и телевизионного вещания и в системы звукоусиления и озвучения.

Для того чтобы облегчить работу звукорежиссеру, необходимо специальный индикатор 2D/3D-локализации источников звука в формируемой звуковой картине.

Сформировать соответствие звуковой и видеокартин телевизионных передач звуко- и видеорежиссерам помогает специальное программное обеспечение, отслеживающее размещение и передвижение видимых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанова, Е.С. Применение систем электросвязи при подготовке и исполнении ансамблевых произведений / Е.С. Епифанова // Электросвязь. — 2021. — № 3.
2. Алдошина, И.А. Музыкальная акустика / И.А. Алдошина, Р. Приттс. — СПб: Композитор, 2006.

Получено 25.11.21

EDITORIAL BOARD

V.V. Butenko, editor-in-chief,
Dr.Sci. (Tech.)
A.S. Adjemov, Dr.Sci. (Tech.)
S.V. Bachevskiy, Dr.Sci. (Tech.)
V.A. Burdin, Dr.Sci. (Tech.)
V.A. Efimushkin, Ph.D.
V.A. Grigoriev, chief-editor,
Dr.Sci. (Tech.)
O.A. Ivanov, Ph.D.
S.V. Kizima, Dr.Sci. (Tech.)

A.Eu. Krupnov, Ph.D.
A.Eu. Koucheryavy, Dr.Sci. (Tech.)
N.V. Lemeshko, Dr.Sci. (Tech.)
V.N. Livshits, Dr.Sci. (Econ.)
S.L. Mishenkov, Dr.Sci. (Tech.)
N.N. Mukhitdinov, Ph.D.
N.N. Murashov
A.G. Nazeykin, Ph.D.
A.P. Ositis, Ph.D.
N.P. Reznikova, Dr.Sci. (Econ.)

R.V. Sheredin, Ph.D.
Yu.M. Spodobaev, Dr.Sci. (Tech.)
M.M. Stoupnitskiy, Ph.D.
V.A. Strelets, Ph.D.
V.O. Tikhvinskiy, Dr.Sci. (Econ.)
V.V. Vityazev, Dr.Sci. (Tech.)
E.Eu. Volodina, Dr.Sci. (Econ.)
Yu.B. Zubarev, Corresponding
member of the RAS

ABSTRACTS

MODEL NETWORK FOR RESEARCH, TRAINING, AND TESTING IN THE AREA OF TELEPRESENCE SERVICES

A.E. Koucheryavy, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), head of the department of communication networks and data transmission (CN&DT), professor, Dr.Sci.(Tech.); akouch@mail.ru

M.A. Makolkina, SPbSUT, department of CN&DT, professor, Dr.Sci.(Tech.); makolkina@list.ru

A.I. Paramonov, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Dr.Sci.(Tech.); alex-in-spb@yandex.ru

A.I. Vybornova, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Ph.D.; a.vybornova@gmail.com

A.S. Muthanna, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Ph.D.; ammarexpress@gmail.com

A.Yu. Matyuhin, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Ph.D.; matukhin@list.ru

R.A. Dunaitsev, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Ph.D.; roman.dunaitsev@mail.ru

S.S. Vladimirov, SPbSUT, department of CN&DT, associate professor, Ph.D.; vladimirov.opds@gmail.com

O.I. Vorozheikina, SPbSUT, department of CN&DT, head of a laboratory; bonmot@yandex.ru

M.V. Zaharov, SPbSUT, department of CN&DT, senior lecturer; max_z.93@mail.ru

V.D. Fam, SPbSUT, department of software engineering and computers, postgraduate; daiphm93@gmail.com

A.V. Marochkina, SPbSUT, department of CN&DT, assistance lecturer; anastasiy1996@mail.ru

L.S. Gorbacheva, SPbSUT, department of CN&DT, assistance lecturer; 777gls@mail.ru

B.O. Pankov, SPbSUT, department of CN&DT, undergraduate; bogdan.usman48@yandex.ru

B.N. Anvarzhonov, SPbSUT, department of CN&DT, undergraduate; anvarjonovb@gmail.com

Keywords: model network, telepresence services, holographic communications, augmented reality, 3D, avatar robots, multifunctional robots.



The paper presents the architecture and characteristics of a new generation model network designed for research, training, and testing in the field of telepresence services. To build a model network, the following are used: a terabit core, a variety of server equipment, holographic fans, 3D cameras and projectors, avatar robots and multifunctional robots, augmented reality terminal devices, as well as the Internet of Things equipment to create models of superdense networks. The first test results are presented, on the basis of which requirements for the parameters of quality of service and perception in the provision of telepresence services can be developed in the future.

THE ARCHITECTURE OF THE INDIVIDUALIZED SUBSCRIBER RESCUE MANAGEMENT SYSTEM

V.K. Sarian, FSUE NIIR, scientist consultant, academician of the NAS RA, Dr.Sci.(Tech.); sarian@niir.ru

R.V. Meshcheryakov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science (ICS RAS), chief researcher, professor of the RAS, Dr.Sci.(Tech.); MRV@ieee.org

D.V. Bosomikin, FSUE NIIR, director of the scientific and technical center; dvb@niir.ru

A.A. Zakharova, ICS RAS, chief researcher, Dr.Sci.(Tech.); zaawmail@gmail.com

N.V. Kozlova, FSUE NIIR, head of a department; nvkozlova@niir.ru

Keywords: mass information service, emergency, individualized control of subscriber rescue, information management system.



Based on an overview of the tools and technical solutions used in emergency situations, a new approach to the organization of an information system for individualized subscriber rescue management is outlined. The principles that should be used in the design and implementation of this system are formulated and described. Human behavior in critical situations is taken as an object of control in the design of the system. The advantages, prospects of development, and application of the proposed system are noted.

SOFTWARE PLATFORM FOR THE IMPLEMENTATION AND DEPLOYMENT OF INDIVIDUALIZED SUBSCRIBER RESCUE MANAGEMENT SYSTEM

V.K. Sarian, FSUE NIIR, scientist consultant, academician of the NAS RA, Dr.Sci.(Tech.); sarian@niir.ru

O.D. Borisenko, Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences (ISP RAS), research officer; borisenko@ispras.ru

A.K. Petrenko, ISP RAS, head of a department, Dr.Sci.(Phys.-Math.); petrenko@ispras.ru

D.V. Bosomikin, FSUE NIIR, director of the scientific and technical center; dvb@niir.ru

N.V. Kozlova, FSUE NIIR, head of a department; nvkozlova@niir.ru

Keywords: cloud computing, reliability, cybersecurity, software development technologies.



The paper considers the requirements for technologies for the development, deployment, and operation of distributed (cloud) software and hardware systems suitable for meeting the requirements of individualized subscriber rescue management systems (ISRM). It is proposed to use the ISP RAS Technological Platform as a basis for the development and deployment of ISRM systems. The basic composition of the Technological Platform is described, examples of using the Technological Platform are presented.

ESTABLISHING CONNECTIONS IN SIMULATORS OF SPECIAL-PURPOSE ZONE DATA TRANSMISSION NETWORKS

R.A. Belfer, Bauman University (BMSTU), department of the information security, associate professor, Ph.D.; a.belfer@yandex.ru

A.V. Kravtsov, Central Research Institute of the Air Forces, head of a department; skyak78@gmail.com

M.A. Basarab, BMSTU, head of the department of the information security, professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.); bmic@mail.ru

Keywords: network simulator, data transmission network, one-time encryption keys, routing, forced routing, private network.

! An algorithm for establishing a connection in the transport part of a special-purpose zone data network simulator has been developed, which allows simulating the operation of a united network over a single connection (switched virtual channel, SVC) in several private networks. The algorithm includes a centralized forced routing procedure. A method of determining one-time encryption keys for protecting forced routing generation messages and establishing an SVC is proposed. When performing these functions, the keys must be one-time for each established SVC in each private network in each section of the data transmission network between two adjacent devices. The use of the proposed method is shown for a large number of SVCs installed in several private networks on a simulator of one zone network, as well as on a simulator of the hierarchical structure of a national network with several zone networks.

THE PROBLEM OF ENSURING THE FUNCTIONAL STABILITY OF CRITICAL OBJECTS SYSTEMS

O.A. Ostroumov, S.M. Budyonny's Military Academy of Communications, doctoral student, Ph.D.; oleg-26stav@mail.ru

Keywords: critical information infrastructure, critical objects, communication system, control system, functions and tasks of the communication system, functional stability.

! It is shown that to ensure the goal of creating control systems and communication systems, it is necessary to fulfill certain requirements and target settings that are set at the design stage. To ensure the fulfillment of the goals of the systems in the process of their functioning, functions supported by time, material, and human resources are implemented. On the basis of the analysis method, the problem of maintaining the functional stability of the communication system is considered, the influence on it of disturbances in the functioning of critically important objects under the influence of various destabilizing factors and control actions is noted.

FORMATION OF TELECOMMUNICATION DIRECTIONS WITH HIGH STRUCTURAL AND FLOW STABILITY

S.A. Jasinskii, Branch of FSUE ZNIIS – LOZNIIS, scientific consultant, associate professor, Dr.Sci. (Tech.); yasinsky777@mail.ru

A.N. Zyuzin, S.M. Budyonny's Military Academy of Communications, teacher, Ph.D.; alexz01@bk.ru

Keywords: telecommunication direction, information flow, high structural and flow stability.

! The article substantiates the approach to modeling the distribution of information flows for telecommunications directions of a telecommunications network of high structural and flow stability based on the quasi-uniform distribution of Shannon's loads and the method of distribution of information flows based on the golden proportions and the Fibonacci sequence.

INFLUENCE OF NONLINEARITY OF TRANSMISSION PATHS ON OFDM SIGNALS CHARACTERISTICS

M.L. Maslakov, JSC Russian Institute for Power Radioengineering, leading research fellow, Ph.D.; maslakovml@gmail.com

E.P. Saulenko, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, student; evgeniisaulenko@gmail.com

Keywords: nonlinearity, OFDM signals, phase shift-keying, peak-to-average power ratio, signal-to-noise ratio.

! The paper considers the characteristics of OFDM signals transmitting through amplifying paths with nonlinear distortions. The expressions for combination components of the two-tone test signal are given. The influence of nonlinearity on the power characteristics of OFDM signals is investigated. The results of modeling the characteristics of OFDM signals transmitted over nonlinear systems described by the model of the third and fifth orders are shown.

THE ALGORITHM OF INITIAL SYNCHRONIZATION IN HYBRID SPREAD SPECTRUM SYSTEMS

B.V. Sultanov, Penza State University, professor, Dr.Sci. (Tech.); bovl.2012@yandex.ru

V.V. Doroshkevich, Penza State University, senior lecturer; dor.w.w@yandex.ru

Keywords: combination, hybrid, direct spectrum expansion, frequency hopping, initial acquisition.

! An algorithm for implementing initial synchronization (search) in spread spectrum communication systems based on the use of a combination of pseudorandom adjustment of the operating frequency, specified by a linear pseudorandom sequence, and direct spectrum expansion is considered. It is shown that the establishment of double initial synchronization is possible on the basis of a fast recurrent search algorithm with practically no increase in its complexity. The proposed solution is tested on a simulation model, the obtained quantitative data confirm its effectiveness.

THE USE OF TIME DELAYS IN THE PRIMARY SOUND SIGNALS PROCESSING

S.L. Mishenkov, Moscow Technical University of Communication and Informatics, department of television and broadcasting, professor, Dr.Sci. (Tech.); rn3aa@yandex.ru

E.S. Epifanova, FSUE TTC Ostankino, engineer, undergraduate; epifelen@gmail.com

Keywords: sound channels of broadcasting and amplification, deep localization.

! It has been shown that the use of modern multi-microphone technologies of primary sound signals processing leads to the destruction of the "deep" localization of the sound picture in sound broadcasting channels and during sound amplification. Digital signal processing methods allow you to supplement the sound consoles with programs of controlled time delay signals from microphones and groups of microphones, as well as in the reverberation channel. The values of time delays of signals from sources in real performance are analyzed and similar delay values are selected, which provide a deep perception of the sound picture and smoothness of their adjustments. The introduction of special indicators of the 2D/3D location of sound sources perceived by the listener is recommended.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИО ИМЕНИ М.И. КРИВОШЕЕВА»

ТРУДЫ НИИР

«Труды НИИР» – один из авторитетных сборников научных статей в отрасли связи.

Первый номер вышел в свет в год основания НИИ Радио — в 1949 г.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий с 2010 г.



105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, д.16
тел.: +7(495) 647-17-31 | myroval@niir.ru | www.niir.ru

