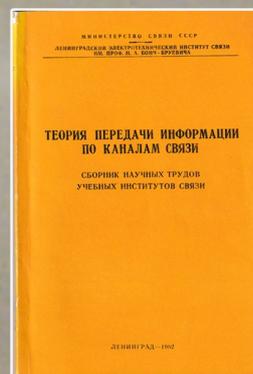




Том 6. № 4
2020

ISSN: 1813-324X

ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ



ЮБИЛЕЙНЫЙ ВЫПУСК

60 ЛЕТ ЖУРНАЛУ



Vol. 6. Iss. 4
2020

PROCEEDINGS
OF TELECOMMUNICATION UNIVERSITIES

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

ТРУДЫ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Том 6. № 4

Proceedings of Telecommunication Universities

Vol. 6. Iss. 4

Санкт-Петербург

2020

Описание журнала

Научный журнал. Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (распоряжение Минобрнауки РФ № 21-р от 12.02.2019), по специальностям:

- 05.11.07. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 05.11.18. Приборы и методы преобразования изображений и звука
- 05.12.04. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 05.12.07. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 05.12.14. Радиолокация и радионавигация
- 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации
- 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Выпускается с 1960 года. Выходит 4 раза в год (ежеквартально). Издается на русском и английском языках.

Редакционный совет

- | | |
|--|---|
| Дукельский К.В.
<i>Главный редактор</i> | к.т.н., доцент, АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Буйневич М.В.
<i>Зам. Главного редактора</i> | д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Розанов Н.Н. | д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Кучерявый Е. | PhD, Технологический университет Тампере, г. Тампере, Финляндия |
| Гошек И. | PhD, Технологический университет Брно, г. Брно, Чешская республика |
| Тиамийу О.А. | PhD, Университет Илорина, г. Илорин, Нигерия |
| Козин И.Д. | д.ф.-м.н., проф., Алматинский университет энергетики и связи, г. Алма-Аты, Казахстан |
| Самуйлов К.Е. | д.т.н., проф., Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия |
| Степанов С.Н. | д.т.н., проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Россия |
| Росляков А.В. | д.т.н., проф., Поволжский государственный университет связи и информатики (ПГУТИ), г. Самара, Россия |
| Кучерявый А.Е. | д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Канаев А.К. | д.т.н., проф., Петербургский университет путей сообщения имени Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Новиков С.Н. | д.т.н., проф., Сибирский государственный университет связи и информатики (СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия |
| Дворников С.В. | д.т.н., проф., Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (ВАС), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Коржик В.И. | д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Ковалгин Ю.А. | д.т.н., проф., Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия |
| Владыко А.Г. | к.т.н., Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия |

Регистрационная информация

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: ПИ № 77-77501 от 17.01.2020 г. (пред. рег. № 77-17986 от 07.04.2004 г.)

Подписной индекс по каталогу «Издания органов НТИ» Агентства «Роспечать»: 59983

Размещение в РИНЦ (elibrary.ru) по договору: № 59-02/2013R от 20.02.2013

Контактная информация

- | | | | |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Учредитель и издатель: | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) | Адрес редакции и издателя: | 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2 |
| | | Тел.: | +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970 |
| | | E-mail: | tuzs@spbgut.ru |
| | | Web: | http://tuzs.sut.ru |
| | | BK: | http://vk.com/spbtuzs |

Description

Scientific journal. The journal is included in the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of science and for the degree of doctor of science should be published (order of the Ministry of Education and Science of Russia No 21-r of 12 February 2019) in the field of:

- 05.11.07. Optical and optoelectronic devices and complexes
- 05.11.18. Devices and methods of transformation of images and sound
- 05.12.04. Radio engineering, including television systems and devices
- 05.12.07. Antennas, microwave devices and its technologies
- 05.12.13. Systems, networks and devices of telecommunications
- 05.12.14. Radiolocation and radio navigation
- 05.13.01. System analysis, management and information processing
- 05.13.18. Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programs
- 05.13.19. Methods and systems of information security, cybersecurity

Since 1960. Published 4 times per year. Published in Russian and English.

Editorial Board

K.V. Dukel'skii <i>Editor-in-chief</i>	PhD, associate prof., executive Director of Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI), Saint-Petersburg, Russia
M.V. Buinevich <i>Deputy editor-in-chief</i>	DSc, prof. of the Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
N.N. Rozanov	DSc, prof., member-corr. RAS, Open Joint Stock Company «S.I. Vavilov State Optical Institute» (SOI), Saint-Petersburg, Russia
Y. Koucheryav	PhD, Tampere University of Technology, Tampere, Finland
I. Hošek	PhD, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic
O.A. Tiamiyu	PhD, University of Ilorin, Ilorin, Nigeria
I.D. Kozin	DSc, prof., Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan
K.E. Samuilov	DSc, prof., Peoples' Friendship University (RUDN), Moscow, Russia
S.N. Stepanov	DSc, prof., Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia
A.V. Roslyakov	DSc, prof., Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara, Russia
A.E. Koucheryav	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
A.K. Kanaev	DSc, prof., Emperor Alexander I-st Petersburg State Transport University (PSTU), Saint-Petersburg, Russia
S.N. Novikov	DSc, prof., Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia
S.V. Dvornikov	DSc, prof., Military Academy of Telecommunications named after Marshal Union S.M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia
V.I. Korzhik	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
Yu.A. Kovalgin	DSc, prof., The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia
A.G. Vladyko	PhD, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

Registration Information

Registered by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media on 17/01/2020: PI No. 77-77501 (prev. reg. on 04/07/2004: No. 77-17986)

Subscription index for «NTI Editions» Agency «Rospechat» catalog: 59983

Accommodation in RINC (elibrary.ru) by agreement: № 59-02/2013R on 20.02.2013

Contact Information

Publisher: Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education «The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications» (SPbSUT)

Post address: 193232, Saint-Petersburg, Prospekt Bolshevikov, 22/1
Phone: +7 (812) 326-31-63, local 2022, +79643759970
E-mail: tuzs@spbgut.ru
Web: <http://tuzs.sut.ru>



Дорогие друзья!

Сердечно поздравляю коллектив журнала «Труды учебных заведений связи» с 60-летием выхода первого номера! Учрежденный приказом Министра связи СССР в 1959 году, сборник с самого начала стал аккумулятором лучших научных работ и исследований не только Ленинградского электротехнического института связи, но и всей отрасли связи.

Несмотря на солидный возраст, издание по своей сути и подаче материалов является молодым и нацелено на серьезную перспективу развития. Научные публикации в сборнике отмечены новизной, перспективностью и практической значимостью предлагаемых тем. За прошедшие шесть десятилетий журнал под эгидой Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича стал авторитетнейшим периодическим изданием, одним из самых профессиональных в своей области. Пройдя непростой путь, журнал продолжает жить и следовать своему

главному принципу: работать для тех, кто сделал ставку на формирование в России современной цифровой экономики!

От лица Федерального агентства связи хотел бы пожелать журналу издательского долголетия, а авторскому коллективу – новых творческих успехов.

Руководитель Федерального агентства связи
13.10.2020

О.Г. Духовицкий



Уважаемые коллеги!

Журнал СПбГУТ «Труды учебных заведений связи» отмечает свое 60-летие. Начиная с 1960 года, журнал, называвшийся тогда «Труды учебных институтов связи», публикует результаты оригинальных научных исследований в области телевидения и радиовещания, сетей связи и систем коммутации, систем связи с подвижными объектами, аудиовизуальной техники, почтовой связи, информатизации социально-экономических и технологических процессов.

Значение этого издания для отрасли связи и телекоммуникаций, для системы высшего профессионального образования трудно переоценить. Журнал позволяет обобщать накопленный опыт, делиться мнениями об актуальных проблемах и находить верный подход к их решению. Редакционная политика журнала направлена на освещение

современных тенденций развития отрасли – здесь публикуются и популяризируются важнейшие научные исследования, создающие задел для развития цифровой экономики Российской Федерации.

Редакция издания постоянно ищет новые формы работы с авторами, с научно-исследовательскими институтами и организациями, ежегодно расширяя их географию и стремясь создать с ними эффективную связь.

В феврале 2019 года распоряжением Минобрнауки России подтвержден статус журнала как издания ВАК, и коллектив ТУЗС в настоящее время самым активным образом приводит сборник к стандартам, необходимым для вхождения в международную наукометрическую базу данных SCOPUS. Сегодня можно с уверенностью сказать, что журнал «Труды учебных заведений связи» обрел второе дыхание, и впереди его ждет долгая и успешная научная жизнь.

Примите искренние поздравления с юбилеем и пожелания успехов в достижении намеченных целей, дальнейшего развития и процветания!

Ректор СПбГУТ,
доктор технических наук, профессор
04.12.2020

С.В. Бачевский



Уважаемые коллеги!

Журналу «Труды учебных заведений связи» – 60 лет! Поздравляя с юбилеем журнал и его читателей, хотел бы отметить, что все эти годы журнал находился и находится на передовых научных позициях. Несмотря на сложные времена в своей истории, когда журнал был вынужден даже прекратить выпуски, возродившись пять лет тому назад, он снова – в ряду уважаемых и признанных журналов.

Журнал входит в перечень изданий, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией для опубликования статей, содержащих результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Естественно, это привлекает внимание как уже известных ученых, так и аспирантов.

Но привлекает не только формальная сторона вопроса. Тематика, а именно: новые и новейшие направления исследований – это самое важное в журнале, что и дает ему возможность находиться в поле зрения специалистов в области сетей и систем связи.

Желаю журналу новых интересных идей, уважения читателей и процветания!

Главный редактор журнала «Электросвязь»,
доктор технических наук, профессор
17.11.2020

В.В. Бутенко

Уважаемая редакция!

Поздравляю замечательный коллектив журнала «Труды учебных заведений связи» с 60-летним юбилеем!

За многие десятилетия, с момента первого выхода издания в свет, журнал прошел все стадии научного становления, претерпел целый ряд метаморфоз, но не растерял самого главного – своих авторов, своих читателей... и свой «бончёвский» дух. Благодаря слаженному и сплоченному, коллективу журнал сегодня занимает достойное место в ряду российских периодических научных изданий отрасли связи.

Журнал «Труды учебных заведений связи» играет большую роль в создании единого информационного пространства для специалистов, связанных с изучением, преподаванием и распространением новейших достижений в сфере телекоммуникаций, продвижении передовых научно-методических технологий и их всесторонней апробации. На страницах журнала обсуждаются актуальные проблемы, передовой опыт, определяющий направление и развитие научных исследований в области связи. Высокое качество публикаций обеспечивается профессионализмом и искренней заинтересованностью в своем деле редакции журнала, а также творческой активностью и безусловным талантом авторов.

Уверен, что к моим добрым словам в адрес коллектива журнала с удовольствием присоединятся и другие авторы. Среди них – известные сегодня профессора и доктора наук, которые начали печататься еще в далеких теперь 60-х, 80-х и 2000-х годах, и сотрудничающие с изданием и поныне, а также молодые исследователи, аспиранты, публикующие на страницах уважаемого журнала свои первые научные опусы.

От всей души желаю журналу «Труды учебных заведений связи» преумножения лучших традиций отечественной науки, новых свершений, а его замечательным сотрудникам – крепкого здоровья и творческого настроения!

Заместитель генерального директора
по научной работе и развитию
АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»,
доктор технических наук, доцент
26.11.2020

А.В. Бурдин

60 лет: шесть – ноль в пользу Науки

Уважаемые авторы и читатели! Сегодня в Ваших руках юбилейный номер научного журнала «Труды учебных заведений связи», путевкой в научную жизнь которого был Приказ Министра связи СССР от 25 мая 1959 г. № 327.

На Ленинградский электротехнический институт связи имени проф. М.А. Бонч-Бруевича было возложено издание единого сборника научных трудов институтов связи. Рукописи научных статей были сданы в набор 18 марта 1960 года, а 30 мая вышел в свет первый номер журнала. За эти годы было выпущено свыше 200 номеров благодаря усилиям руководства вуза, редакционных советов, авторов научных статей и ответственных редакторов¹.

Ответственным редактором первого выпуска журнала был назначен доцент Ф.В. Кушнир. Окончив ЛЭИС в 1941 году, Ф.В. Кушнир прошел Великую Отечественную войну, вернулся в вуз – успешно защитил кандидатскую диссертацию, затем стал доцентом кафедры теоретической радиотехники ЛЭИС, деканом заочного факультета, а позже – проректором по научной работе института; разработал основные технические решения системы и аппаратуры ЧМ-вещания в СССР, участвовал в разработке генеральной схемы радиодиффузии СССР (УКВ-вещания).

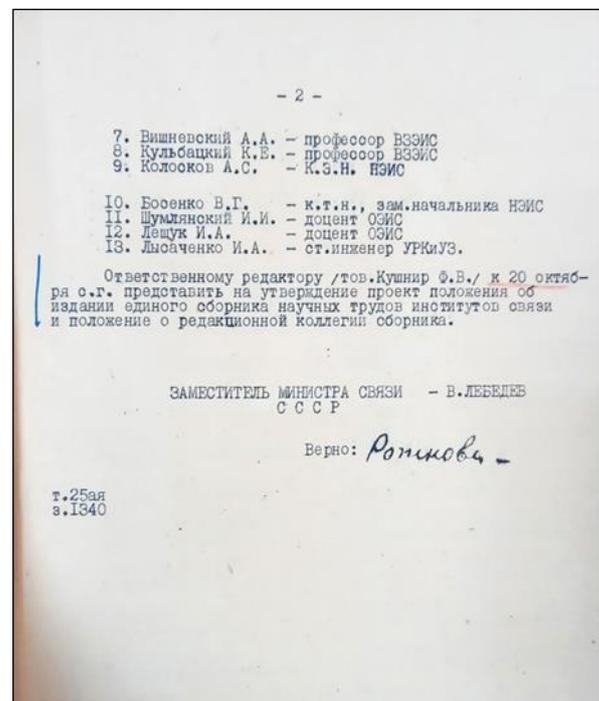
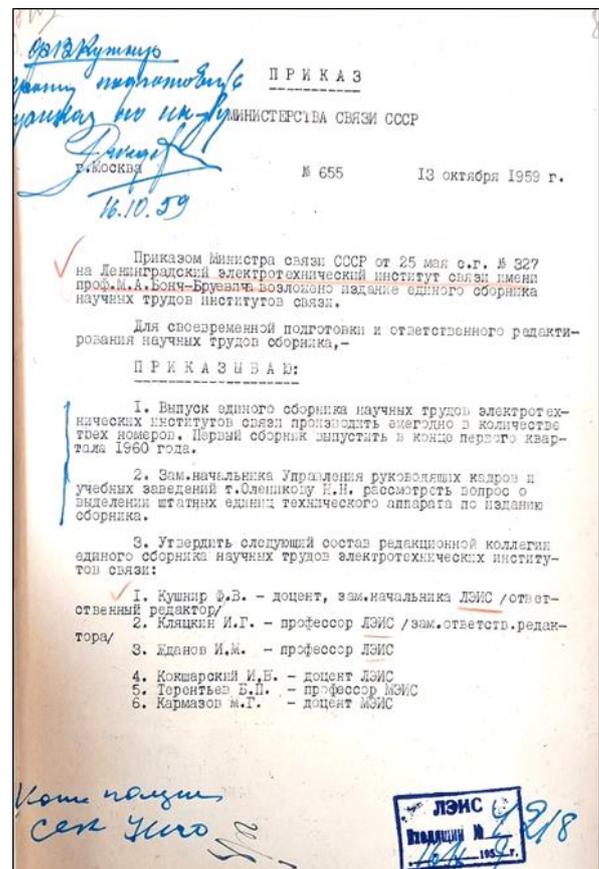
По содержанию научного журнала

Первая опубликованная статья сборника № 1 – «Метод оценки дисперсии случайного процесса на выходе линейного четырехполюсника» (Ю.Ф. Пелегов). Оформление статьи удовлетворяет даже современным требованиям к формулам, ссылкам на них, графикам, выводам...

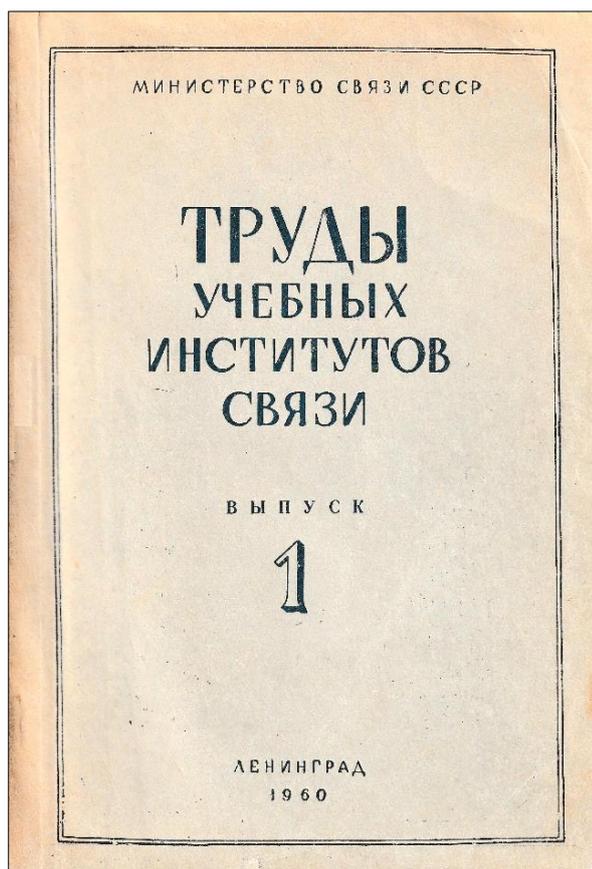
2-й номер сборника открывался статьей «В.И. Ленин – вдохновитель и организатор работы связи на новых социалистических началах» (Н.С. Кокшарский). По материалам сборника можно ощутить дух эпохи.

В выпуске № 3 коллектив авторов (С.С. Роговенко, Е.Р. Милютин и Р.А. Перцовский) представил методику снятия диаграмм направленности антенн с помощью вертолета, а И.М. Жданов предложил способ и оценил экономию при применении ВЧ-уплотнения на городских телефонных сетях.

В 4-м номере сборника автор В.И. Ефимкин подробно описал, какие бывают искажения цветовоспроизведения, возникающие из-за однополосной передачи сигнала совместимой системы цветного телевидения (1960-й год!).



¹ Благодаря архиву, бережно сохраненному Е.Ю. Пономаревой (Рекламно-издательский отдел СПбГУТ), можно узнать поименно редакторов, приложивших немало усилий для подготовки выпусков журнала в печать.



В выпуске № 7 из статьи А.А. Гольдина можно с интересом узнать, как проходит электронная коррекция неточности транспортирования в системах телекинопроекции и видеозаписи с непрерывным движением пленки.

В журнале № 8 был размещен материал П.В. Шамова о Международном телевизионном симпозиуме в мае 1961 года в Монтре (Швейцария). Швейцарские ученые высоко оценили работы ЛЭИС о совместимости систем цветного телевидения для стран Западной и Восточной Европы. Интересные факты по материалам симпозиума: в 1961 году 20 млн. граждан США получили официальное образование по телевидению. В этой же стране 117 колледжей и университетов вели занятия по телевидению с выдачей выпускных удостоверений. Для учебных целей было отведено 267 телевизионных каналов. П.В. Шамаков – это легенда не только ЛЭИС, но и всей отечественной науки. Если в США основателем телевидения считается В.К. Зворыкин, то у нас, без всякого сомнения – П.В. Шамаков. В 1933 году совместно с П.В. Тимофеевым он усовершенствовал изобретение В.К. Зворыкина и создал самую современную по тем временам передающую телевизионную трубку с переносом изображения – «супериконоскоп». В сентябре 1937 года в ЛЭИС была открыта кафедра телевидения, которую П.В. Шамаков возглавлял до 1982 года. В 1947 году он сформулировал идею о глобальном спутниковом телевидении. В конце 1950-х годов под его руко-

водством завершилась разработка опытного цветного телевизионного вещания. Уже тогда, по словам современников, П.В. Шамаков предвидел появление плоских телевизоров, которые «будут висеть на стенах, как картины». В 1966 году за большие заслуги в развитии отечественной техники телевидения П.В. Шамаков был удостоен звания «Герой социалистического труда».

«Современный» термин «инновации»

В 1962 году уже думали, как распознавать текст. В сборнике № 13 автор А.Д. Крисиллов описывает метод, который с помощью саморегулирования позволяет гибко подстраивать систему под текст, тем самым распознавать с высокой надежностью знаки (буквы и цифры).

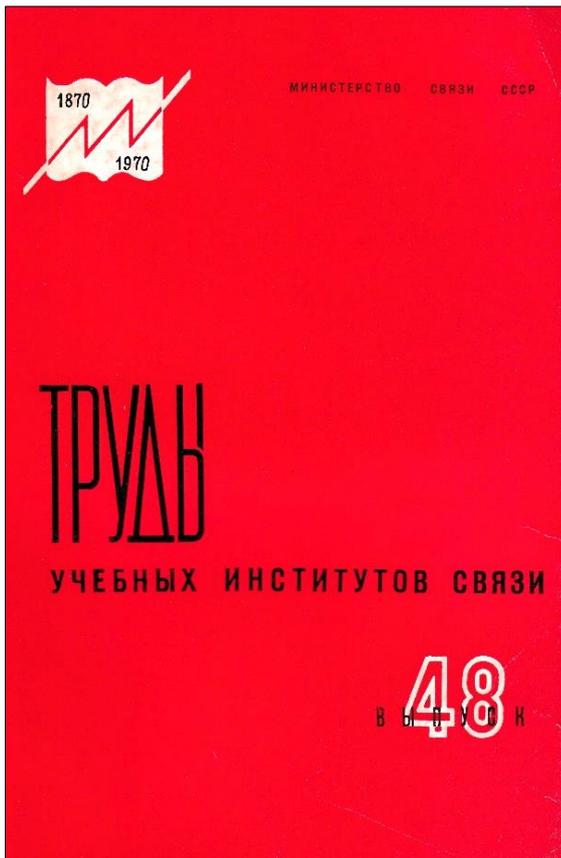
Год спустя, в сборнике № 19, автор Б.Ф. Митчелл предложил метод генерации случайных чисел на цифровых электронно-вычислительных машинах.

В сборнике № 29 увидела свет статья «Исследование запуска туннельных диодов линейно растущим сигналом», тогда еще молодого ученого Ю.Т. Бутыльского (ныне – профессора кафедры цифровой и вычислительной техники и информатики СПбГУТ).

В сборнике № 39 была опубликована статья П.В. Шамова, К.Х. Муравьева с коллективом соавторов «Цветное телевидение в космосе» и первая цветная фотография Земли, которая была сделана с советского спутника «Молния-1».

В выпуске № 42 была напечатана работа Р.И. Кубалова «Расчет характеристического сопротивления щелевой антенны с учетом толщины и размеров экрана...». И в этом же сборнике много-много лет спустя будут публиковаться статьи его дочери А.Р. Кубаловой – кандидата технических наук, доцента кафедры теории электрических цепей и связи СПбГУТ.

В 44-м выпуске журнала заслуживает внимания статья авторского коллектива А.А. Витта, Л.В. Гаврилова, В.В. Однолько, М.В. Рыжкова, В.А. Узилевского и А.Г. Эмдина. В тот период лаборатория издательства «Правда» и проблемная лаборатория ЛЭИС совместно провели серию опытных междугородных фототелеграфных передач цветных иллюстраций. Передача осуществлялась по междугородному каналу связи Москва – Минск в полосе частот 312–552 кГц. В результате фототелеграфной передачи цветоделенные фотоизображения получили высокое качество иллюстраций, и было доказано, что оттиски высокой печати и фотоотпечатки обладают лучшими параметрами, чем оттиски офсетной печати.



Уникальным оказался № 47 за 1969 год. В журнале опубликована статья «Сравнение пропускной способности многоканальных систем связи со структурным уплотнением при передаче двоичной информации сигналами с активной и пассивной паузами», авторами которой были В.И. Журавлев и А.М. Бонч-Бруевич (советский и российский физик, член-корреспондент АН СССР, крупный специалист в области квантовой электроники и физической оптики), старший сын М.А. Бонч-Бруевича. В этом же номере была напечатана работа О.С. Когновицкого, В.С. Кувшиновского и В.А. Марченко «Использование статистического критерия знаков для измерения преобладания телеграфных посылок». Сегодня О.С. Когновицкий – доктор технических наук, Почетный профессор СПбГУТ, профессор кафедры сетей связи и передачи данных; за выдающие заслуги перед Отечеством награжден Орденом Дружбы в день 90-летия СПбГУТ.

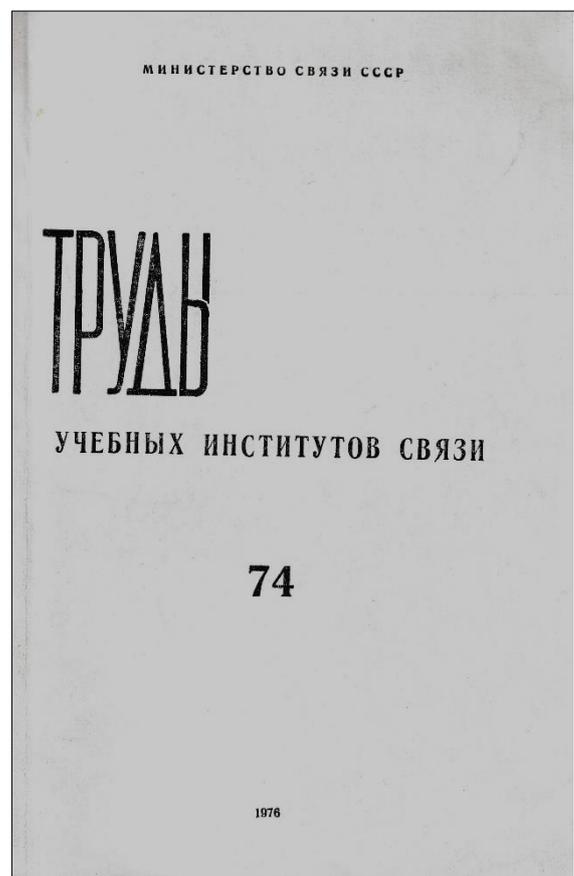
В том же номере была опубликована первая статья Ю.А. Ковалгина (ныне доктора технических наук, профессора кафедры радиосвязи и вещания, Почетного профессора СПбГУТ, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации) совместно с В.П. Шиффом «О слуховом восприятии реверберационного процесса при интенсивной стереофонии».

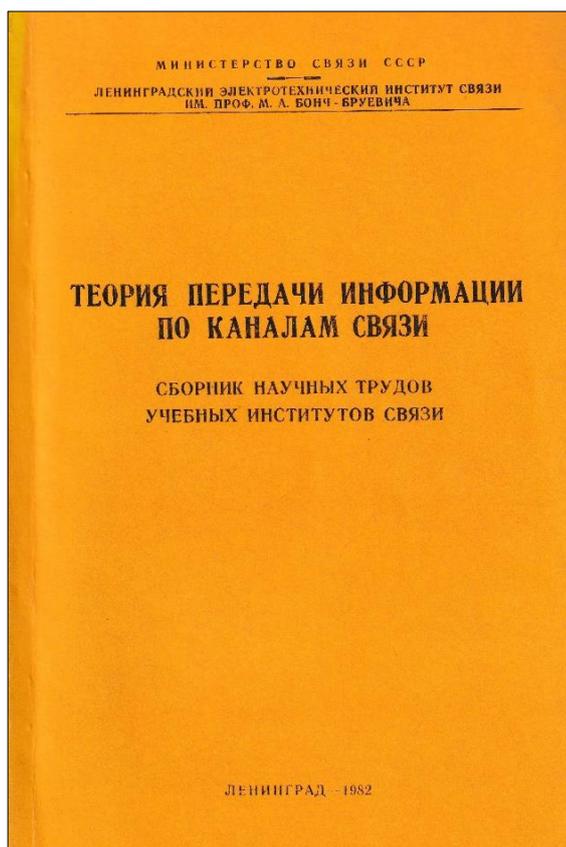
В 1971 году в 56-м выпуске журнала впервые была напечатана статья А.Е. Рьжкова (ныне – профессора кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ) «К вопросу о паразитной фазовой модуляции при усилении однополосного сигнала в ламповом СВЧ-усилителе мощности».

Ответственным редактором журнала в 1974 году был назначен доцент В.И. Пономарев. В том же году в выпуске № 66 вопросы цветного телевидения «О форме огибающей спектра полного телевизионного сигнала системы цветного телевидения СЕКАМ-111б» затронул А.А. Гоголь (в настоящее время доктор технических наук, заведующий кафедрой телевидения и метрологии; возглавлял наш вуз с 1999 по 2011 год) с соавторами Ю.В. Аксентовым и Г.М. Смирновым.

Антиплагиат

Сейчас, прежде чем принять поступившую рукопись в печать, материал проверяют с применением информационных технологий на наличие плагиата. А в 1970-х годах плагиат выявлялся, но менее оперативно, и только после выхода статьи в свет. Это наглядно показывает «Обращение редакции» в № 73 за 1976 год: «в Сборнике № 70 была опубликована статья асп. ЛЭИС Благовещенской Н.Ф. «Повышение эффективности КВ радиосвязи методом адаптивного выбора каналов». Как выяснилось, значительная часть этой статьи представляет перевод работы Мохон Л.А. «Методы повышения пропускной способности глобальной системы связи посредством адаптивного выбора каналов», опубликованной в журнале «Radio and Electronic Engr», v. 38, № 5, с. 305–311. Редакция приносит извинения читателям сборника за помещение неоригинальной статьи. На асп. Благовещенскую Н.Ф. наложено взыскание».





Устойчивость редакции

Ответственным редактором журнала с № 77 (1976 год) был профессор А.Н. Рохмистров.

В 83-м номере можно было ознакомиться с перестройкой в техническом смысле слова – «К вопросу о скорости перестройки колебательного контура». Автор рукописи – Л.Б. Бузюков, старейший научно-педагогический сотрудник нашего вуза, кандидат технических наук, профессор кафедры программной инженерии и вычислительной техники, до недавнего времени занимал должность заведующего кафедрой и декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем. Работы Л.Б. Бузюкова можно увидеть и в нынешних выпусках журнала «Труды учебных заведений связи».

В № 90 (1978 год) впервые была напечатана статья О.В. Воробьева (сегодня – заведующий кафедрой радиосвязи и вещания СПбГУТ) «Сравнение нормировок плотности тока, применяемых при исследовании ЭВП СВЧ».

Ответственным редактором журнала в выпуске № 101 (1981 год), а также №№ 106–130 был назначен В.Н. Гомзин (доктор технических наук, академик Международной академии информатизации, профессор ЛЭИС; руководил нашим вузом с 1983 по 1989 год, а с 1982 по 2010 год возглавлял кафедру РТС, ныне – кафедра радиосистем и обработки сигналов), а с № 102 по № 105 – профессор А.Н. Рохмистров.

В № 103 (1981 год) впервые опубликована статья В.А. Филина «К расчету частотных характеристик оптимальной корректирующей цепи усилителя класса Д». Доктор технических наук, профессор В.А. Филин в настоящее время возглавляет кафедру электроники и схемотехники СПбГУТ. Кафедра была создана в 2013 году объединением ранее существующих кафедры схемотехники электронных устройств и кафедры электронных и квантовых приборов. В конце 80-х годов В.А. Филин совместно со своим учителем, доктором технических наук, профессором А.Д. Артымом, разработал теорию и матричные методы анализа процессов в сложных электрических цепях. Реализация метода в современных компьютерных системах позволила существенно повысить точность и скорость расчета переходных процессов в радиотехнических устройствах. В.А. Филин со своими учениками уже почти 30 лет активно печатается на страницах нашего издания.

Труды учебных заведений связи

С 1982 по 1996 год включительно научное издание выходило под названием «Сборник научных трудов учебных институтов связи».

В № 117 (1984 год) в журнале в первый раз была размещена рукопись Г.В. Верховой «Определение коэффициентов весомости показателей качества систем электропитания на этапе структурной оптимизации». Сегодня Г.В. Верховая – доктор технических наук, заведующая кафедрой автоматизации предприятий связи СПбГУТ.

Ответственным редактором с № 131 (1986 год) научного журнала был М.А. Сиверс, доктор технических наук, ректор нашего вуза с 1989 по 1996 год, академик Международной академии связи, академик Международной академии наук высшей школы, академик Международной академии информатизации, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. В настоящее время – заведующий кафедрой радиопередающих устройств и средств подвижной связи СПбГУТ.

В № 145 (1989 год) была впервые опубликована рукопись Ю.Ф. Болтова «Фазовые сдвиги на неоднородностях отражательных структур в плоских акустических волноводах». Ушедший из жизни в этом году, кандидат технических наук Ю.Ф. Болтов работал профессором кафедры программной инженерии и вычислительной техники. Его последняя статья была опубликована в нашем журнале спустя почти 30 лет, в 2016 году (Т. 2, № 2).

Доктор технических наук, член экспертного совета ВАК, заведующий кафедрой линий связи и измерений в технике связи ПГУТИ профессор В.А. Бурдин наверняка помнит свою первую статью в № 148 (1990 год) – «Оценка грозовых перенапряжений в кабельной линии на произвольном расстоянии от места воздействия».

Там же была размещена статья «Метод выбора структуры системы централизованной технической эксплуатации оборудования сельской телефонной сети» А.В. Рослякова (в настоящее время – доктор технических наук, заведующий кафедрой сетей и систем связи ПГУТИ, член редакционного совета нашего журнала). В 1992 году редакционную коллегию журнала возглавил профессор С.Л. Галкин (доктор физико-математических наук; руководил нашим вузом с 1997 по 1998 год).

В № 158 (1993 год) увидела свет работа «Построение ϵ -оптимальных кодов для систем с ϵ обратной связью при интервальном критерии надежности». Автор рукописи – В.И. Коржик, ныне – доктор технических наук, Почетный профессор СПбГУТ, профессор кафедры защищенных систем связи СПбГУТ, член редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи».

В № 161 (1996 год) была размещена оригинальная рукопись под названием «Особенности определения вносимого затухания в коротких многомодовых волоконных световодах». Автор – С.Ф. Глаголев, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и линий связи СПбГУТ.

С 1998 года и по настоящее время журнал выходит с нынешним названием – «Труды учебных заведений связи». С этого же года ответственным редактором становится К.Д. Овчинников, доктор технических наук, заведующий кафедрой электронных и квантовых приборов, проректор по научной работе (с 1997 года).

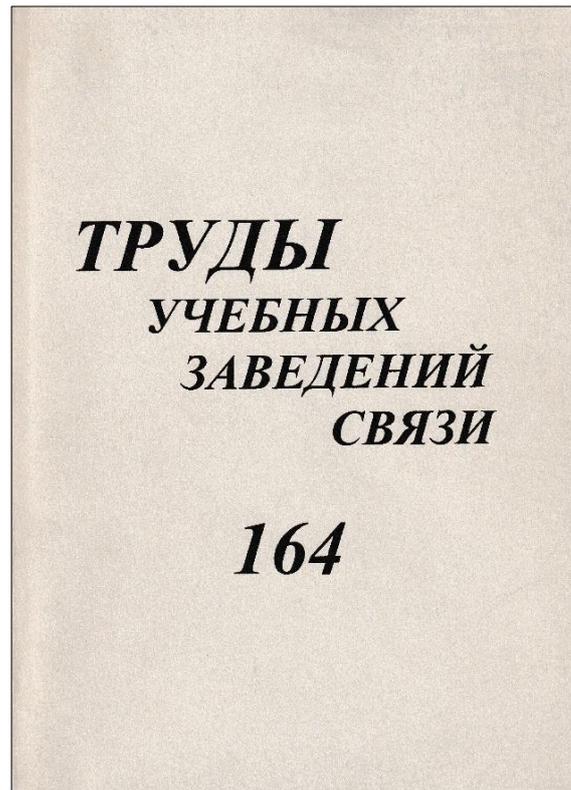
Бончу – 70!

166-й выпуск сборника «Труды учебных заведений связи» (2000 год) посвящен 70-летию СПбГУТ. Журнал выходит с цветной обложкой. Содержание формируется по тематическим разделам. Первый материал номера – «Современные проблемы монополизации отрасли телекоммуникаций», автор работы – Л.Д. Рейман, выпускник ЛЭИС (1979 год), министр связи и информатизации Российской Федерации (1999–2008 годы). В этом же номере опубликован труд В.Ф. Дмитрикова с соавторами В.В. Сергеевым и А.П. Симиной «Классические частотные LC-фильтры в качестве фильтрующих цепей источников электропитания». На практике часто встречаются с необходимостью пропускать в ограниченной области частот к приемнику токи (напряжения) одних частот и не пропускать или пропускать, но с большим затуханием токи (напряжения) других частот. Эта задача решается с помощью электрических частотных фильтров, в том числе LC-фильтров. В.Ф. Дмитриков сегодня известен не только как доктор технических наук; он же – Почетный профессор СПбГУТ, член-корреспондент Академии электротехнических наук Российской Федерации, член-корреспондент Международной Академии наук Высшей школы. Разработанные профессором В.Ф. Дмитриковым теория и принципы построения энергетически эффективных ключевых генераторов использованы в станциях катодной защиты трубопроводов и других металлических сооружений от электрохимической коррозии, в устройствах по размагничиванию магистральных газопроводов диаметром до 1420 мм, а также в новых системах электропитания с промежуточным звеном повышенной частоты для современных систем связи.

В 168-м номере (2002 год) впервые была напечатана работа «Определение характера повреждения или неоднородности по рефлектограмме кабельной цепи» М.С. Былиной (сегодня – кандидат технических наук, заведующая кафедрой фотоники и линий связи СПбГУТ) совместно с С.Ф. Глаголевым.

С 169-го выпуска (2003 год) содержание печатается в начале журнала. С 2005 года все научные публикации журнала «Труды учебных заведений связи» размещаются в Научной Электронной библиотеке (НЭБ) – E-library/РИНЦ. В 2004 году журнал был зарегистрирован в реестре СМИ под номером ПИ № 77-17986 от 07.04.2004 г. В следующем, 171-м выпуске у сборника появляются подписной индекс и Международный стандартный номер сериального издания (ISSN) – 1813-324X.

С 2007 года (с № 176) редакционную коллегию журнала возглавил доктор технических наук, член-корреспондент Международной академии информатизации, профессор А.А. Костин. Он окончил ЛЭИС в 1971 году,



получив квалификацию «Инженер электросвязи», и с этого времени вся его судьба так или иначе стала связана с альма-матер. В 1993 году он становится заместителем проректора по научной работе СПбГУТ. В 2001 году создал и возглавил Центр проблем управления телекоммуникационными сетями и услугами.

В 2008 году (выпуск **179**) впервые была опубликована работа «Класс «зеркальных» последовательностей Гоулда» Г.А. Фокина (ныне – кандидат технических наук, доцент кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ).

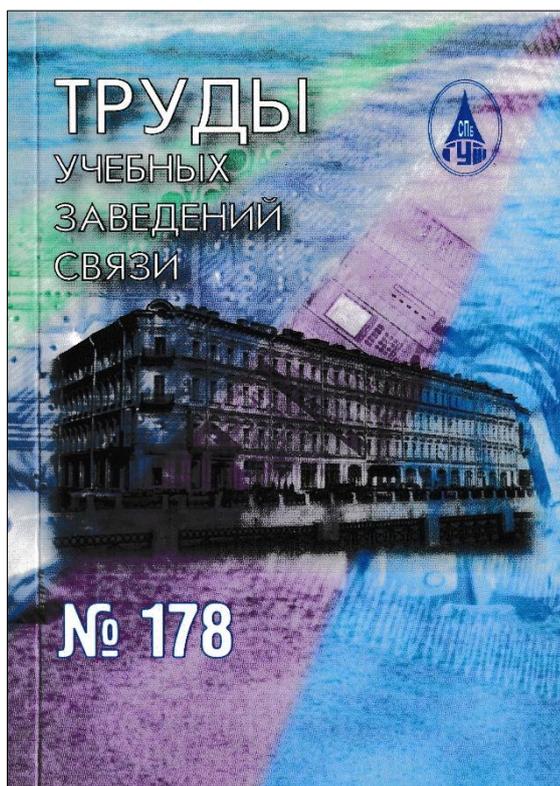
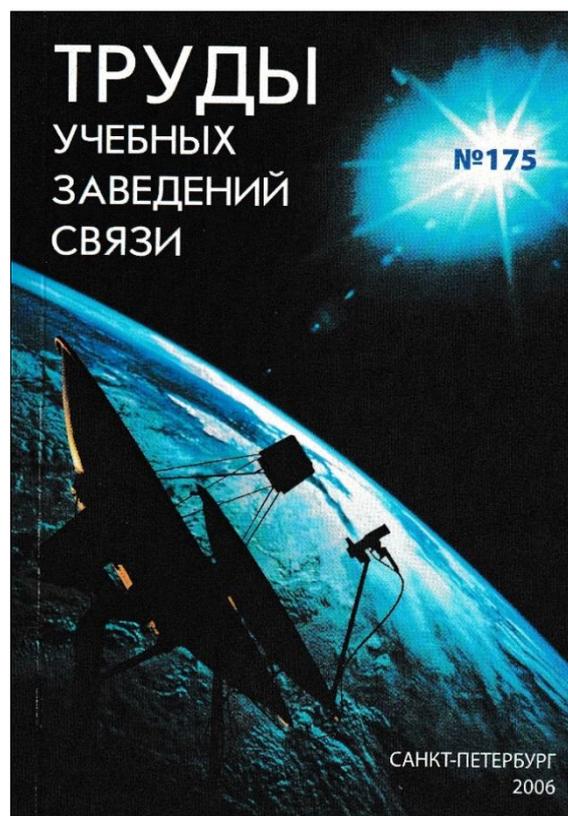
Новый формат

С 2016 года журнал возглавил доктор технических наук, ректор СПбГУТ С.В. Бачевский (в статусе главного редактора). Издание коренным образом меняет свой имидж. Полностью обновляется состав редакционного совета, в него вошли представители не только родственных вузов связи (Москва, Самара, Новосибирск), но и ученые из зарубежных стран (Казахстан, Нигерия, Финляндия, Чехия). Издание переходит на полноцветную печать, меняет формат – с А5 на А4. Изменена периодичность выхода (вместо двух раз в год – ежеквартально) и нумерация выпусков (том и номер). С середины 2017 года издание стало выходить в новом дизайне. Макетирование статей на две колонки позволило более эффективно использовать информационные площади, и вместе с тем журнал стал достаточно удобным для визуального восприятия читателями.

В 2016 году в сборнике (**Т. 2, № 1**) была опубликована работа А.Е. Кучерявого с соавторами Р.В. Киричком и А.А. Кулешовым «Метод обнаружения беспилотных летательных аппаратов на базе анализа трафика». Сегодня А.Е. Кучерявый – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных, член Ученого совета СПбГУТ, член оргкомитетов ряда международных конференций, участник различных форумов и семинаров во многих странах, Председатель Исследовательской Комиссии

11 МСЭ-Т. Еще несколько лет назад беспилотные летательные аппараты являлись чем-то из области фантастики или детских игрушек. Но время и технический прогресс быстро превращают фантастику в реальность, а стремительный рост выпусков БПЛА и возросшая популярность привела к тому, что участились аварии и столкновения с препятствиями подобных летательных аппаратов. В своей статье А.Е. Кучерявый и соавторы предложили метод, который с помощью перехвата и расшифровки трафика между БПЛА и пультом дистанционного управления позволяет зафиксировать факт запуска БПЛА, его координаты и координаты оператора, а также совершить посадку этого летательного аппарата, если запуск несанкционированный или представляет угрозу.

В том же номере опубликована статья Д.В. Сахарова совместно с Н.Л. Пиховкиным «Обеспечение безопасности распределенной информационно-вычислительной сети с учетом управления рисками», в которой подробно анализируется важность управления рисками в процессе обеспечения информационной безопасности, а также предлагается риск-ориентированная методика построения защищенной распределенной сети. В настоящее время кандидат технических наук, доцент кафедры защищенных систем связи нашего университета Д.В. Сахаров возглавляет Управление Роскомнадзора по Северо-Западному Федеральному округу.



Научная работа «Динамическая модель вектора состояний подвижных объектов при их позиционировании в сетях беспроводного доступа» была размещена в **номере 3** за 2017 год. Ее авторы – О.Г. Духовницкий, С.В. Дворников и И.В. Федоренко досконально описывают проблемы методов геолокации, базирующихся на обработке сетей широкополосного доступа, и пути их решения. Моделирование показало, что реализация одного из перспективных направлений позволит уменьшить ошибку измерения координат со 100 м до 5 м, что сопоставимо с точностью радионавигационной системы ГЛОНАСС.

Безграничность науки

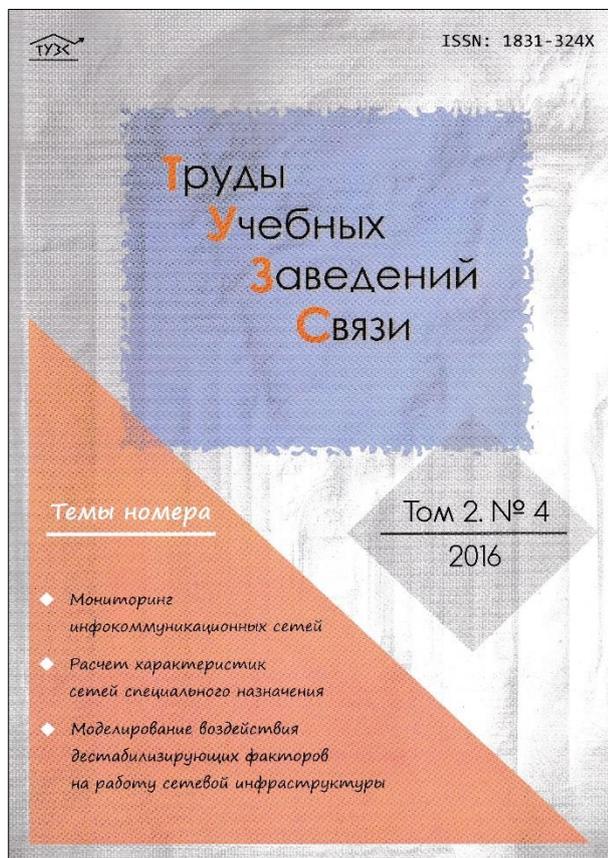
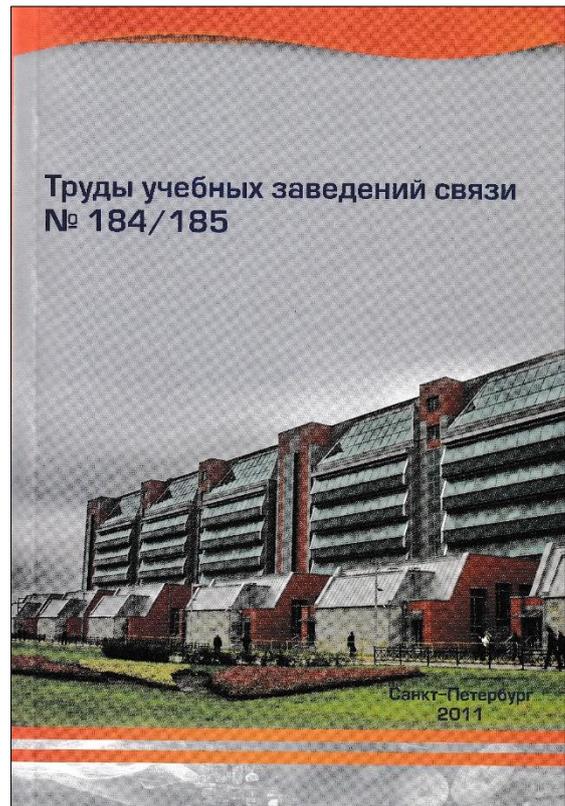
В 2018 году (Т. 4, № 3) в журнале впервые появляется статья зарубежных авторов на английском языке – «Comparative Analysis of Low Latency Anonymouse Communication System». Выпускник аспирантуры СПбГУТ, старший преподаватель кафедры телекоммуникационной науки Университета Иллорина (Нигерия) О.А. Тиамийу и сетевой инженер И. Муртала (Нигерия) в своем исследовании приводят сравнительный анализ анонимных коммуникационных систем с низкой латентностью, и их оценку по критериям производительности, надежности и удобства использования.

4-й номер за 2018 год в том числе содержит научные труды авторов из Азербайджана и Донецка. Выпускник ЛЭИС – Э.Б. Гезалов – кандидат технических наук, заведующий кафедрой сетей связи и системы коммутации Азербайджанского технического университета опубликовал статью «Модель неоднородной гибридной сети связи с протоколом комбинированного доступа с учетом показателей надежности и каналов связи». Из Донецкого национального технического университета на страницах журнала были размещены 2 публикации. В.Н. Лозинская, кандидат технических наук,

доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, и коллеги – кандидаты технических наук И.А. Молоковский и И.Н. Яремко – представили статью «Статистическая модель широкополосного канала беспроводной сети для условий различных сред промышленного предприятия». Вторая публикация – «Алгоритм оптимизации сети провайдера услуг IPTV с комбинацией режимов UNICAST и MULTICAST» (автор – кандидат технических наук, доцент той же кафедры В.В. Червинский).

В **1-м номере** за 2019 год вышла в свет очередная (шестая), подготовленная для нашего журнала статья кандидата технических наук, профессора кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств СПбГУТ Л.М. Макарова и кандидата технических наук, доцента той же кафедры С.В. Протасени. Тема – «Моделирование фрактального образа квантового генератора». Здесь авторы представляют методологическую основу процесса моделирования полупроводников, что позволяет в значительной степени снизить затраты на проведение научных и технологических исследований.

С 2018 года данные о публикациях журнала размещаются в международной системе библиографических ссылок CrossRef с присвоением цифрового идентификатора объектов (DOI). Распоряжением Минобрнауки России от 12 февраля 2019 года № 21-р журнал включен в Перечень ВАК.



В августе 2019 года приказом ректора СПбГУТ главным редактором журнала назначен кандидат технических наук К.В. Дукельский. В том же году в **номере 2** была размещена его статья «Модовая дискриминация в микроструктурированных световодах с тригональной симметрией оболочки», в которой доказывается, что подобные световоды могут позиционировать в качестве перспективных оптических элементов для создания мощных волоконных лазеров и усилителей с близкой к дифракционной расходимостью излучения. В настоящее время К.В. Дукельский является исполнительным директором АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова».

В **4-м номере** за 2019 год был опубликован материал аспиранта Х.М. Кходера – гражданина Сирийской Арабской Республики – и доктора технических наук, заведующей кафедрой автоматизации предприятий связи Г.В. Верховой «Морфологический метод комбинаторного синтеза магистрально-модульных систем на основе многоаспектных моделей». Авторская разработка может быть использована в автоматизированных системах комплексирования электронных средств и телекоммуникационных систем. Менее года спустя Х.М. Кходер успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В **первом номере** за 2020 год увидела свет еще одна статья на английском языке – «Optimal Energy Characteristics and Working Parameters of RF Switch Mode Power Amplifier Based on Controllable Current Fed Resonant Inverter», авторы: А.А. Ганбаев – преподаватель кафедры «Компьютерная инженерия и информационные технологии» Бакинского университета инженерии (Азербайджан), – и доктор технических наук, заведующий кафедрой электроники и схемотехники СПбГУТ В.А. Филин. Авторами предложен метод минимизации потерь мощности в транзисторах радиочастотного ключевого генератора на основе применения способа управления с перекрывающимися импульсами.

Эволюция приложений Интернета Вещей диктует новые, более жесткие требования к скорости передачи и обработки информации. Для снижения задержки большую популярность набирают периферийные вычисления мультисервисного доступа; такой подход позволяет обрабатывать данные пользователей ближе к их местоположению. Именно этому и посвящена статья «Использование многоуровневых вычислительных систем для обработки одноранговых пользовательских запросов в мобильных сетях» (**номер 2** за 2020 год). Авторы материала – кандидат технических наук, научный сотрудник факультета информационных технологий и коммуникаций университета Тампере (Финляндия), доцент кафедры сетей связи и передачи данных нашего университета Р.Я. Пирмагомедов и аспирант кафедры А.А. Ахмед.

В настоящее время редакционный совет журнала самым активнейшим образом приводит издание к стандартам, необходимым для вхождения в международную наукометрическую базу данных SCOPUS. Публикационная активность ТУЗС неуклонно растет, что наглядно демонстрирует статистика НЭБ: например, с 2016 года средний индекс Хирша авторов и журнала вырос, соответственно, в 3 и 4 раза; число просмотров статей возросло почти в 6 раз, а суммарное число цитирований журнала в РИНЦ – в 50 раз.



* * *

Выражаю сердечную благодарность сотрудникам нынешней редакции в лице заместителя главного редактора профессора М.В. Буйневича, ответственного редактора И.М. Татарниковой и выпускающего редактора Д.Н. Яшугина за усердный труд на благо нашего Университета, на благо российской науки.

Отдельное спасибо создателям самого первого номера сборника за все те усилия, которые они приложили, чтобы майский номер 1960 года увидел свет, а также редакторам и редакции журнала всех славных шести десятилетий.

С 60-летием, наш журнал!

*Проректор по научной работе СПбГУТ,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Александр Викторович Шестаков*

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

05.11.00		ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ	
	<i>Бурдин А.В., Пашин С.С.</i> Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов	16	<i>Bourdine A., Pashin S.</i> Method for estimation of reflection on fiber optic connection based on analysis of images of end surfaces of ferrule connectors
	<i>Диязитдинов Р.Р., Васин Н.Н.</i> Итерационный алгоритм оценки смещения и угла поворота при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи для пространственно-временного совмещения телевизионных сигналов	28	<i>Diyazitdinov R., Vasin N.</i> Iterative algorithm offset and angle rotation estimation with additive and multiplicative noise for space-time superposition of television signals
05.12.00		РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ	
	<i>Флакман А.Г., Сорокин И.С., Кокарев А.О.</i> Минимизация вероятности ошибки на бит в многоэтапной релейной ММО-системе	36	<i>Flaksman A., Sorokin I., Kokarev A.</i> Minimizing the Probability of Bit Error in a Multi-Stage MIMO Relay System
	<i>Фокин Г.А., Владыко А.Г.</i> Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана	45	<i>Fokin G., Vladyko A.</i> The vehicles positioning in ultra-dense 5G/V2X radio access networks using the extended Kalman filter
	<i>Якушенко С.А., Дворников С.В.</i> Интеграция топологий сети мобильной связи и навигации в интересах управления подвижными объектами	60	<i>Yakushenko S., Dvornikov S.</i> Integration of mobile network and navigation topologies for mobile object management
05.13.00		ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ	
	<i>Власенко А.В., Евсюков М.В., Путято М.М., Макарян А.С.</i> Система поддержки принятия решений для выбора оптимального постквантового механизма инкапсуляции ключей. Часть 1. Алгоритм принятия решений	70	<i>Vlasenko A., Evsyukov M., Putyato M., Makaryan A.</i> Decision support system for finding an optimal postquantum key encapsulation mechanism. Part 1. Decision making algorithm
	<i>Корелов С.В., Петров А.М., Ротков Л.Ю., Горбунов А.А.</i> Предобработка текстов электронных писем в задаче обнаружения спама	80	<i>Korelov S., Petrov A., Rotkov L., Gorbunov A.</i> Preprocessing of the Emails in the Spam Detection Task
	<i>Максимова Е.А.</i> Когнитивное моделирование деструктивных злоумышленных воздействий на объектах критической информационной инфраструктуры	91	<i>Maksinova E.</i> Cognitive modeling of destructive malicious impacts on critical information infrastructure objects
	<i>Шестаков А.В., Билятдинов К.З.</i> Создание и использование информационных резервов при сопровождении больших технических систем	104	<i>Shestakov A., Biliatdinov K.</i> Creation and implementation of information reserves in big technical systems maintenance
ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ			
	<i>Макаренков В.В.</i> Модель функционирования двухдиапазонного радиолокационного комплекса, осуществляющего классификацию целей в условиях воздействия помех и шумов	112	<i>Makarenkov V.</i> A functioning model of a dual-band radar system that classifies targets under the influence of interference and noise
	<i>Маликов А.В.</i> Адаптация структуры диагностической искусственной нейронной сети при появлении новых обучающих примеров	120	<i>Malikov A.</i> Adaptation of the diagnostic artificial neural network structure when new training examples appear

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

**05.11.07 – Оптические
и оптико-электронные приборы
и комплексы**

**05.11.18 – Приборы и методы
преобразования
изображений и звука**

Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов

А.В. Бурдин^{1, 2*}, С.С. Пашин²

¹АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация

*Адрес для переписки: bourdine@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.09.2020

Принята к публикации 02.11.2020

Ссылка для цитирования: Бурдин А.В., Пашин С.С. Оценка коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений торцевых поверхностей феррул коннекторов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 16–27. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

Аннотация: В работе представлена альтернативная методика оценивания коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых оптических волокон по результатам анализа изображений загрязненной торцевой поверхности феррул пары коннекторов исследуемого стыка, полученных штатным полевым комплектом видеодиагностики состояния волоконно-оптических коннекторов. Приведены результаты экспериментальной верификации предложенной методики, которые продемонстрировали потенциальные возможности ее использования в практических приложениях «бесконтактного» определения коэффициента отражения на волоконно-оптическом разъемном соединении.

Ключевые слова: феррул, волоконно-оптический коннектор, коэффициент отражения, загрязнение феррула, торец феррула, волоконно-оптическое разъемное соединение, коэффициент связи мод, структурированные кабельные системы.

Введение

На сегодняшний день ключевым инструментом построения и развития информационного общества РФ, согласно положениям Указа Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 г.», Программе «Цифровая экономика РФ», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р и Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017–2030 гг., утвержденной Указом Президента РФ от 09.05.2017 № 203, являются современные инфокоммуникационные технологии, развитие которых не представляется возможным без обеспечения соответствующей инфо- и телекоммуникационной инфраструктуры, особое место в которой занимают волоконно-оптические подсистемы структурированных кабельных систем (СКС) центров обработки данных, сетей хранения данных, вычислительных центров,

внутрикорпоративных сетей передачи данных различного назначения и др. приложений.

В отличие от «традиционных» сетей широкополосного доступа, соединительные волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) подсистем СКС характеризуются малой протяженностью (буквально десятки–сотни метров). Поэтому весь комплекс приемо-сдаточных измерений, проводимый с помощью оптических рефлектометров обратного рассеяния во временной области – OTDR (аббр. от англ. Optical Time Domain Reflectometer), обязательный, в соответствии с РД 45.156-2000 [1], для ВОЛП сетей связи общего пользования, при этом является опциональным для ВОЛП СКС, согласно ГОСТ Р 53245-2008 [2]. По этой причине подавляющее большинство бригад предприятий, деятельность которых ориентирована в основном на установку подсистем СКС, не укомплектованы OTDR, которые, в общем случае, являются достаточно доро-

гостоящими средствами измерения. При этом контроль качества монтажа оконечных устройств коммутации волоконно-оптических подсистем СКС, как минимум, осуществляется с помощью оптических тестеров для проведения обязательного комплекса измерений вносимых потерь на кабельном участке, выполняемых по окончании всех работ по инсталляции линии. Это, в целом, частично снимает вопрос по выявлению соединений, неудовлетворяющих нормам [2–4] на допустимое значение указанного параметра, в то время как проблема оценивания коэффициента отражения, пороговая величина которого также нормируется не только для ВОЛП сетей связи общего пользования [5, 6], но и для подсистем СКС [2–4], остается открытой.

В свою очередь, для оперативного контроля качества разъемных соединений в патч-панелях и телекоммуникационных розетках непосредственно в процессе монтажа достаточно широко используются полевые комплекты видеодиагностики, например, [7], которые включают в себя видеосуп, реализующий возможность получения изображения торцевой поверхности феррул коннектора, и соответствующее программное обеспечение для анализа этого изображения на предмет проведения теста чистоты феррул на уровне «Pass/Fail» в соответствии с ратифицированным стандартом IEC 61300-3-35 [8], предполагающим зонирование центра феррул коннектора на 3 области: «А» – сердцевина / граница сердцевины-оболочки / прилегающая область оболочки оптических волокон (ОВ); «В» – оболочка ОВ до границы оболочка-феррул; «С» – контактная зона феррула.

Можно предположить, что соответствующий анализ состояния торцевых поверхностей феррул коннекторов с использованием данных, полученных в ходе проведенной обработки их изображений, позволит реализовать оценку параметров передачи тестируемого волоконно-оптического разъемного соединения. Данная работа непосредственно посвящена решению задачи разработки альтернативной методики оценивания коэффициента отражения на разъемном соединении одномодовых – SM (аббр. от англ. Single Mode) – ОВ на основе описанного подхода и ее экспериментальной верификации.

Разработка методики оценивания коэффициента отражения на стыке одномодовых ОВ на основе анализа перекрытия радиального распределения полей в дискретном представлении

В настоящее время оценка коэффициентов связи мод на анализируемом соединении пары волоконных световодов является одним из наиболее широко используемых методов исследования процессов взаимодействия и передачи мощности от

модовых компонентов оптического излучения, поступающего из «возбуждающего» или «передающего» (далее – Tx) ОВ, возбуждаемым модовым составляющим оптического сигнала в «принимающем» (далее – Rx) ОВ. Этот подход активно используется для оценивания базовых параметров волоконно-оптического соединения – в первую очередь, вносимых потерь – на стыках однотипных ОВ с некоторым отличием по геометрическим характеристикам – например, радиуса пятна моды – MFR (аббр. от англ. Mode Field Radius), диаметра сердцевины, отклонения профиля показателя преломления [9–13], а также моделировании и исследовании влияния условий подключения источника оптического излучения на процессы возбуждения волоконных световодов [10, 14–17].

В общем случае коэффициент связи моды m , возбуждающей моду с индексом n , определяется через интеграл перекрытия полей взаимодействующих мод m и n , который в скалярной постановке задачи для цилиндрической системы координат имеет следующий вид [9–17]:

$$\eta_{pq} = \frac{\left| \int_0^\infty \int_0^{2\pi} F_m^{(l_p)} F_m^{(l_q)} r dr d\varphi \right|^2}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left| F_m^{(l_p)} \right|^2 r dr d\varphi \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left| F_m^{(l_q)} \right|^2 r dr d\varphi}, \quad (1)$$

где $F_m^{(l_p)}$ и $F_m^{(l_q)}$ – радиальные распределения полей взаимодействующих мод – поступающей с выхода «возбуждающего» ОВ «возбуждающей» моды $LP_{lm(p)}$ и «возбуждаемой» в «возбуждаемом» ОВ моды $LP_{lm(q)}$; l и m – азимутальный и радиальный порядки моды LP_{lm} , соответственно; r – радиальная координата; φ – полярный угол в полярной системе координат.

В данной работе для решения задачи анализа прохождения оптического излучения через соединение пары ОВ с загрязненной торцевой поверхностью предлагается осуществить представление интеграла перекрытия полей мод в виде конечных вложенных сумм по компонентам радиального распределения полей этих мод:

$$\eta_{mn} = \frac{\left[\sum_p \sum_q F_m^{(l_m)}(x_p, y_q) F_n^{(l_n)}(x_p, y_q) \right]^2}{\left\{ \sum_p \sum_q \left[F_m^{(l_m)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\} \left\{ \sum_p \sum_q \left[F_n^{(l_n)}(x_p, y_q) \right]^2 \right\}}, \quad (2)$$

где $F_m^{(l_m)}$ и $F_n^{(l_n)}$ – радиальные распределения полей взаимодействующих мод – поступающей с выхода Tx ОВ Tx-моды LP_{lm} и в Rx ОВ Rx-моды LP_{ln} ; l , m и n – азимутальный и радиальные порядки мод LP_{lm} и LP_{ln} , соответственно; x и y – координаты Декартовой системы координат.

Здесь радиальные распределения полей взаимодействующих мод могут быть непосредственно корректно рассчитаны через представление, например, в базисе функций Лагерра – Гаусса [10] либо с помощью строгих численных методов, где в

качестве исходных данных могут использоваться протоколы измерений профиля показателя преломления промышленных образцов ОВ, выполненных с помощью штатных лабораторных комплектов анализаторов волоконных световодов. Подобное «сеточное» представление соединения ОВ позволяет вводить нулевые компоненты радиального распределения поля вводимой и/или возбуждаемой моды в загрязненных локациях сердцевин стыкуемых ОВ и, как результат, учитывать данный фактор в итоговом значении коэффициента связи.

Для оценки потенциальных возможностей применения данного подхода анализа стыка ОВ, в основе которого лежит дискретное представление полей взаимодействующих мод, предлагается рассмотреть процесс прохождения основной (фундаментальной) моды LP_{01} , характеризующейся наиболее простым распределением поля, через соединение пары SM волоконных световодов, выполненного с некоторым радиальным рассогласованием при разбросе значений MFR взаимодействующих мод. Рассматривается соединение двух SM ОВ с максимальным разбросом значений MFR: MFR вводимой моды составляет $\rho_{Tx} = 4,2500$ мкм, MFR возбуждаемой моды $\rho_{Rx} = 4,8500$ мкм (рабочая длина волны $\lambda = 1310$ нм). Предполагается, что исследуемое соединение выполнено строго центрировано и с некоторым заданным радиальным рассогласованием. Исследуется диапазон вносимого смещения между осями срачиваемых ОВ $d = 0...10$ мкм с шагом 0,5 мкм. Действительное значение коэффициента связи вычислялось по известной аналитической формуле для стыка пары ОВ, выполненного с осевым смещением, полученной в рамках приближения Гаусса [9–17]:

$${}_0\eta_{11}(d) = \frac{4\rho_{Tx}^2\rho_{Rx}^2}{(\rho_{Tx}^2 + \rho_{Rx}^2)^2} \exp\left[-\frac{d^2}{\rho_{Tx}^2}\left(1 - \frac{\rho_{Tx}^2}{\rho_{Tx}^2 + \rho_{Rx}^2}\right)\right], \quad (3)$$

где ρ_{Tx} и ρ_{Rx} – MFR основных мод LP_{01} Rx и Tx ОВ, соответственно.

Результаты сопоставления погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды LP_{01} , выполненные на оптической несущей $\lambda = 1310$ нм, для описанного выше соединения двух SM ОВ в указанном диапазоне значений осевого смещения d для разного шага дискретизации представления поля моды $\Delta x = 0,5; 0,25; 0,125$ и $0,1$ мкм приведены на рисунке 1. Анализ полученных данных показывает, что уже при выборе $\Delta x = 0,500$ мкм погрешность соответствует экстремально низким – менее 10^{-10} % – значениям.

Как известно, коэффициент отражения на стыке ОВ оценивается как логарифм отношения мощности оптического сигнала, отраженной от анализируемого соединения P_{REFL} , к мощности оптического сигнала, поступившей на вход этого соединения P_{IN} [18–20]:

$$R = 10\log\left(\frac{P_{REFL}}{P_{IN}}\right). \quad (4)$$

Известные формулы по оценке данного параметра [10, 21] в основном учитывают такие факторы, как разброс значений показателя преломления соединяемых ОВ (в том числе, и наличие воздушного зазора), числовых апертур, а также наличие угловых/радиальных рассогласований.

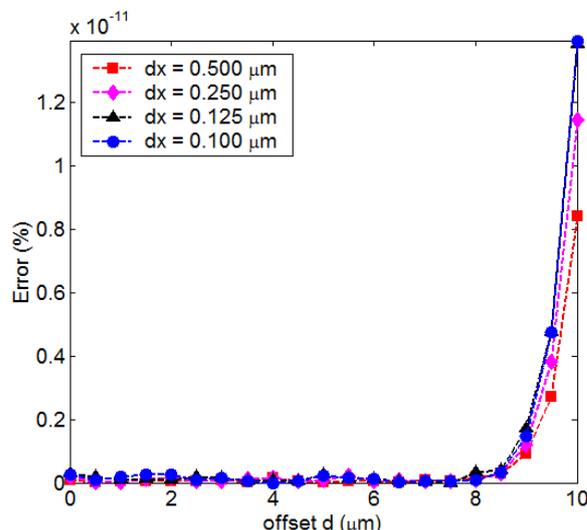


Рис.1. Сравнительная оценка погрешности вычисления коэффициента передачи основной моды LP_{01} для соединения двух SM ОВ с максимальным разбросом MFR в диапазоне значений осевого смещения $d = 0...10$ мкм для заданного шага дискретизации Δx

Fig. 1. Comparative Evaluation of the Fundamental Mode LP_{01} Transition Factor Error, Performed for Two SMFs Connection with Maximal Deviation Between MFRs Over Offset Range $d = 0...10$ μm under Particular Discretization Step Δx

Однако они не учитывают степень и характер загрязнения феррул разъемного соединения ОВ. Поэтому с точки зрения учета влияния фактического состояния торцевой поверхности феррул волоконно-оптических коннекторов, как фактора искажения поля моды в дискретном представлении, для этой цели также предлагается использовать результаты оценки коэффициентов связи мод.

Тогда для стыка SM ОВ в первом приближении формула для оценивания коэффициента отражения через коэффициент связи основной моды LP_{01} может быть записана в следующем виде:

$$R = 10\log(1 - {}_0\eta_{11}). \quad (5)$$

Для проведения предварительной апробации изложенного подхода оценивания коэффициента отражения разъемного соединения ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов предлагается рассмотреть следующее соединение пары SM ОВ: рабочая длина волны $\lambda = 1310$ нм; MFR обоих соединяемых ОВ выбирается а) одинаковым и равным номинальному – 4,6 мкм и б) с максимальным разбросом значений MFR; внесенное радиальное рассогласование варьируется в диапазоне $d = 0...10$ мкм.

Исходные изображения торцов коннекторов после проведения процедур центрирования и масштабирования относительно центров сердцевин соединяемых Tx и Rx ОВ представлены на рисунке 2. Так, феррул Tx-коннектора тщательным образом очищен и прошел тест по всем трем зонам *ABC*, в то время как торец феррула Rx-коннектора, напротив, сильно загрязнен и «провалил» тесты по всем трем зонам *ABC*.

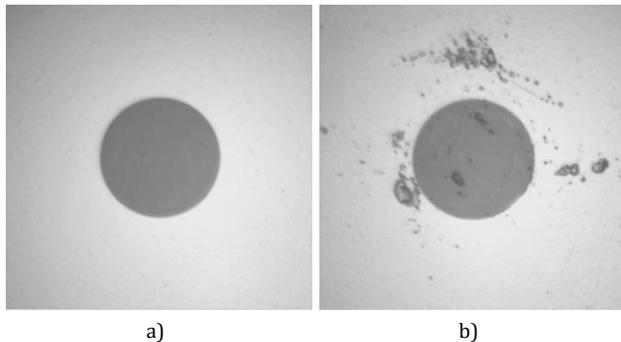


Рис. 2. Исходное центрированное и масштабированное относительно центра симметрии сердцевины ОВ изображение фрагмента торца феррула коннектора: а) Tx ОВ; б) Rx ОВ

Fig. 2. Initial Centered and Scaled Part of Ferrule End Image, Referred to Optical Fiber Core Symmetry Center: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber

Результирующие бинарные изображения торцов феррул коннекторов Tx и Rx после удаления ореолов границ сердцевин и оболочки и последующей локализации артефактов приведены на рисунке 3. Согласно данным измерений, проведенных методом обратного рассеяния во временной области на рабочей длине волны $\lambda = 1310$ нм, коэффициент отражения на данном разъёмном соединении достигает значения $R = -36,861$ дБ. Несмотря на достаточно сильное загрязнение торца Rx-коннектора, это значение формально удовлетворяет нормам по данному параметру для разъёмных соединений подсистем СКС (-35 дБ для SM ОВ [2–4]) и является неприемлемо высоким для сетей связи общего пользования: -45 дБ [5, 6].

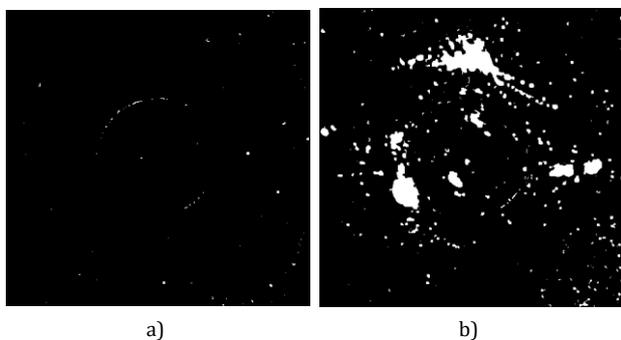


Рис. 3. Результирующее бинарное изображение после удаления ореолов границ сердцевин и оболочки и локализации артефактов: а) Tx ОВ; б) Rx ОВ

Fig. 3. Resulting Binary Image After Removal of core/Cladding Boundaries and Localization of Dust Artefacts: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber

На рисунке 4 представлены результаты реконструкции 3D-поверхности эквивалентного радиального распределения поля основной моды LP_{01} волокон Tx и Rx в центральной зоне сердцевин 60×60 мкм с учетом наведенных за счет загрязнения торцевой поверхности феррула искажений. Результаты расчета коэффициента отражения на стыке SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ, проведенные для пары SM ОВ как с максимальным разбросом паспортных значений MFR, так и идентичными номинальными MFR обоих ОВ на длине волны $\lambda = 1310$ нм, представлены в виде кривых зависимости указанного параметра стыка от величины смещения центральных осей сердцевин соединяемых ОВ (см. рисунок 5а).

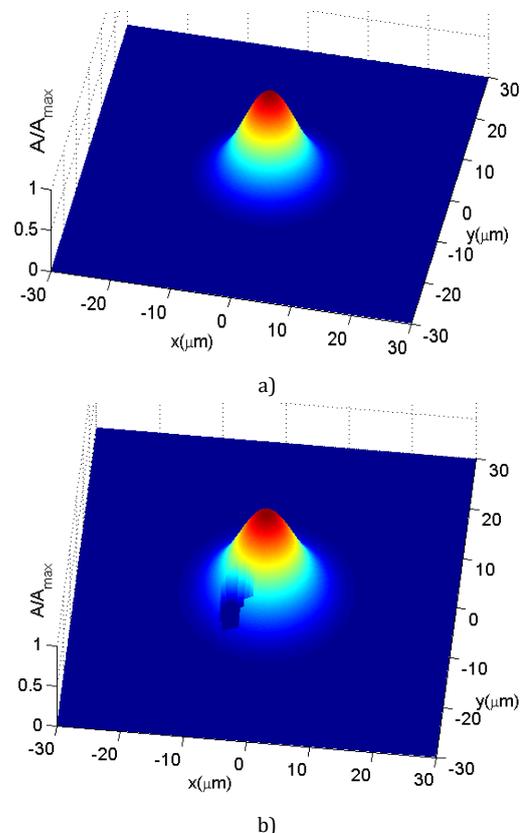


Рис. 4. Реконструкция 3D-поверхности эквивалентного радиального распределения поля основной моды LP_{01} : а) Tx ОВ; б) Rx ОВ

Fig. 4. Reconstruction of 3D-Surface of the Fundamental Mode LP_{01} Field Radial Distribution: a) Tx Optical Fiber; b) Rx Optical Fiber

Хорошо видно, что разброс MFR оказывает некоторое влияние на итоговое значение коэффициента отражения для централизованного стыка и при сравнительно малых радиальных рассогласованиях – фактически до $d = 2 \dots 3$ мкм. При этом сопоставление с действительным (измеренным) значением $R = -36,861$ дБ показывает, что теоретический расчет демонстрирует завышенные (ухудшенные) значения. Причем с увеличением введенного радиального рассогласования это отличие только увеличивается.

Анализ построенной кривой относительной погрешности – отклонения расчетного коэффициента отражения от действительного значения (см. рисунок 5а) для случая идентичных номинальных MFR обоих ОВ, показавшего наиболее близкие к измеренным данным результаты расчета, демонстрирует, что минимальное расхождение достигает 10,71 %.

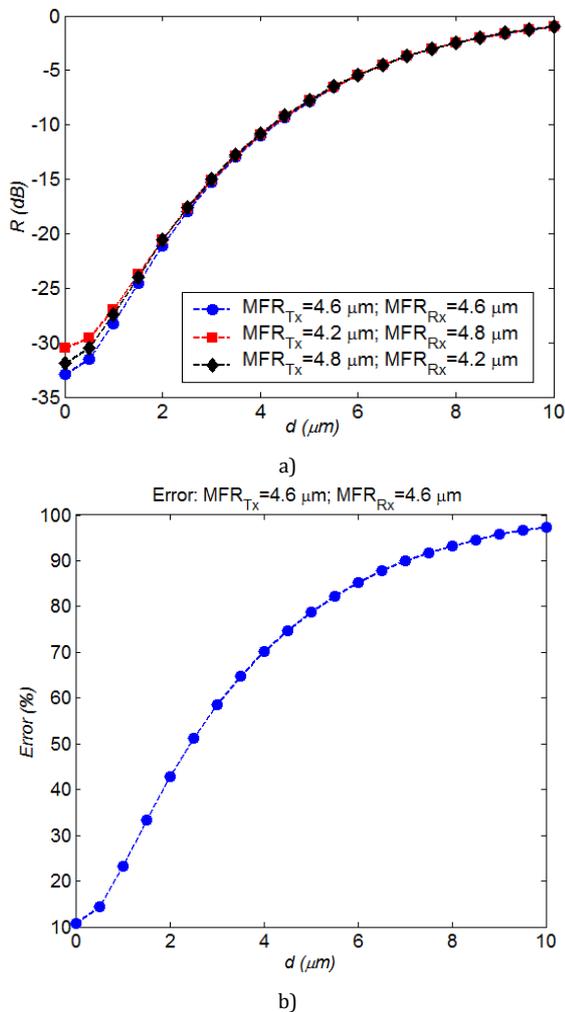


Рис. 5. Результаты расчета коэффициента отражения на стыке SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ с максимальным разбросом значений MFR и номинальным значением MFR обоих ОВ (оптическая несущая $\lambda = 1310$ нм): а) кривые зависимости коэффициента отражения от величины смещения центральных осей сердцевин, соединяемых ОВ; б) погрешность относительно действительного (измеренного) значения

Fig. 5. Results of Computation of Reflection Coefficient at the Connection of Two SMFs under Taking into Account Inserted Offset and Strong Tx Connector Ferrule End Contamination with the Maximal Deviation of MFRs and Nominal Value of MFR for both Optical Fibers: a) Curves of Reflection Dependence on Offset Between Connected Fiber Cores; b) Error Between Computed and Measured Values

Это позволяет сделать предположение о завышенном расчетном значении отраженной от стыка мощности оптического излучения и необходимости учета дополнительных факторов передачи/

расхода мощности основной моды LP_{01} , поступающей из Tx ОВ, компонентам возбуждаемого в Rx ОВ оптического излучения.

Для этой цели был проведен расчет параметров передачи модового состава стандартного SM ОВ (рек. ITU-T G.652). При этом в качестве исходных данных были использованы результаты измерений профиля показателя преломления промышленного образца SM ОВ, которые были проведены в рамках инициативных исследований с помощью анализатора волоконных световодов [5] (рисунок 6).

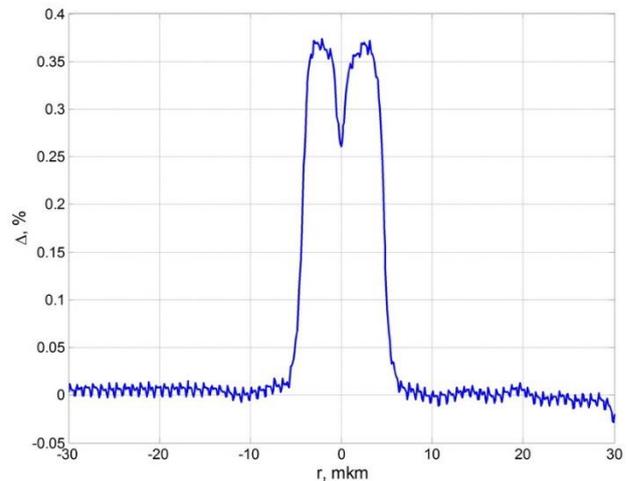


Рис. 6. «Ступенчатый» профиль показателя преломления промышленного образца стандартного одномодового ОВ SSF: протокол измерения

Fig. 6. "Step-Index" Refractive Index Profile of Sample of Commercially Available Standard SMF: Measurement Report

Реальный профиль достаточно сильно отличается от идеализированного ступенчатого (см. рисунок 6). Здесь присутствуют не только локальные флуктуации показателя преломления, но и дефект в центре сердцевин в виде провала. При этом сама форма профиля носит, в целом, сглаженный характер. Следует отметить, что радиальная координата половины высоты профиля $n_{max}/2$ равна 4,08 мкм, что, в целом, не противоречит спецификациям SM ОВ ведущих производителей [20] и, в общем случае, позиционируется в паспортных данных, как радиус сердцевин. Однако значение радиальной координаты непосредственно границы раздела сердцевин/оболочка (с учетом сглаженного характера формы профиля показателя преломления) достигает уже 6,65 мкм, что непосредственно может рассматриваться как фактический радиус сердцевин рассматриваемого SM ОВ.

Результаты расчета, выполненные с помощью ранее разработанного [22] обобщения модификации приближения Гаусса (ОМПГ) на длине волны $\lambda = 1310$ нм, позволили выявить, что характеристическое уравнение помимо решения для основной моды LP_{01} – эквивалентного нормированного MFR $R_0 = 0,487$, также имеет корень и еще для одной высшей моды – LP_{02} – $R_0 = 1,374$. При этом если для ос-

новой моды оптический фактор ограничения достигает $P_{\text{core}} = 0,985$, то для указанной высшей моды LP_{02} условие отсечки формально выполняется, но значение этого параметра составляет всего $P_{\text{core}} = 0,246$, что свидетельствует о ее принадлежности к группе вытекающих мод. Таким образом, для анализируемого промышленного образца SM OB, с учетом поправок Петерманна в ближнем поле, которые для указанных мод LP_{01} и LP_{02} составляют 1,414 и 2,450, и фактического радиуса сердцевин значения MFR составляют $MFR_{LP_{01}} = 4,579$ мкм и $MFR_{LP_{02}} = 22,370$ мкм. Сопоставляя с номинальным значением MFR основной моды ($MFR_{LP_{01}} = 4,600$ мкм), можно предположить, что и номинальный MFR моды LP_{02} будет условно отличаться от расчетного на аналогичный коэффициент и, как результат, будет составлять $MFR_{LP_{02}} = 22,473$ мкм.

Таким образом, коэффициент отражения R на разъёмном соединении пары SM OB с учетом передачи части мощности вводимой основной модой LP_{01} OB Tx вытекающей модой LP_{02} OB Rx с использованием результатов расчета коэффициентов связи указанных мод η_{11} (между основными («фундаментальными») модами Tx- LP_{01} и Rx- LP_{01}) и η_{12} (между основной модой Tx- LP_{01} и вытекающей модой Rx- LP_{02}) предлагается оценивать по следующей формуле:

$$R = 10\log(1 - (\eta_{11} + (1 - \eta_{11}) \cdot \eta_{12})) = 10\log(1 - \eta_{11} - \eta_{12} + \eta_{11} \cdot \eta_{12}). \quad (6)$$

Здесь для устранения неопределенности, связанной с комплексной природой вытекающих мод, полагается, что основная часть вводимой мощности оптического сигнала, фактически сосредоточенной в основной моде LP_{01} , с выхода SM OB Tx передается непосредственно основной моде LP_{01} SM OB Rx, и только оставшаяся часть перераспределяется между вытекающей модой Rx- LP_{02} и отраженным от стыковой неоднородности потоком оптического излучения. По этой причине в формуле (6) перед коэффициентом связи η_{12} вводится множитель $(1 - \eta_{11})$.

Фактически подлогарифменное выражение формулы (6) определяет нормированную мощность оптического сигнала, непосредственно отраженного от торца SM OB Rx и поступившего на вход SM OB Tx. Этот отраженный поток оптического излучения содержит основную моду LP_{01} , которая, возвращаясь на торец SM OB Tx, возбуждает в данном световоде также основную моду LP_{01} , формирующую оптический сигнал, распространяющийся в обратном направлении на передающую сторону линии. Очевидно, что и в этом случае целесообразно учесть наличие загрязнения торца феррула коннектора, а также введенное эквивалентное рассогласование (либо его отсутствие). Иными словами, можно предположить, что в сердцевине SM OB Tx отраженный поток будет возбуждать основную

моду LP_{01} , мощность которой также будет пропорциональна уже рассчитанному коэффициенту связи η_{11} . Таким образом, выражение (6) представляется целесообразным переписать в виде:

$$R = 10\log[(1 - \eta_{11} - \eta_{12} + \eta_{11} \cdot \eta_{12}) \cdot \eta_{11}]. \quad (7)$$

Для проверки и апробации сделанных предположений был проведен повторный расчет коэффициента отражения на стыке пары SM OB с учетом загрязнения торцов феррул коннектора, изображения которых и результаты их обработки приведены на рисунках 2 и 3, соответственно. На рисунке 7а представлены результаты расчета кривых зависимости значений коэффициента отражения на рассматриваемом разъёмном соединении пары SM OB от введенного эквивалентного радиального рассогласования. Здесь проводится сопоставление расчетов, реализованных по каждой из трех представленных выше методик в соответствии с формулами (5–7): возбуждение только моды Rx- LP_{01} ; мод Rx- LP_{01} и Rx- LP_{02} ; прямым потоком – мод Rx- LP_{01} и Rx- LP_{02} , отраженным потоком – моды Tx- LP_{01} . На рисунке 7б – отклонение расчетного R относительно действительного (измеренного) значения.

Анализ полученных результатов вновь показывает, что минимальное отклонение расчетного значения коэффициента отражения от действительного соответствует центрированному эквивалентному стыку SM OB, который используется для представления тестируемого волоконно-оптического соединения. В то время как увеличение радиального рассогласования до 0,5 мкм уже приводит к повышению относительной погрешности на 2,5...5 %. Кроме того, здесь также хорошо видно, что оценка искомого параметра с помощью выражения (5), учитывающего весь «остаток» от мощности вводимой основной моды LP_{01} , непосредственно связанного с ее коэффициентов передачи, сопровождается неприемлемо высокой погрешностью – значение достигает 12,5 % относительно измеренного коэффициента отражения. В свою очередь, сопоставление полученных расчетных данных показывает, что наиболее корректным, с точки зрения минимальной (менее 0,5 %) погрешности, является подход, учитывающий возбуждение прямым потоком оптического излучения, поступающим из Tx в Rx OB, мод LP_{01} и LP_{02} Rx и отраженным потоком моды LP_{01} в Tx OB – т. е. формула (7). Таким образом, подтверждена потенциальная возможность проведения оценки коэффициента отражения с помощью предложенного подхода, базирующегося на дискретном представлении полей взаимодействующих мод с применением формулы (7): полученные результаты для условий сильного загрязнения торцевой поверхности феррула одного из коннекторов демонстрируют погрешность менее 0,5 % относительно действительного, экспериментально измеренного сертифицированным оборудованием значения коэффициента отражения.

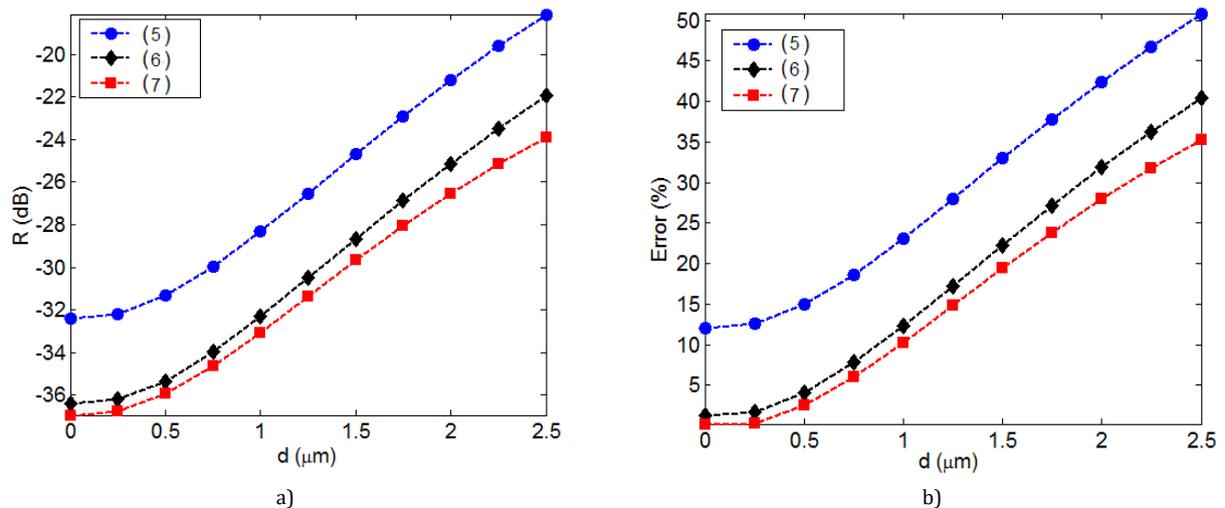


Рис. 7. Сравнительный анализ результатов расчета коэффициента отражения на стыке пары SM ОВ с учетом введенного радиального рассогласования при сильном загрязнении торцевой поверхности Rx ОВ и чистой поверхности Tx ОВ с номинальным значением MFR обоих ОВ (оптическая несущая $\lambda = 1310$ нм) по формулам (3–1): а) кривые зависимости коэффициента отражения от величины смещения центральных осей сердцевин, соединяемых ОВ; б) погрешность относительно действительного (измеренного) значения

Fig. 7. Comparative Analysis of Computation Results, Performed for Connection of Two SMFs under Taking into Account Inserted Offset and Strong Contamination of Rx Optical Fiber Ferrule End with Clear Tx Optical Fiber Ferrule End, Nominal MFR Value for Both Optical Fibers (Wavelength $\lambda = 1310$ Nm), Produced by Formulas (3–5): a) Curves of Reflection Dependence on Offset Between Fiber Core Center Axis; b) Computation Error Referred to Measured Value

Методика оценивания коэффициента отражения разъемного соединения оптических волокон на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов

Расчет коэффициента отражения на волоконно-оптическом разъемном соединении по результатам анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов включает в себя выполнение следующих операций.

1) Осуществляется загрузка предварительно сделанных с помощью штатного комплекта видеодиагностики изображений торцевых поверхностей феррул волоконно-оптических коннекторов, оконцовывающих Tx и Rx ОВ линии. Проводится центрирование (позиционирование по центру сердцевин ОВ) и соответствующее масштабирование, осуществляется удаление ореолов границ сердцевина / оболочка и оболочка / феррул, а также локализация артефактов, включая процедуры уточнения контуров, заполнения «внутренних полостей» и сглаживания изображения с помощью морфологической операции эрозии.

2) Выполняется преобразование результирующего бинарного изображения загрязненного торца коннектора в бинарную матрицу, где «0» соответствует загрязненному («искаженному») фрагменту изображения торца феррула / ОВ, а «1» – соответственно, «неискаженному».

3) Формируются поля мод: основной LP_{01} ОВ Tx, основной LP_{01} и вытекающей LP_{02} ОВ Rx. В общем случае для этой цели можно использовать результаты расчета фактического распределения поля моды, выполненные с помощью строгого сеточного

метода, в том числе, например, реализованного в коммерческом программном обеспечении, также с применением протокольных данных соответствующих измерений (например, профиля показателя преломления) этих образцов ОВ, проведенных штатным сертифицированным лабораторным оборудованием (т. н. анализаторов ОВ [5]). Вместе с тем, выше было показано, что приемлемая погрешность достигается и при использовании номинальных паспортных значений MFR: в данном случае, для длины волны $\lambda = 1310$ нм рекомендуемое значение MFR и Tx, и Rx основной моды LP_{01} составляет 4,600 мкм. В свою очередь, на основании проведенных выше расчетов, с учетом введенных соответствующих поправок (Петерманна и корректирующего коэффициента отклонения от паспортного номинального значения MFR) для вытекающей моды LP_{02} ОВ Rx указанный параметр выбирается равным $MFR = 22,473$ мкм. Таким образом, далее поля перечисленных мод формируются в базе функций Лагерра – Гаусса в области, ограниченной рекомендуемой верхней границей дискретного представления, соответствующей $x_{\max} = \pm 30$ мкм с шагом дискретизации $\Delta x = 0,25$ мкм.

4) Проводится выравнивание масштабов дискретного представления поля моды и загрязненной поверхности торца феррула коннектора и далее осуществляется выравнивание количества элементов бинарной матрицы представления изображения загрязненной поверхности торца феррула до числа элементов матрицы дискретного представления поля моды.

5) Проводится наложение «загрязненных» участков торца сердцевин ОВ на распределение поля

моды. Данная операция реализуется путем умножения матрицы дискретного представления поля моды на бинарную матрицу представления изображения загрязненной торцевой поверхности феррула. Пример искаженной за счет загрязнения торца ОВ радиальных распределений полей основной моды LP_{01} приведены на рисунке 4.

6) По формуле (2) выполняется расчет коэффициента передачи α_{11} основной моды LP_{01} на стыке SM ОВ с учетом загрязнения участков торцевой поверхности центральной области сердцевины, соответствующей наибольшей концентрации поля моды, и коэффициента связи основной моды LP_{01} Tx с вытекающей модой LP_{02} Rx α_{12} .

7) Полученные в результате расчета значения коэффициентов связи мод подставляются в формулу (7), с помощью которой проводится оценка коэффициента отражения на анализируемом стыке.

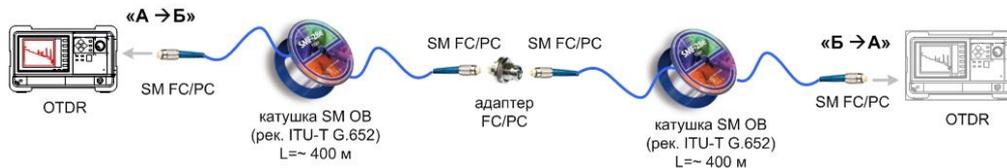


Рис. 8. Обобщенная структурная схема измерения вносимых потерь на разъёмном соединении пары «протяженных» SM ОВ

Fig. 8. Generalized Block-Diagram for Measurement of Reflection at the Connection of Two "Long" SMFs

Характеристика обратного рассеяния (рефлектограмма) макетной линии с разъёмным соединением представлена на рисунке 9. Получение изображений торцов феррул коннекторов, а также тестирование чистоты торца на уровне «Pass/Fail» в соответствии с ратифицированным стандартом IEC 61300-3-35 реализовывалась с помощью комплекта видеодиагностики Westover, в состав которого входят видеочип FBP P-5000 и программное обеспечение FiberCheck2™ [7].

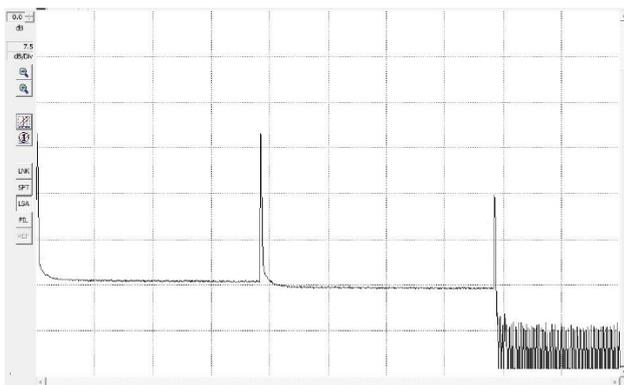


Рис. 9. Рефлектограмма макетной линии

Fig. 9. Trace of Lab Link

Как было отмечено выше, измерение коэффициента отражения выполнялось с помощью OTDR при следующих установленных параметрах измерения: рабочая длина волны $\lambda = 1310$ нм, длительность зондирующего импульса 50 нс, время усреднения

Верификация методики оценивания коэффициента отражения разъёмного соединения ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов

Для экспериментальной верификации разработанной и представленной в предыдущем разделе методики оценивания коэффициента отражения было предложено сопоставлять расчетные значения данного параметра с действительными (измеренными) на волоконно-оптических разъёмных соединениях пары стандартных SM ОВ (ITU-T Rec. G.652). Обобщенная структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 8. Тестировались две катушки Corning® SMF-28e™ (ITU-T Rec. G.652), оконцованные SM пигтейлами с коннекторами FC/PC длиной порядка 400 м, а сами измерения выполнялись штатным комплектом полевого OTDR.

30 с – при этом соблюдается требование по оптическому отношению сигнал/шум – OSNR (аббр. от англ. Optical Signal-to-Noise-Ratio) – на дальнем конце линии более 6,5 дБ [18–20].

Всего было исследовано 42 разъёмных соединения, при этом один из коннекторов намеренно загрязнялся, а второй, наоборот, – очищался таким образом, чтобы его торцевая поверхность проходила тест на чистоту по всем трем зонам ABC. При этом первое соединение и соединение через следующие 20 тестов выполнялись для обоих чистых коннекторов (рассматривались как эталон/опорные). Изображения торцов феррул коннекторов разной степени и характера загрязнения и соответствующие им бинарные изображения представлены на рисунке 10. Сводная диаграмма значений коэффициентов отражения, распределенная по номерам тестов, и наложенная поверх нее диаграмма отсортированных значений – на рисунке 11.

Анализ полученных данных показывает, что разброс значений коэффициента отражения полученной в ходе проведения тестов выборки из 42 измерений затухания на волоконно-оптическом разъёмном соединении пары SM ОВ с разной степенью и характером загрязнения торца феррула находится в диапазоне от $-57,03$ до $-24,40$ дБ. Гистограмма статистики распределения коэффициента отражения приведена на рисунке 14. Наибольшее число попаданий (11 тестов) зарегистрировано для интервала значений коэффициента отражения $R = -36...-35$ дБ. 7 тестов показали результаты выше допустимого

для СКС значения коэффициента отражения разъемного соединения $R = -35$ дБ [2-4], 21 – больше нормы -45 дБ, регламентируемой для телекоммуникационных сетей [5, 6]. Из 40 проведенных испытаний, предполагающих намеренное загрязнение торца феррула одного из пары коннекторов, 11 не прошли тест по всем трем зонам *ABC*, что составляет 27,5 %. Успешное прохождение теста одной зоны из трех: *A* и *C* – соответствуют по одному случаю, *B* – 6 испытаниям. При проведении 31 испытания из декларируемых 42, как минимум, 2 зоны феррула не прошли тест на загрязнение.

Как и предполагалось, основным фактором, наиболее существенно влияющим на увеличение отражения, является наличие загрязнений в зоне *A*, что формально подтверждают результаты экспериментальных исследований. Сопоставление статистики распределения полученных в ходе проведенных измерений значений коэффициента отражения по характеру загрязнений, с точки зрения их

расположения в выделенных зонах *ABC*, показывает, что во всех случаях неудовлетворительные относительно допускаемых стандартами СКС норм показатели относятся к случаям не прохождения теста зоной *A*.

Таким образом, для каждого из 42 реализованных разъемных соединений с разной степенью и характером загрязнения торцевой поверхности феррула одного из коннекторов было проведено вычисление коэффициента отражения на эквивалентном стыке представления по предложенной методике с последующим сопоставлением расчетного и действительного (непосредственно измеренного с помощью OTDR) значений данного параметра. Результирующая сводная диаграмма сопоставления расчетных значений коэффициента отражения на эквивалентном центрированном стыке и коэффициента отражения на разъемном соединении, измеренных с помощью OTDR, приведена на рисунке 13, гистограмма статистики распределения относительной погрешности – на рисунке 14.

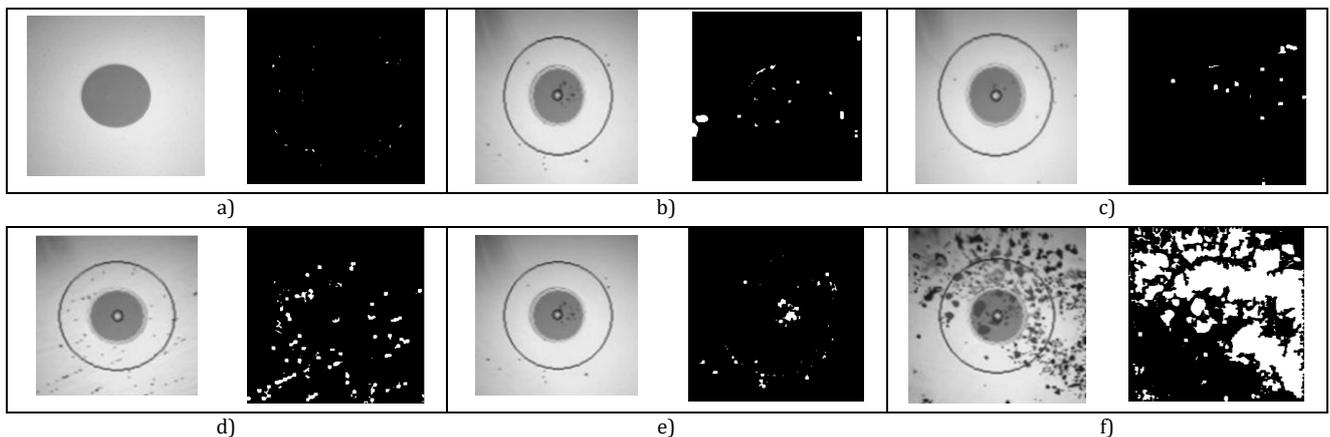


Рис. 10. Изображение торца феррула коннектора разъемного соединения с разной степенью и характером загрязнения: а) ABC-PASS; б) AB-PASS, C-FAIL; в) AC-PASS, B-FAIL; д) BC-PASS, A-FAIL; е) A-PASS, BC-FAIL; ф) ABC-FAIL

Fig. 10. Optical Fiber Connector Ferrule End Image under Various Order of Contamination: а) ABC-PASS; б) AB-PASS, C-FAIL; в) AC-PASS, B-FAIL; д) BC-PASS, A-FAIL; е) A-PASS, BC-FAIL; ф) ABC-FAIL

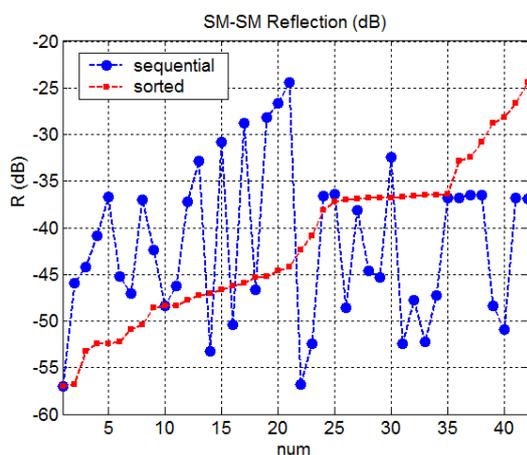


Рис. 11. Сводная диаграмма результатов измерения коэффициента отражения

Fig. 11. Cumulative Diagram of Measurement Results

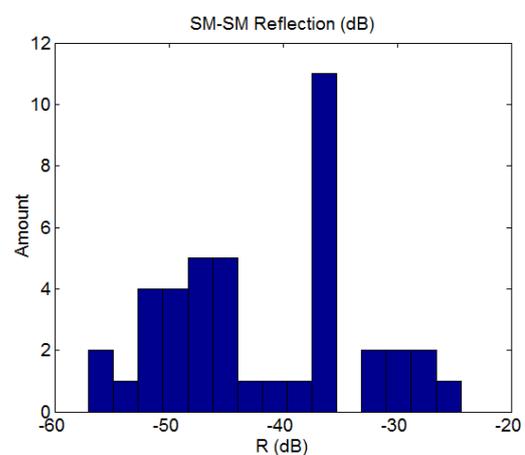


Рис. 12. Гистограмма распределения результатов измерения коэффициента отражения на стыке

Fig. 12. Histogram of Reflection Distribution, Measured at the Connection

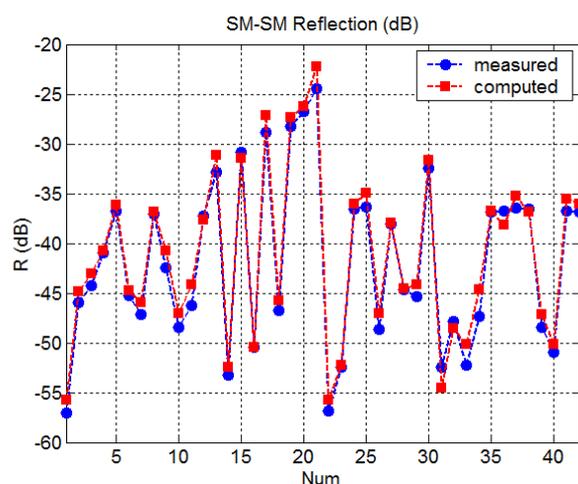


Рис. 13. Сводная диаграмма результатов сопоставления расчетных значений коэффициента отражения на эквивалентном центрированном стыке и измеренных OTDR значений коэффициента отражения на анализируемом разъёмном соединении

Fig. 13. Cumulative Diagram of Comparison Between Computation Results of Reflection at Centralized Connection and Measured by OTDR Value

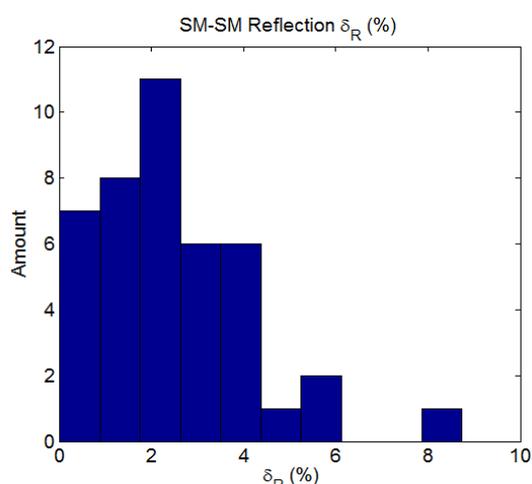


Рис. 14. Гистограмма статистики распределения относительной погрешности

Fig. 14. Error Statistics Distribution Histogram

Анализ полученных данных, за исключением отдельных случаев, показывает в целом хорошее сов-

падение расчетных и экспериментальных значений R . Для всех 42 испытаний относительная погрешность не превышает 10 %, и только для 3 из 42 отклонение составляет более 5 %. Как результат, среднее значение относительной погрешности по всем 42 стыкам составило 2,47 %.

Заключение

Разработана и представлена методика оценивания коэффициента отражения волоконно-оптического разъёмного соединения пары SM ОВ на основе анализа снимка торца феррул волоконно-оптических коннекторов с использованием дискретного представления полей взаимодействующих мод и расчета коэффициентов связи между ними, продемонстрирована ее работоспособность. Выявлена необходимость учета передачи части мощности прямого потока оптического излучения, поступающего с выхода ОВ Tx, вытекающим модам ОВ Rx, а также коэффициента связи компонентов обратного (отраженного) потока оптического излучения, поступающего на вход ОВ Tx с модами этого ОВ. Сформулированы практические рекомендации по выбору параметров эквивалентного стыка представления тестируемого волоконно-оптического разъёмного соединения: MFR мод обоих ОВ выбираются идентичными и соответствующими номинальным паспортным значениям, эквивалентный стык является центрированным. Проведена экспериментальная верификация разработанной методики на 42 разъёмных соединениях пар SM ОВ, для каждого из которых были получены изображения торцевых поверхностей феррул коннекторов разной степени и характера загрязнения, проведен расчет теоретического значения коэффициента отражения и последующее сопоставление с показаниями OTDR и протоколом тестирования на чистоту зон торца феррул ABC. Анализ полученных данных показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений указанного параметра R : для всех 42 относительная погрешность не превышает 10 %, и только для 3 из 42 отклонение составляет более 5 %.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90150 «Аспиранты».

Список используемых источников

1. РД 45.156–2000. Состав исполнительной документации на законченные строительством линейные сооружения магистральных и внутризоновых ВОЛП.
2. ГОСТ Р 53245-2008 Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания. М.: Стандартинформ, 2018.
3. ISO/IEC 11801:2002(E). Information technologies. Generic cabling for customer premises. 2002-09.
4. TIA/EIA-568-B.1. Commercial Building. Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1. General Requirements. 2001.
5. Нормы приёмо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования. М., 1997.
6. ITU-T Rec. G.671 (11/96). Transmission characteristics of passive optical components.
7. Westover FBP P-5000 FiberCheck2™. Руководство пользователя / пер. с англ. 2008.

8. IEC 61300-3-35. Fibre optic interconnecting devices and passive components. Basic test and measurement procedures. Part 3-35: Examinations and measurements. Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers. 06-2015.
9. Срапионов В.А. Связь мод в стыках оптических волокон с разбросом параметров // Электросвязь. 1985. № 10. С. 10–12.
10. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
11. Гурджи С.П., Каток В.Б. Расчет потерь в соединениях одномодовых световодов со сложным профилем показателя преломления // Электросвязь. 1990. № 10. С. 25–27.
12. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers // IEEE Photonics Technology Letters. 1994. Vol. 6. Iss. 8. PP. 998–1000. DOI:10.1109/68.313075
13. Yu Q., Zongo P.-H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1993. Vol. 11. Iss. 8. PP. 1270–1273. DOI:10.1109/50.254084
14. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers // Applied Optics. 1978. Vol. 17. Iss. 17. PP. 2842–2847. DOI:10.1364/AO.17.002842
15. Авруцкий И.А., Сычугов В.А., Тищенко А.В. Исследование процессов возбуждения, излучения и отражения света в гофрированных волноводах // Труды ИОФАН. 1991. Т. 34. С. 3–98.
16. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of Tilt or Offset Loss between Two Single-mode Graded-index Optical Waveguides. Proceedings of the International China Fibercom (Shanghai, China, 15–18 May 1994). 1994. PP. 356–362.
17. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1996. Vol. 14. Iss. 5. PP. 901–907. DOI:10.1109/50.495175
18. Understanding OTDRs. GN Nettest, 2000. 70 p.
19. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. Troubleshooting Optical Fibre Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.
20. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРПарт, 2005. 208 с.
21. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 512 с.
22. Bourdine A. Modeling and Simulation of Piecewise Regular Multimode Fiber Links Operating in a few-mode regime // Advances in Optical Technologies. 2013. Vol. 2013. DOI:10.1155/2013/469389

* * *

Method for Estimation of Reflection on Fiber Optic Connection Based on Analysis of Images of End Surfaces of Ferrule Connectors

A. Bourdine^{1, 2} , S. Pashin²

¹Scientific Production Association State Optical Institute Named after S.I. Vavilov, St. Petersburg, 192171, Russian Federation

²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

Received 2nd September 2020

Accepted 2nd November 2020

For citation: Bourdine A., Pashin S. Method for Estimation of Reflection on Fiber Optic Connection Based on Analysis of Images of End Surfaces of Ferrule Connectors. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):16–27. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-16-27

Abstract: *This work presents an alternative method for evaluating the reflection coefficient at a detachable connection of single-mode optical fibers based on the results of the analysis of images of the contaminated end surface of the ferrule of a pair of connectors of the studied joint, obtained with a standard field set of video diagnostics of the state of fiber-optic connectors. The results of experimental verification of the proposed method are presented, which have demonstrated the potential of its use in practical applications of "contactless" determination of the reflection coefficient on a fiber-optic connector.*

Keywords: few-mode optical fibers, few-mode regime of optical signal transmission, differential mode delay, non-symmetrical optical fibers, refractive index profile.

References

1. Industry Guidance Document 45.156–2000. *The Composition of the Executive Documentation for the Completed Construction of Linear Structures of Trunk and Intra-Zone Fiber-Optic Lines*. (in Russ.)
2. National Standard of the Russian Federation R 53245-2008. *Information Technologies. Structured Cabling Systems. Main System Elements Installation. Test Methods*. Moscow: Standardinform Publ.; 2008. (in Russ.)
3. ISO/IEC 11801:2002(E). *Information technologies. Generic cabling for customer premises*. 2002-09.
4. TIA/EIA-568-B.1. *Commercial Building. Telecommunications Cabling Standard (Revision of EIA/TIA-568-A). Part 1. General Requirements*. 2001.
5. *Norms of Acceptance Measurements of Elementary Cable Sections of Trunk and Intra-Zone Underground Fiber-Optic Transmission Lines of a Public Network*. Moscow; 1997 (in Russ.)
6. ITU-T Rec. G.671. *Transmission characteristics of passive optical components*. November 1996.
7. *Westover FB P-5000 FiberCheck2™*. User guide. 2008. (in Russ.)
8. IEC 61300-3-35:2015 RLV. *Fibre optic interconnecting devices and passive components. Basic test and measurement procedures. Part. 3-35. Examinations and measurements. Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers*. June 2015.
9. Srapionov V.A. Mode Coupling at Optical Fiber Junctions with Parameter Scatter. *Elektrosviaz*. 1985;10:10–12. (in Russ.)
10. Snyder A., Love J. *Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1987. 656 p. (in Russ.)
11. Gurdzhi S.P., Skating V.B. Calculation of losses in the connections of single-mode optical fibers with a complex refractive index profile. *Electrosvyaz*. 1990;10:25–27.
12. Meunier J.P., Wang Z.H., Hosain S.I. Evaluation of splice loss between two nonidentical single-mode graded-index fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1994;6(8):998–1000. DOI:10.1109/68.313075
13. Yu Q., Zongo P.-H., Facq P. Refractive index profile influences on mode coupling effects at optical fiber splices and connectors. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 1993;11(8):1270–1273. DOI:10.1109/50.254084
14. Chandra R., Thyagarajan K., Ghatak A.K. Mode excitation by tilted and offset Gaussian beams in W-type fibers. *Applied Optics*. 1978;17(17):2842–2847. DOI:10.1364/AO.17.002842
15. Avrutskiy I.A., Sychugov V.A., Tishchenko A.V. Investigation of the Processes of Excitation, Emission and Reflection of Light in Corrugated Waveguides. *Trudy IOFAN*. 1991;34:3–98. (in Russ.)
16. Meunier J.P., Wang Z.H. Evaluation of Tilt or Offset Loss between Two Single-mode Graded-index Optical Waveguides. *Proceedings of the International China Fibercom, 15–18 May 1994, Shanghai, China*. 1994. p.356–362.
17. Hosain S.I., Meunier J.P., Wang Z.H. Coupling efficiency of butt-joined planar waveguides with simultaneous tilt and transverse offset. *IEEE Journal of Lightwave Technology*. 1996;14(5):901–907. DOI:10.1109/50.495175
18. *Understanding OTDRs*. GN Nettest; 2000. 70 p.
19. Anderson D.R., Johnson L.M., Bell F.G. *Troubleshooting Optical Fibre Networks: Understanding and Using Optical Time-Domain Reflectometers*. San Diego: Elsevier Academic Press; 2004.
20. Listvin A.V., Listvin I.N. *Reflectometry of Optical Fibers*. Moscow: LESARart Publ.; 2005. 208 p. (in Russ.)
21. Adams M. *Introduction to the Theory of Optical Waveguides*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 512 p. (in Russ.)
22. Bourdine, A.V. Modeling and simulation of piecewise regular multimode fiber links operating in a few-mode regime. *Advances in Optical Technologies*. 2013;2013 DOI:10.1155/2013/469389

Сведения об авторах:

БУРДИН
Антон Владимирович

доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе и развитию АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики,
bourdine@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>

ПАШИН
Станислав Сергеевич

аспирант кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, заместитель директора центра стратегических инициатив Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики,
pashinstanislav@outlook.com

Итерационный алгоритм оценки смещения и угла поворота при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи для пространственно-временного совмещения телевизионных сигналов

Р.Р. Диязитдинов^{1*}, Н.Н. Васин¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация
*Адрес для переписки: rinat.diyazitdinov@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.09.2020

Принята к публикации 13.10.2020

Ссылка для цитирования: Диязитдинов Р.Р., Васин Н.Н. Итерационный алгоритм оценки смещения и угла поворота при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи для пространственно-временного совмещения телевизионных сигналов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 28–34. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-28-34

Аннотация: Оценка смещений, угла поворота и других деформаций изображений является актуальной проблемой в интеллектуальных системах видеорегистрации. Одной из основных задач при оценке деформаций изображений является повышение скорости обработки данных. Значительные объемы информации, содержащиеся в телевизионном сигнале, ограничивают возможности использования методов полного перебора, которые представляют собой универсальное решение для оценки неизвестных параметров. В работе рассматривается задача оценки смещения и угла поворота в условиях влияния аддитивной и мультипликативной помехи для пространственно-временного совмещения телевизионных сигналов. Сокращение времени обработки осуществляется за счет использования итерационной процедуры оценки параметров путем последовательного приближения при отдельной оценке угла поворота и смещения.

Ключевые слова: итерационный, смещение, поворот, аддитивная и мультипликативная помеха, совмещение, телевизионный сигнал.

Введение

Поиск телевизионного кадра в потоке видеоданных по известному фрагменту изображения является актуальной задачей для интеллектуальных систем видеорегистрации. Данная задача осложняется несколькими факторами: фрагмент изображения по отношению к записанным видеоданным может характеризоваться неизвестным углом поворота, а также может быть искажен аддитивной и мультипликативной помехой. Для поиска соответствия можно использовать переборные алгоритмы, при которых перебираются все возможные сочетания оцениваемых параметров и по значению метрики (обычно используется максимум коэффициента корреляции) выносится решение о значении параметров, которые позволят совместить фрагмент и анализируемое изображение.

Однако существенным недостатком такого подхода является низкая скорость вычислений. Она

связана с процессом формирования сигналов для сравнения и непосредственно с вычислением метрики.

По этой причине предложены методы оценки параметров для совмещения телевизионных сигналов на основе итерационных процедур, которые характеризуются более высокой скоростью вычислений [1–5].

Обзор существующих методов оценки совмещения

В работах [1, 2] предложены методы совмещения для плоскопараллельного смещения. В работах описана процедура обработки, при которой при переходе от точки к точке прямоугольной сетки вектор смещения менялся плавно. Описанные алгоритмы совмещения характеризуются низкой скоростью обработки, что ограничивает область их применения в задачах реального времени.

В работах [3, 4] приведен алгоритм итерационной процедуры. Но данная процедура позволяет оценивать угол поворота не более 15 градусов. При большем значении угла алгоритм будет давать неверную оценку параметров.

В работе [6–8] рассматривается случай плоскопараллельного смещения. Оценка смещения осуществляется за счет переборных методов, а также модифицированного подхода вычисления сверток сигналов на основании преобразования Фурье. Такой подход может быть использован для поиска соответствий, если угол поворота мал. При этом угол практически не влияет на метрику, которая используется для оценки смещения.

В работах [9–12] описан алгоритм совмещения для поиска фотографий в базах данных. Алгоритм основан на предварительном преобразовании изображения из декартовой системы координат в логарифмически-полярную систему координат для оценки поворота и масштаба. Смещение оценивается после учета найденных параметров. Данный способ можно использовать при условии, что смещение мало в сравнении с анализируемым изображением. А фрагмент и анализируемое изображение имеют приблизительно один и тот же размер.

В работе [13] описан подход определения совмещения путем предварительной генерации тестовых образов из фрагмента на основании аффинных преобразований с последующим сравнением тестовых образов и анализируемого изображения.

Особенностями решаемой задачи, в отличие от описанных выше, являются:

- смещение вдоль осей координат велико по отношению к фрагменту;
- угол поворота может быть произвольным;
- аддитивная и мультипликативная помеха может меняться в широком диапазоне (но при условии, что не нарушаются условия линейности – отсутствуют засветки изображения или уменьшения яркости элементов до нуля).

Математическое описание задачи

Изображения могут рассматриваться как двумерные сигналы с равномерным шагом дискретизации.

Параметрическая модель, связывающая между собой совмещаемые изображения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} f(x_i, y_i) = s(x_i, y_i) + k(x_i, y_i) \\ g(x_i, y_i) = \lambda s(x'_i, y'_i) + \gamma + m(x_i, y_i) \end{cases} \quad (1)$$

где $x'_i = x_i \cdot \cos(\varphi) - y_i \cdot \sin(\varphi) + h$; $y'_i = x_i \cdot \sin(\varphi) + y_i \cdot \cos(\varphi) + p$; $f(x_i, y_i)$, $g(x_i, y_i)$ – совмещаемые изображения; h, p – смещение вдоль оси абсцисс и ординат, соответственно; φ – угол поворота; γ, λ – аддитивная и мультипликативная помеха, соответственно.

Совмещение будет определяться параметрами $h, p, \varphi, \gamma, \lambda$. Для оценки параметров используется критерий максимума коэффициента корреляции, где θ – это совокупность оцениваемых параметров; N – это количество пикселей изображения:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta} (R(\theta)), \quad (2)$$

$$R(\theta) = \frac{(\sum_{i=1}^N g(x_i, y_i) \times f(x_i, y_i, \theta)) / N - ((\sum_{i=1}^N g(x_i, y_i)) / N) \times ((\sum_{i=1}^N f(x_i, y_i, \theta)) / N)}{(\sum_{i=1}^N g^2(x_i, y_i) - (\sum_{i=1}^N g(x_i, y_i))^2 / N)^{1/2} \times (\sum_{i=1}^N f^2(x_i, y_i, \theta) - (\sum_{i=1}^N f(x_i, y_i, \theta))^2 / N)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\theta = \{h, p, \varphi, \lambda, \gamma\}. \quad (4)$$

Оценка угла поворота при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи

Если смещение $\{h, p\}$ между фрагментом и анализируемым изображением известно, то оценку угла поворота, аддитивной и мультипликативной помехи можно осуществлять путем предварительного перехода из декартовой системы координат в полярную систему.

В полярной системе координат можно оценить угол поворота φ между двумя изображениями по смещению вдоль оси «угол поворота» (см. рисунок 1). Угол поворота φ будет прямо пропорционален этому смещению.

На рисунке 1а показано анализируемое изображение в декартовой системе координат. На нем выделена область, которая соответствует фрагменту (см. рисунок 1б).

На рисунке 1в показана та же область в полярной системе координат (преобразование в полярную систему проводилось относительно центра области). На рисунке 1г показан фрагмент в полярной системе координат (преобразование в полярную систему проводилось относительно центра фрагмента).

На рисунке 1в выделена область, которая соответствует изображению на рисунке 1г. Смещение вдоль оси «угол поворота» соответствует углу φ .

Критерий максимума коэффициента корреляции не зависит от аддитивной и мультипликативной помехи $\{\lambda, \gamma\}$. Чтобы в этом убедиться, достаточно рассчитать коэффициент корреляции для двух случаев: для векторов (x_i, y_i) и (z_i, y_i) , где $z_i = \lambda \times x_i + \gamma$; (x_i, y_i) – произвольные вектора. Расчет показал, что в обоих случаях коэффициент корреляции будет одинаковым.

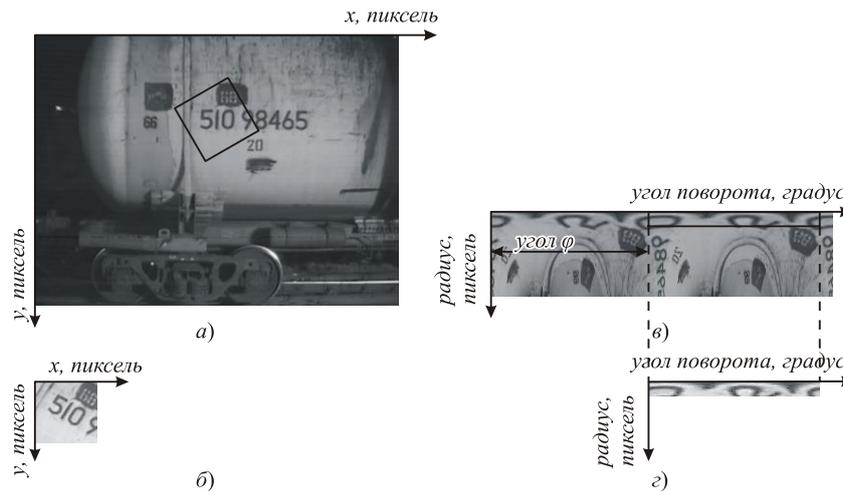


Рис. 1. Переход в полярную систему координат и оценка поворота

Fig. 1. Transformation at Polar Coordinate System and Rotate Estimation

После оценки угла поворота и смещений оцениваются параметры $\{\lambda, \gamma\}$ по методу наименьших квадратов:

$$\langle \hat{\lambda}, \hat{\gamma} \rangle = \operatorname{argmin}_{\lambda, \gamma} \left(\sum_{i=1}^N (\lambda f(x_i, y_i, \theta) + \gamma - g(x_i, y_i))^2 \right), \quad (5)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{Sg \cdot Sf - N \cdot Sfg}{Sf^2 - N \cdot Ef}, \quad (6)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{Sg \cdot Sfg - Sg \cdot Ef}{Sf^2 - N \cdot Ef}, \quad (7)$$

где $Sf = \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i, \theta)$; $Sg = \sum_{i=1}^N g(x_i)$; $Sfg = \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i, \theta) \cdot g(x_i)$; $Ef = \sum_{i=1}^N f^2(x_i, y_i, \theta)$, $\theta = \{\hat{h}, \hat{p}, \hat{\varphi}\}$, $f(x_i, y_i, \theta)$ – сигнал после преобразования с учетом найденных смещений и угла поворота.

Оценка смещения

В том случае, если смещение неизвестно, то неизвестны и координаты точки на анализируемом изображении, относительно которой можно проводить преобразование из декартовой системы в полярную систему координат, а, следовательно, нельзя оценить угол поворота. Наиболее логичным решением является проверка всех возможных смещений вдоль осей координат, и выбором того смещения, при котором коэффициент корреляции будет максимальным. Однако такой подход требует много процессорного времени.

Для уменьшения времени обработки можно использовать итерационную процедуру. Идея этой процедуры следующая: если выбранное значение смещения близко к действительному значению, то процедура оценки угла поворота даст грубую оценку этого параметра.

Используя грубую оценку угла φ , проводится поворот фрагмента изображения на этот угол. В результате фрагмент и анализируемое изображение будут отличаться только плоскопараллель-

ным смещением $\{h, p\}$. А оценка смещений $\{h, p\}$ проводится известными способами [6–8].

Измеренные смещения $\{h, p\}$ более точно определяют координаты точки, относительно которой проводится преобразование из декартовой системы в полярную систему координат. После этого этап уточнения угла поворота φ можно повторить. Данная итерационная процедура последовательного приближения позволяет уменьшить количество проверяемых смещений, тем самым уменьшая время обработки.

Алгоритм имеет вид блок-схемы.

Блок 1. Загрузка анализируемого изображения из архива видеоданных.

Блок 2. Загрузка фрагмента изображения (определяется пользователем).

Блок 3. Определение возможных значений смещений $\{h_k, p_k\}$, $k = 1 \dots K$, где K – количество возможных смещений.

Блок 4. В цикле последовательно выбирается номер k и соответствующие этому значению смещения $\{h_k, p_k\}$.

Блок 5. Итерационная процедура оценки смещений, угла поворота, при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи с сохранением значения метрики.

Блок 6. Если все возможные смещения проверены, переход к блоку 7, в противном случае – переход к блоку 4.

Блок 7. Вынесение решения относительно $\{h, p, \varphi, \lambda, \gamma\}$ по максимальному значению метрики.

Исходными данными для итерационной процедуры является $\{h_k, p_k\}$.

Итерационная процедура включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Определяются векторы dh_i, dp_i , где $i = 1 \dots N$, если N – количество итераций. Все элементы в векторах равны нулю.

Шаг 2. Инициализируется переменная j для цикла: $j = 0$.

Шаг 3. Переменная j инкрементируется: $j = j + 1$. Вычисляются координаты точки (H, P) :

$$H = h_k + \sum_{i=1}^N dh_i, P = p_k + \sum_{i=1}^N dp_i.$$

Шаг 4. Относительно точки (H, P) анализируемое изображение переводится из декартовой системы координат в полярную систему.

Шаг 5. Относительно центра фрагмент переводится из декартовой системы координат в полярную систему.

Шаг 6. Используя изображения в полярной системе, оценивается угол поворота φ .

Шаг 7. В соответствии с оцененным углом фрагмент поворачивается на угол $-\varphi$ относительно центра.

Шаг 8. Полученный (см. шаг 7) фрагмент и область анализируемого изображения в окрестности точки (H, P) используются для оценки смещений $\{dh_i, dp_i\}$.

Шаг 9. Проверяется условие: если $j > N$, то переход к шагу 10, в противном случае – к шагу 3.

Шаг 10. По полученным значениям φ, H, P определяется область на анализируемом изображении, которая наиболее схожа с совмещаемым фрагментом. И с использованием формулы (5) оцениваются параметры $\{\lambda, \gamma\}$.

Оценка смещения с использованием алгоритма Lucas – Kanade

Итерационный алгоритм оценки параметров преобразования при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи позволяет оценивать раздельно три группы параметров: угол поворота φ ; смещения $\{h, p\}$; значение аддитивной и мульти-

пликативной помехи $\{\lambda, \gamma\}$. Это позволяет сократить время обработки.

В описанном выше алгоритме содержится очень важное уточнение, что итерационная процедура обеспечивает верную оценку параметров в том случае, если выбранные возможные смещения $\{h_k, p_k\}$ близки к действительным значениям. Это означает, что вместо алгоритма полного перебора для вычисления смещений $\{dh_i, dp_i\}$ можно использовать процедуру оценки смещений по методу Lucas – Kanade [14].

Классическая модель не учитывает влияние аддитивной и мультипликативной помехи, поэтому ее применение приведет к увеличению погрешностей оценки параметров. Модернизированный вариант метода Lucas – Kanade позволяет устранить данный недостаток.

Математическая модель для данного случая описывается как:

$$\begin{cases} f(x_i, y_i) = s(x_i, y_i) + k(x_i, y_i) \\ g(x_i, y_i) = \lambda s(x_i + h, y_i + p) + \gamma + m(x_i, y_i) \end{cases} \quad (8)$$

Разложение функции $f(x_i, y_i)$ в ряд Тейлора имеет вид:

$$f(x_i + h, y_i + p) \approx f(x_i, y_i) + q(x_i, y_i)h + r(x_i, y_i)p,$$

где $q(x_i, y_i) = \frac{f(x_{i+1}, y_i) - f(x_i, y_i)}{x_{i+1} - x_i}$; $r(x_i, y_i) = \frac{f(x_i, y_{i+1}) - f(x_i, y_i)}{y_{i+1} - y_i}$.

Значение параметров определяется по методу наименьших квадратов в виде формулы (9). Вводя обозначение $\mu = \lambda \cdot h$, $\varepsilon = \lambda \cdot p$, формула (9) запишется в виде формулы (10). Раскрывая содержимое формулы (10) под знаком квадрата и вычисляя частные производные по искомым параметрам $\{\mu, \varepsilon, \lambda, \gamma\}$, можно записать систему линейных уравнений. Система уравнений для оценки параметров $\{h, p, \lambda, \gamma\}$ запишется в виде формулы (11).

$$\langle \hat{h}, \hat{p}, \hat{\lambda}, \hat{\gamma} \rangle = \operatorname{argmin}_{h, p, \lambda, \gamma} \left(\sum_{i=1}^N (\lambda \cdot f(x_i, y_i) + \lambda \cdot h \cdot q(x_i, y_i) + \lambda \cdot p \cdot r(x_i, y_i) + \gamma - g(x_i, y_i))^2 \right), \quad (9)$$

$$\langle \hat{\mu}, \hat{\varepsilon}, \hat{\lambda}, \hat{\gamma} \rangle = \operatorname{argmin}_{\mu, \varepsilon, \lambda, \gamma} \left(\sum_{i=1}^N (\lambda \cdot f(x_i, y_i) + \mu \cdot q(x_i, y_i) + \varepsilon \cdot r(x_i, y_i) + \gamma - g(x_i, y_i))^2 \right), \quad (10)$$

$$\begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^N f^2(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)q(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)r(x_i, y_i) + \gamma \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i)f(x_i, y_i) \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)q(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q^2(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i)r(x_i, y_i) + \gamma \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i)q(x_i, y_i) \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i)r(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i)q(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r^2(x_i, y_i) + \gamma \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i)r(x_i, y_i) \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) + \gamma \cdot N = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i) \end{cases} \quad (11)$$

Представленный вариант оценки параметров смещения $\{h, p\}$ позволяет уменьшить время по сравнению с алгоритмом полного перебора за счет аналитического расчета неизвестных параметров. Тем самым, итерационная процедура (см. выше) будет модернизирована в части последних шагов, а именно:

Шаг 8. Полученный (см. шаг 7) фрагмент и область анализируемого изображения в окрестности точки (H, P) используются для оценки параметров $\{dh_i, dp_i, \lambda, \gamma\}$ с помощью формулы (11).

Шаг 9. Проверяется условие: если $j < N$, то переход к шагу 3, в противном случае – конец процедуры.

Численное моделирование

С целью определения времени, которое необходимо для совмещения, было проведено два эксперимента.

В первом эксперименте использовался фрагмент размером 32×32 пикселя. Для оценки параметров использовался алгоритм полного перебора (проверялись все возможные смещения $\{h_k, p_k\}$, условно шаг дискретизации равен одному пикселю вдоль осей координат) и разработанный итерационный алгоритм (шаг дискретизации равнялся двум и трем пикселям, при большем шаге дискретизации наблюдалась неверная оценка параметров). Второй эксперимент отличается от первого тем, что использовался фрагмент размером 64×64 пикселя, и для итерационного алгоритма шаги дискретизации равнялись от 2, 3 ... 5. Анализируемое изображение имеет размеры 288×384 пикселя.

На рисунке 2 показаны результаты измерения времени, которое было затрачено на обработку данных для фрагментов с размером 32×32 и 64×64 пикселя. Шаг дискретизации, равный единице, соответствует существующему алгоритму полного перебора. Шаг дискретизации, отличный от единицы, соответствует разработанному итерационному алгоритму.

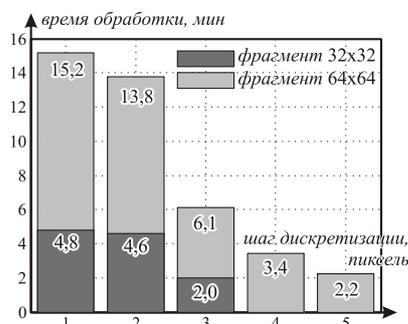


Рис. 2. Время обработки при совмещении

Fig. 2. Processing Time of Superposition

На рисунке 3 показаны результаты измерения времени, которое было затрачено на обработку данных с применением алгоритма Lucas – Kanade.

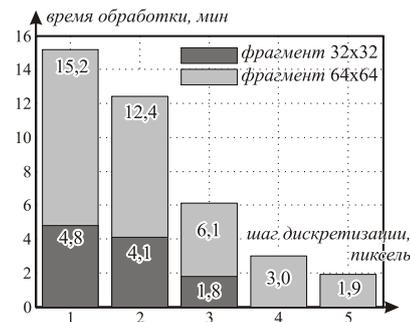


Рис. 3. Время обработки при совмещении с применением алгоритма Lucas – Kanade

Fig. 3. Processing Time of Superposition by Lucas – Kanade Algorithm

Из графиков времени обработки видно, что с увеличением шага дискретизации наблюдается тенденция к уменьшению времени обработки как для фрагмента 32×32 пикселя, так и для фрагмента 64×64 пикселя.

Заключение

В работе представлен алгоритм итерационной оценки смещений, угла поворота при влиянии аддитивной и мультипликативной помехи.

При рассмотрении одного элемента изображения алгоритм оценки параметров (оценки смещений и угла поворота) требует меньшего времени обработки, чем итерационный алгоритм.

Однако для итерационного алгоритма нет необходимости проверки каждого элемента изображения. Для этой цели достаточно проверить каждый четвертый пиксель (при шаге дискретизации равном двум) или каждый девятый пиксель (при шаге дискретизации равном трем) и т. д. За счет уменьшения количества проверяемых элементов изображения достигается значительное уменьшение времени обработки при совмещении изображений телевизионных сигналов.

Также было установлено, что чем больше размер фрагмента, по которому проводится совмещение, тем большим шаг дискретизации может быть использован. С точки зрения сокращения времени обработки это означает, что чем больше фрагмент, тем быстрее будет проводиться совмещение.

В частности, в представленной работе для фрагмента 32×32 пикселя шаг дискретизации равняется 3, для фрагмента 64×64 пикселя шаг дискретизации равняется 5. Данный вывод подтверждается и в работе [9], в которой фактически использовалась та же самая процедура оценки параметров в виде одной итерации. Для фрагмента изображения размером 200×200 пикселей было установлено, что шаг дискретизации может достигать 20.

Таким образом, представленный алгоритм может быть использован для совмещения телевизионных сигналов в интеллектуальных системах видеорегистрации. Поиск кадра изображения в видеопотоке тесно связан с индексацией информа-

ции, когда для быстрой навигации используется некоторый идентификатор (число, составной индекс, известный фрагмент изображения и т. д.). Параметр «время индексации» (в терминах представленной статьи этому параметру соответствует «время обработки при совмещении») является важной технико-эксплуатационной характеристикой интеллектуальных систем видеорегистрации и очень важен для пользователей этих систем.

Например, разработанный итерационный алгоритм позволил сократить время обработки приблизительно в 2,4 раза для фрагмента 32×32 пикселя и в 6,9 раз для фрагмента 64×64 пикселя. А алгоритм с использованием метода Lucas – Kanade позволил сократить время обработки приблизительно в 2,7 раз для фрагмента 32×32 пикселя и в 8,0 раз для фрагмента 64×64 пикселя.

Список используемых источников

1. Fleet D.J., Jepson A.D. Computation of Component Image Velocity from Local Phase Information // International Journal of Computer Vision. 1990. Vol. 5. Iss. 1. PP. 77–104. DOI:10.1007/BF00056772
2. Mülke H., Nomura A., Koga K. Determining Image Flow from Multiple Frames Based on the Continuity Equation // Technol. Repts Yamaguchi Univ. 1991. Vol. 4. Iss. 5. PP. 387–397.
3. Чекотило Е.Ю. Итерационная процедура высокоточного совмещения аффинно-преобразованных изображений // I Международная научная конференция «Технические науки: проблемы и перспективы»: сборник трудов (Санкт-Петербург, Россия, март 2011). Санкт-Петербург: Реноме, 2011. С. 188–191.
4. Кузнецов П.К., Чекотило Е.Ю., Мартемьянов Б.В. Исследование сходимости итерационной процедуры определения параметров движения изображений методом функционализации // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 1(26). С. 80–85.
5. Ефимов А.И., Новиков А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 2. С. 258–265. DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265
6. Дмитриев А.Л. Оптические методы обработки информации: учебное пособие. СПб.: СПбГУИТМО, 2005. 46 с.
7. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа, 1988. 237 с.
8. Evangelidis G.D., Psarakis E.Z. Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2008. Vol. 30. Iss. 10. PP. 1858–1865. DOI:10.1109/TPAMI.2008.113
9. Мясников Е.В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 3. С. 77–82.
10. Wolberg G., Zokai S. Robust image registration using log-polar transform // Proceedings of the International Conference on Image Processing (Cat. No.00CH37101, Vancouver, Canada, 10–13 September 2000). IEEE, 2000. Vol. 1. PP. 493–496. DOI:10.1109/ICIP.2000.901003
11. De Castro E., Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1987. Vol. 9. Iss. 5. PP. 700–703. DOI:10.1109/TPAMI.1987.4767966
12. Reddy B.S., Chatterji B.N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1996. Vol. 5. Iss. 8. PP. 1266–1270. DOI:10.1109/83.506761
13. Brown L.G. A survey of image registration techniques // ACM Computing Surveys. 1992. Vol. 24. No. 4. PP. 325–376. DOI:10.1145/146370.146374
14. Lucas B.D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI, Vancouver, Canada, 24–28 August 1981). 1981. PP. 121–130.

* * *

Iterative Algorithm Offset and Angle Rotation Estimation with Additive and Multiplicative Noise for Space-Time Superposition of Television Signals

R. Diyazitdinov¹, N. Vasin¹

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-28-34

Received 21st September 2020

Accepted 13th October 2020

For citation: Diyazitdinov R., Vasin N. Iterative Algorithm Offset and Angle Rotation Estimation with Additive and Multiplicative Noise for Space-Time Superposition of Television Signals. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4): 28–34 (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-28-34

Abstract: *The estimation of displacements, rotation angle and other deformation of images is an urgent problem in the intelligence video recording system. One of the main tasks in assessing image deformations is to increase the speed of data processing. Significant amounts of information contained in a television signal limit the possibilities of using brute force methods, which are a universal solution for estimating unknown parameters. The paper considers the problem of estimating the displacement and angle of rotation under the influence of additive and multiplicative interference for the spatial-temporal alignment of television signals. Reducing the processing time is carried out through the use of an iterative procedure for estimating parameters by successive approximation with separate estimation of the angle of rotation and displacement.*

Keywords: *iterative, offset, rotation, additive and multiplicative noise, superposition, television signals.*

References

1. Fleet D.J., Jepson A.D. Computation of Component Image Velocity from Local Phase Information. *International Journal of Computer Vision*. 1990;5(1):77–104. DOI:10.1007/BF00056772
2. Miike H., Nomura A., Koga K. Determining Image Flow from Multiple Frames Based on the Continuity Equation. *Technol. Repts Yamaguchi Univ*. 1991;4(5):387–397.
3. Chekotilo E.Yu. Iterative Procedure for High-Precision Alignment of Affine-Transformed Images. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Technical Sciences: Problems and Prospects, March 2011, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Renome Publ.; 2011. p.188–191. (in Russ.)
4. Kuznecov P.K., Chekotilo E.Yu., Martemyanov B.V. Research Iterative Procedure Convergence for Computing Image Motion Parameters by Functionalization Method. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2010;1(26):80–85. (in Russ.)
5. Efimov A.I., Novikov A.I. An Algorithm for Multistage Projective Transformation Adjustment for Image Superimposition. *Computer Optics*. 2016;40(2):258–265. (in Russ.) DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265
6. Dmitriev A.L. *Optical Methods of Information Processing*. St. Petersburg: ITMO University Publ.; 2005. 46 p. (in Russ.)
7. Akaev A.A., Mayorov S.A. *Optical Methods of Information Processing*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1988. 237 p. (in Russ.)
8. Evangelidis G.D., Psarakis E.Z. Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008;30(10):1858–1865. DOI:10.1109/TPAMI.2008.113
9. Myasnikov E.V. Geometric Transform Parameters Estimation for Superposition Portrait Images. *Computer Optics*. 2007;31(3):77–82. (in Russ.)
10. Wolberg G., Zokai S. Robust image registration using log-polar transform. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, Cat. No.00CH37101, 10–13 September 2000, Vancouver, Canada*. IEEE; 2000. vol.1. p.493–496. DOI:10.1109/ICIP.2000.901003
11. De Castro E., Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1987;9(5):700–703. DOI:10.1109/TPAMI.1987.4767966
12. Reddy B.S., Chatterji B.N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1996;5(8):1266–1270. DOI:10.1109/83.506761
13. Brown L.G. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*. 1992;24(4):325–376. DOI:10.1145/146370.146374
14. Lucas B.D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI, 24–28 August 1981, Vancouver, Canada*. 1981. p.121–130.

Сведения об авторах:

**Диязитдинов
Ринат Радмирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сети и системы связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, rinat.diyazitdinov@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-6360-0351>

**Васин
Николай Николаевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сети и системы связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, vasin@psati.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9749-4884>

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**05.12.04 – Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения**

**05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства
и их технологии**

**05.12.13 – Системы, сети
и устройства телекоммуникаций**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация



Минимизация вероятности ошибки на бит в многоэтапной релейной MIMO-системе

А.Г. Флакман^{1*}, И.С. Сорокин¹, А.О. Кокарев²

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация

²ООО «Радио Лаб НН»,
Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация

*Адрес для переписки: flak@rf.unn.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.10.2020

Принята к публикации 27.10.2020

Ссылка для цитирования: Флакман А.Г., Сорокин И.С., Кокарев А.О. Минимизация вероятности ошибки на бит в многоэтапной релейной MIMO-системе // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 36–44. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44

Аннотация: Рассматриваются многоэтапные релейные MIMO-системы (Multiple-Input Multiple-Output) сотовой связи с антенными решетками на каждом этапе передачи, в которых формируются параллельные независимые собственные подканалы для передачи данных. Исследуется возможность минимизации вероятности ошибки на бит передаваемой информации при одновременном использовании метода раздельной оптимизации каждого этапа передачи и порогового метода отбора энергетически сильных подканалов. Приведенные результаты моделирования в случае многолучевого канала с релейскими замираниями сигналов подтверждают высокую эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: MIMO-система, собственный подканал, вероятность ошибки на бит, пропускная способность, релейские замирания сигналов.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие систем сотовой связи, которые должны обеспечивать достаточно низкие значения вероятности ошибки на бит передаваемой информации. Многолучевой характер распространения радиоволн может приводить к достаточно глубоким замираниям сигналов. Для борьбы с такими замираниями используется так называемая MIMO-технология (аббр. от англ. Multiple-Input Multiple-Output – множественный вход множественный выход) [1–5], которая основана на применении передающих и приемных антенных решеток (АР) и различных методов пространственной обработки сигналов в этих АР. В MIMO-системе при некоррелированных замираниях сигналов в элементах АР обеспечивается максимальный порядок пространственного разнесения, равный произведению числа передающих и приемных антенн. Высокая скорость передачи данных в MIMO-системе обеспечивается за счет формирования параллельных пространственных подканалов для передачи данных.

По методам обработки сигналов MIMO-системы разделяются на два класса в зависимости от того, доступна или нет информация о пространственном

канале на передающей стороне линии связи (системы без обратной связи или с обратной связью). В условиях частотно неселективного канала такая информация содержится в матрице коэффициентов передачи (канальная матрица) между антеннами передающей и приемной АР. Элементы канальной матрицы оцениваются на приемной стороне с помощью известных (пилотных) символов и затем могут быть переданы по обратной линии связи на передающую сторону. В этом случае подканалы становятся взаимно независимыми и называются собственными, так как в качестве весовых векторов для их формирования используются собственные векторы канальной матрицы [6–8]. Число подканалов не превышает ранг этой матрицы. По энергетике собственные подканалы могут значительно отличаться друг от друга, так как их коэффициентами усиления являются собственные числа канальной матрицы, которые имеют большой разброс, особенно в системе с близким количеством передающих и приемных антенн. Полная вероятность ошибки на бит в MIMO-системе зависит от величины суммарной среднеквадратической ошибки (СКО) между входными и выходными сигналами во всех подканалах.

Обработка сигналов на базовой станции и оборудовании пользователя (мобильная станция) является достаточно сложной и нелинейной, в первую очередь за счет использования кодера и декодера. Это приводит к удорожанию аппаратуры сети при достаточно большом числе базовых станций. Поэтому представляют интерес системы сотовой связи с последовательно расположенными релейными станциями, которые обеспечивают многоэтапную передачу данных [9–15]. На релейных станциях выполняется только более простая обработка передаваемой информации (усиление, модуляция и демодуляция с детектированием), а более сложная обработка, связанная с кодированием и декодированием данных, производится только на базовой и мобильной станциях [9, 10].

В такой MIMO-системе ошибки передаваемой информации накапливаются и увеличиваются с ростом числа этапов передачи. Однако упрощение обработки сигналов на релейных станциях дает возможность размещать их на меньших расстояниях друг от друга по сравнению с базовыми станциями. При этом ослабление сигналов в пространственном канале связи уменьшается, а, следовательно, выходное отношение сигнал/шум (ОСШ) будет увеличиваться, что обеспечит соответствующее уменьшение СКО и, следовательно, вероятности ошибки. Релейную MIMO-систему можно представить в виде параллельного набора независимых собственных подканалов, формируемых на основе собственных векторов канальных матриц каждого этапа передачи. Общее число подканалов определяется их минимальным числом на некотором этапе. Оптимизацию передачи в релейной MIMO-системе можно представить, как минимизацию следа матрицы СКО между входными (базовая станция) и выходными (мобильная станция) символами при ограничениях на мощности всех передатчиков. При этом искомыми являются распределения мощности между собственными подканалами на каждом этапе передачи. Такая оптимизация, которая называется совместной, не дает аналитического решения для оптимальных распределений мощностей. Она основана на итерационной процедуре поиска экстремума целевой функции, число аргументов которой представляет собой произведение числа подканалов на число этапов передачи данных, т. е. может быть достаточно большим. В [16] исследован квазиоптимальный метод отдельной оптимизации, основанный на минимизации следа матрицы СКО последовательно для каждого этапа передачи данных. При этом число аргументов целевой функции уменьшается до числа подканалов, что дает возможность получить строгие аналитические выражения для распределений мощности на каждом этапе, которые зависят от статистик второго порядка передаваемых символов. Эффективность метода является высокой.

В [8] предложен пороговый метод передачи данных в MIMO-системе, который предполагает передачу данных только по-энергетически «сильным» собственным подканалам за счет отключения «слабых» подканалов с малыми значениями ОСШ. При этом обеспечивается компромисс между скоростью передачи данных и вероятностью ошибки на бит. Разделение каналов на энергетически сильные и слабые производится с помощью пороговой техники. В [17] рассматривалась сравнительная эффективность метода отдельной оптимизации и порогового метода для обычной (без релейных станций) MIMO-системы. Показано, что в наиболее сложных условиях, когда прямой луч между передающей и приемной антеннами практически отсутствует, а связь обеспечивается за счет многолучевой (рассеянной) компоненты с релеевскими замираниями сигналов, пороговый метод обеспечивает более высокие характеристики MIMO-системы, особенно в области достаточно низких значений ОСШ.

Представляет интерес сравнительный анализ вероятности ошибки на бит передаваемой информации и пропускной способности в MIMO-системе с произвольным числом релейных станций при совместном использовании этих двух методов. Такому анализу посвящена настоящая работа.

Раздельная оптимизация релейной MIMO-системы

Рассмотрим $(K+1)$ -этапную релейную MIMO-систему, в которой информация передается базовой станцией, ретранслируется K релейными станциями и принимается мобильной станцией. На базовой станции, каждой релейной станции и мобильной станции имеются по несколько передающих и приемных антенн. Обозначим через M_k и N_k число передающих и приемных антенн на k -ом этапе передачи ($k = 1, 2, \dots, K+1$).

Будем считать взаимные задержки при распространении сигналов между передающими и приемными антеннами малыми по сравнению с длительностью символов, что характерно для сетей мобильной связи четвертого поколения (4G). При этом k -ый пространственный MIMO-канал является частотно-неселективным и описывается $\{N_k \times M_k\}$ -размерной канальной матрицей \mathbf{H}_k комплексных коэффициентов передачи. Элементы матриц \mathbf{H}_k ($k = 1, 2, \dots, K+1$) являются случайными величинами, оцениваются на приемной стороне соответствующего этапа и сообщаются на передающую сторону по обратной служебной линии связи, т. е. являются известными не только на приемной, но и на передающей стороне каждого этапа.

Схема $(K+1)$ -этапной релейной MIMO-системы показана на рисунке 1, где \mathbf{s}_0 – вектор входных символов, \mathbf{s}_{k-1} – вектор ретранслируемых символов; \mathbf{F}_k – матрица пространственного кодирования и распределения мощности на $(k-1)$ -ой релейной станции.

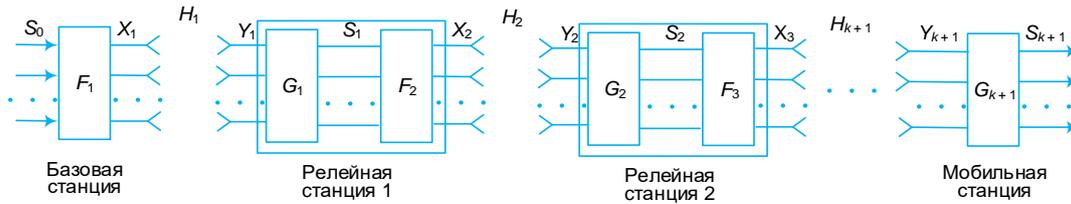


Рис. 1. Схема (K+1)-этапной релейной MIMO-системы

Fig. 1. Scheme of a (K+1)-Hop Relay MIMO System

На рисунке 1 \mathbf{x}_k – вектор кодированных символов, состоящий из M_k компонент; \mathbf{G}_k – матрица пространственного декодирования на k -ой релейной станции; \mathbf{y}_k и \mathbf{n}_k – векторы сигналов и собственных шумов в приемной AP, состоящие из N_k компонент.

Индексы $k = 1$ и $k = K+1$ соответствуют базовой и мобильной станциям, а индексы $k = 2, \dots, K$ относятся к релейным станциям. Вектор \mathbf{s}_{k-1} данных преобразуется в вектор \mathbf{x}_k с использованием матрицы кодирования \mathbf{F}_k размерности $\{M_k \times L\}$, т.е. $\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{s}_{k-1}$. Вектор принятых сигналов $\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k$ декодируется в вектор \mathbf{s}_k принятых символов: $\mathbf{s}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{y}_k$, где \mathbf{G}_k – матрица декодирования размерности $\{L \times N_k\}$. Матрицы \mathbf{F}_k и \mathbf{G}_k обеспечивают линейную пространственную обработку передаваемых данных на релейных станциях. Тогда получим, что вектор \mathbf{s}_k будет равен:

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{s}_{k-1} + \mathbf{G}_k \mathbf{n}_k. \quad (1)$$

Обозначим через $\tilde{\mathbf{U}}_k, \tilde{\mathbf{V}}_k^H$ – матрицы, столбцы которых представляют собой левые и правые сингулярные векторы канальной матрицы \mathbf{H}_k , ранг которой равен L_k . Все L_k сингулярных чисел этой матрицы расположим по убыванию и объединим в диагональную матрицу $\tilde{\Lambda}_k = \text{diag}\{\tilde{\lambda}_{1,k}, \dots, \tilde{\lambda}_{L_k,k}\}$. Тогда сингулярное разложение матрицы \mathbf{H}_k принимает вид: $\mathbf{H}_k = \tilde{\mathbf{U}}_k \tilde{\Lambda}_k \tilde{\mathbf{V}}_k^H$ [18, 19].

Ранг канальной матрицы, а следовательно, число собственных подканалов передачи данных на каждом этапе может быть в общем случае разным. Очевидно, что результирующее число L подканалов должно быть одинаковым на всех этапах и равным минимальному числу подканалов $\{L \leq \min\{L_1, \dots, L_{K+1}\}\}$. Выделим для каждого этапа L наибольших сингулярных чисел и сформируем диагональную матрицу $\Lambda_k = \text{diag}\{\lambda_{k,1}, \dots, \lambda_{k,L}\}$ и матрицы левых (\mathbf{U}_k) и правых (\mathbf{V}_k) сингулярных векторов, размерностью $N_k \times L$ и $M_k \times L$, соответственно.

Найдем среднюю мощность $P^{(k)}$ на k -ом этапе передачи, излучаемую k -ой AP. Имеем, что $P^{(k)} = \text{Tr}\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H\}$, где $\text{Tr}\{\cdot\}$ – след матрицы; $(\cdot)^H$ – эрмитово сопряжение. Нетрудно получить, что:

$$P^{(k)} = \text{Tr}\{\mathbf{F}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{F}_k^H\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Q}_{k-1} = \langle \mathbf{s}_{k-1} \mathbf{s}_{k-1}^H \rangle$ – корреляционная матрица символов, передаваемых на предыдущем этапе; $\langle \cdot \rangle$ – статистическое среднее.

Для корреляционной матрицы \mathbf{Q}_k можно получить с помощью (1) рекуррентное соотношение вида:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{F}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{G}_k^H + \mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^H. \quad (3)$$

Для применения этого выражения учтем, что на первом этапе корреляционная матрица \mathbf{Q}_0 является единичной ($\mathbf{Q}_0 = \mathbf{I}$), так как передаваемые символы являются статистически независимыми.

Метод отдельной оптимизации [16] основан на поиске условного минимума СКО отдельно для каждого этапа релейной MIMO-системы при ограничении средней мощности $P^{(k)}$ соответствующего передатчика. Матрица СКО между переданным \mathbf{s}_{k-1} и принятым \mathbf{s}_k символами на k -ом этапе передачи равна $\Sigma_k = \langle (\mathbf{s}_k - \mathbf{s}_{k-1})(\mathbf{s}_k - \mathbf{s}_{k-1})^H \rangle$. Оптимизация каждого этапа сводится к оптимизации обычной (одноэтапной) MIMO системы [6, 7, 20]. В результате для матриц кодирования и декодирования будем иметь:

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{V}_k \mathbf{P}_k^{0.5} \mathbf{U}_0, \mathbf{G}_k = (\mathbf{U}_0^H \Lambda_k^2 \mathbf{P}_k \mathbf{U}_0 + \mathbf{Q}_{k-1}^{-1})^{-1} \mathbf{U}_0^H \Lambda_k \mathbf{P}_k^{0.5} \mathbf{U}_k^H, \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_k = \text{diag}\{p_{k,1}, \dots, p_{k,L}\}$ – диагональная матрица, которая дает распределение средней мощности $P^{(k)}$ между собственными подканалами на k -ом этапе; \mathbf{U}_0 – унитарная матрица ($\mathbf{U}_0^{-1} = \mathbf{U}_0^H$). В качестве этой матрицы в принципе можно выбрать любую матрицу, обладающую этим свойством. Однако удобнее выбрать матрицу поворота, состоящую из коэффициентов дискретного преобразования Фурье. Тогда $p_{k,q}$ -ый элемент будет равен $(\mathbf{U}_0)_{pq} = L^{-0.5} \exp[j(2\pi/L)(p-1)(q-1)]$.

Усиления собственных подканалов на k -ом этапе определяются квадратами сингулярных чисел $\lambda_{k,j}^2$ ($j = 1, 2, \dots, L+1$) и могут быть существенно различными, особенно для MIMO-системы с близким числом передающих и приемных антенн. Вследствие этого, вероятность ошибки на бит также может значительно различаться в разных подканалах. Унитарная матрица \mathbf{U}_0 поворота преобразует вектор \mathbf{s}_{k-1} , состоящий из L ретранслируемых символов в вектор $\mathbf{U}_0 \mathbf{s}_{k-1}$ «повернутых» L символов. При этом, каждый исходный символ распределяется по всем подканалам равномерно по мощности. Это означает, что если символ передавался по некоторому собственному подканалу, то в результате поворота он будет передаваться по всем подканалам.

Вследствие унитарности матрицы \mathbf{U}_0 ее можно использовать только на входе и выходе релейной ММО-системы (на базовой и мобильной станциях).

Таким образом, решение (4) приводит к диагональной структуре релейной ММО-системы по отношению к «повернутому» вектору $\mathbf{U}_0\mathbf{s}_0$, т. е. эту систему можно представить в виде L независимых параллельных подканалов. В качестве весовых векторов при формировании этих подканалов используются собственные векторы канальных матриц \mathbf{H}_k . Теперь входным вектором является повернутый вектор $\mathbf{U}_0\mathbf{s}_0$.

В выражение (4) входит корреляционная матрица \mathbf{Q}_{k-1} передаваемых на k -ом этапе символов, которая определяется через корреляционную матрицу символов, передаваемых на предыдущем $(k-1)$ -ом этапе, с помощью рекуррентной формулы [21]:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_k &= \mathbf{U}_0 \Theta_k \mathbf{U}_0^H \\ \Theta_k &= \Theta_{k-1} \Lambda_k^2 \mathbf{P}_k (\Lambda_k^2 \mathbf{P}_k + \Theta_{k-1}^{-1})^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где Θ_k – диагональная матрица с действительными числами. На первом этапе корреляционная матрица Θ_0 является единичной ($\mathbf{Q}_0 = \mathbf{I}$).

Для распределения мощности в j -ый собственный подканал на k -ом этапе передачи ($k = 1, 2, \dots, K+1$) имеем выражение вида [16]:

$$p_{k,j} = \left(\frac{P_0^{(k)} + \sum_{m=1}^L \lambda_{k,m}^{-2}}{\sum_{m=1}^L \sqrt{q_{k-1,m}} \lambda_{k,m}^{-1} \sqrt{q_{k-1,j}} \lambda_{k,j}} - \frac{1}{\lambda_{k,j}^2 q_{k-1,j}} \right)^+, \quad (6)$$

$$(a)^+ = \begin{cases} a, & a \geq 0 \\ 0, & a < 0 \end{cases}$$

где $q_{k-1,j}$ – j -ый элемент матрицы \mathbf{Q}_{k-1} .

Отметим, что при достаточно малой распределяемой мощности, на некотором этапе этой мощности может не хватить на все собственные подканалы [16, 17]. Поэтому итоговое число L подканалов в ММО-системе будет определяться минимальным числом используемых подканалов.

Метод отбора сильных собственных подканалов

Параллельная передача по всем сформированным собственным подканалам в ММО-системе обеспечивает наибольшую скорость. Однако некоторые подканалы могут являться энергетически слабыми, особенно в многолучевом пространственном канале с релеевскими замираниями сигналов и при близком или равном числе передающих и приемных антенн. Это, в свою очередь, дает увеличение вероятности ошибки на бит. Исключая наиболее слабые каналы, можно уменьшить скорость передачи данных и одновременно уменьшить вероятность ошибки в системе.

ОСШ на выходе j -го подканала на k -ом этапе передачи определяется мощностью, распределенной

в этот подканал на основе выражения (6), и соответствующим собственным числом матрицы \mathbf{H}_k коэффициентов передачи и равно $\rho_{k,j} = \frac{p_{k,j} \lambda_{k,j}^2}{\sigma_0^2}$, где σ_0^2 – мощность собственного шума приемных устройств. Для разделения собственных подканалов на сильные и слабые введем в рассмотрение матрицу, зависящую как от мощности передатчика, так и от собственных чисел матрицы \mathbf{H}_k , в виде:

$$\mathbf{H}_k^{(p)} = \begin{cases} \rho_k \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H & (M_k > N_k), \\ \rho_k \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k & (M_k < N_k), \end{cases} \quad \rho_k = \frac{P^{(k)}}{\sigma_0^2}. \quad (7)$$

Пороговый метод [8] определения сильных и слабых собственных подканалов заключается в разделении собственных чисел $\lambda_k^{(p)}$ матрицы $\mathbf{H}_k^{(p)}$ на две группы чисел, больших или меньших порога $\lambda_{tg}^{(p)}$. Этот порог будет зависеть не только от статистических свойств канальной матрицы \mathbf{H}_k , но и от наименьшего ОСШ ρ_{min} , при котором допустимо обслуживание пользователей.

В [8] получено выражение для одномерной функции плотности вероятности $f(\lambda_k^{(p)}, \rho_k)$ не ранжированного по величине собственного числа $\lambda_k^{(p)}$ матрицы $\mathbf{H}_k^{(p)}$. Тогда собственное число $\lambda_k^{(p)}$ будет превышать пороговое значение $\lambda_{tg}^{(p)}$ с вероятностью $1 - b(\lambda_{tg}^{(p)}, \rho_k)$, где $b(\lambda_{tg}^{(p)}, \rho_k)$ – вероятность нахождения этого собственного числа в интервале $0 < \lambda_k^{(p)} < \lambda_{tg}^{(p)}$, которую можно получить, интегрируя функцию $f(\lambda_k^{(p)}, \rho_k)$ по аргументу $\lambda_k^{(p)}$ в этом интервале. Отсюда следует, что собственные подканалы, для которых справедливо условие $\rho_k \lambda_k > \lambda_{tg}^{(p)}$, будут использованы с вероятностью равной:

$$1 - b(\lambda_{tg}^{(p)}, \rho_k) = \frac{R(\rho_k)}{R_{max}}, \quad (8)$$

где $R(\rho_k)$ – скорость передачи для ОСШ равного ρ_k . При этом относительные потери в скорости передачи информации из-за отключения слабых подканалов будут определяться правой частью в формуле (8).

Для минимально допустимого ОСШ ρ_{min} зададим скорость R_{min} передачи данных. Тогда пороговое значение $\lambda_{tg}^{(p)}$ будет зависеть от двух параметров ρ_{min} и R_{min} . На основе решения обратной задачи, порог для разделения собственных подканалов на сильные и слабые найдем из уравнения:

$$p(\lambda_{tg}^{(p)}, \rho_{min}) = 1 - \frac{R_{min}}{R_{max}}. \quad (9)$$

При этом будет обеспечиваться минимальная скорость R_{min} передачи данных при наименьшем ОСШ ρ_{min} . С ростом ОСШ собственные числа матрицы $\mathbf{H}_k^{(p)}$ увеличиваются, а пороговое значение оста-

нется неизменным, так как оно зависит от минимально допустимого ОСШ ρ_{\min} . Следовательно, число сильных собственных подканалов, используемых для передачи данных, также будет увеличиваться. После отбора сильных подканалов необходимо распределить между ними мощность соответствующего передатчика с помощью выражения (6).

Пороговый метод обеспечивает значительное уменьшение вероятности ошибки на бит. Очевидно, что платой за это является уменьшение скорости передачи информации. Однако больший интерес представляет пропускная способность ММО-системы, которая определяется скоростью правильной передачи данных за некоторый интервал времени. В качестве такого интервала можно выбрать длительность символа. Если для передачи данных используется максимальное число L параллельных подканалов, то один пространственный символ будет переносить максимальное число бит данных, равное Lk_bR_c , где k_b – битовая нагрузка символа, зависящая от уровня модуляции; R_c – скорость кодера. Это означает, что скорость передачи в ММО-системе будет наибольшей и равной $R_{\max} = k_bLR_c$ бит на символ. При этом вероятность ошибки на бит может быть достаточно большой и ее уменьшение достигается с помощью отключения энергетически наиболее слабых подканалов на основе порогового метода.

При пакетной передаче информации важным параметром является вероятность ошибки передачи пакета (PER, аббр. от англ. Packet Error Rate). При правильном декодировании всех бит, входящих в пакет, пакет считается переданным верно. Отношение числа ошибочно переданных пакетов к общему числу пакетов дает значение PER. При этом будем иметь, что пропускная способность составит $Th = (1 - \text{PER})Lk_bR_c$ бит на символ.

Величина пакетной ошибки зависит от конкретного вида используемого помехоустойчивого кодера, что не всегда является удобным при анализе пропускной способности. Рассмотрим передачу некодированной информации, а влияние кодера учтем косвенным образом, задавая скорость кодирования R_c и не конкретизируя вид кодера [22]. Пусть скорости R_c соответствует определенная способность кодера к исправлению ошибок, которую учтем, задавая число v ошибочных бит в пакете, которые может исправить кодер. Пакет, состоящий из n бит, будет считаться правильно переданным, если число ошибочных бит не будет превышать v . Такой подход дает возможность получить более общие результаты для пропускной способности.

Если известна вероятность ошибки на бит (BER, аббр. от англ. Bit Error Rate), то для вероятности $\text{PER}^{(0)}$ ошибки передачи некодированного пакета найдем [22], что:

$$\text{PER}^{(0)} = 1 - \sum_{j=0}^v C_n^j \text{BER}^j (1 - \text{BER})^{n-j}. \quad (10)$$

Нормируем пропускную способность на максимальную величину, которая обеспечивается при использовании максимально возможного числа L_{\max} подканалов и безошибочной передаче данных ($\text{PER}^{(0)} = 0$). В представляющем наибольший интерес релейском некоррелированном канале на k -ом этапе передачи можно сформировать число подканалов, которое определяется минимальным числом антенн и составляет $L_k = \min\{M_k, N_k\}$. Поэтому в релейной ММО-системе максимальное число подканалов будет равно $L_{\max} = \min_k\{L_k\}$. Тогда нормированная эффективная пропускная способность будет равна:

$$Th_{\text{norm}}^{(\text{eff})} = \frac{L}{L_{\max}} (1 - \text{PER}^{(0)}). \quad (11)$$

Результаты моделирования

Приведем сравнительные результаты моделирования вероятности ошибки на бит и пропускной способности в двух многоэтапных релейных ММО-системах. В первой из них используется метод отдельной оптимизации совместно с пороговым методом отбора наиболее сильных подканалов (назовем ее система А), во второй – только метод отдельной оптимизации (система В). Будем рассматривать вероятность ошибки на бит (BER) и нормированную эффективную пропускную способность. Предположим, что релейная ММО-система является однородной, то есть случайные комплексные коэффициенты передачи на всех этапах подчиняются одинаковой статистике – реальная и мнимая части являются случайными статистически независимыми и нормально распределенными величинами. При этом их амплитуды имеют релейскую плотность вероятности, а мощности – экспоненциально спадающее распределение со средним значением равным единице. При движении пользователя по соте коэффициенты передачи изменяются. Характерное время такого изменения считаем большим по сравнению со временем передачи пакета данных. Следовательно, канальные матрицы \mathbf{H}_k можно «заморозить» на время передачи пакета (считать постоянными) и изменять при переходе от одного пакета к другому. Однородность ММО-системы подразумевает также: все передатчики имеют одинаковые мощности ($P^{(k)} = P_0$). Гауссовы собственные шумы приемных устройств имеют единичную мощность, модуляция сигналов – квадратурная фазовая.

Число антенн в релейной ММО-системе также будем считать одинаковым на всех этапах передачи и рассмотрим две антенные конфигурации. В первой из них передающие и приемные АР состоят из одинакового числа антенн, равного 4 ($M_k = 4, N_k = 4$). При этом собственные подканалы имеют наибольший разброс усиления. Во второй конфигурации имеется 4-элементная передающая АР и 8-элементная приемная АР ($M_k = 4, N_k = 8$).

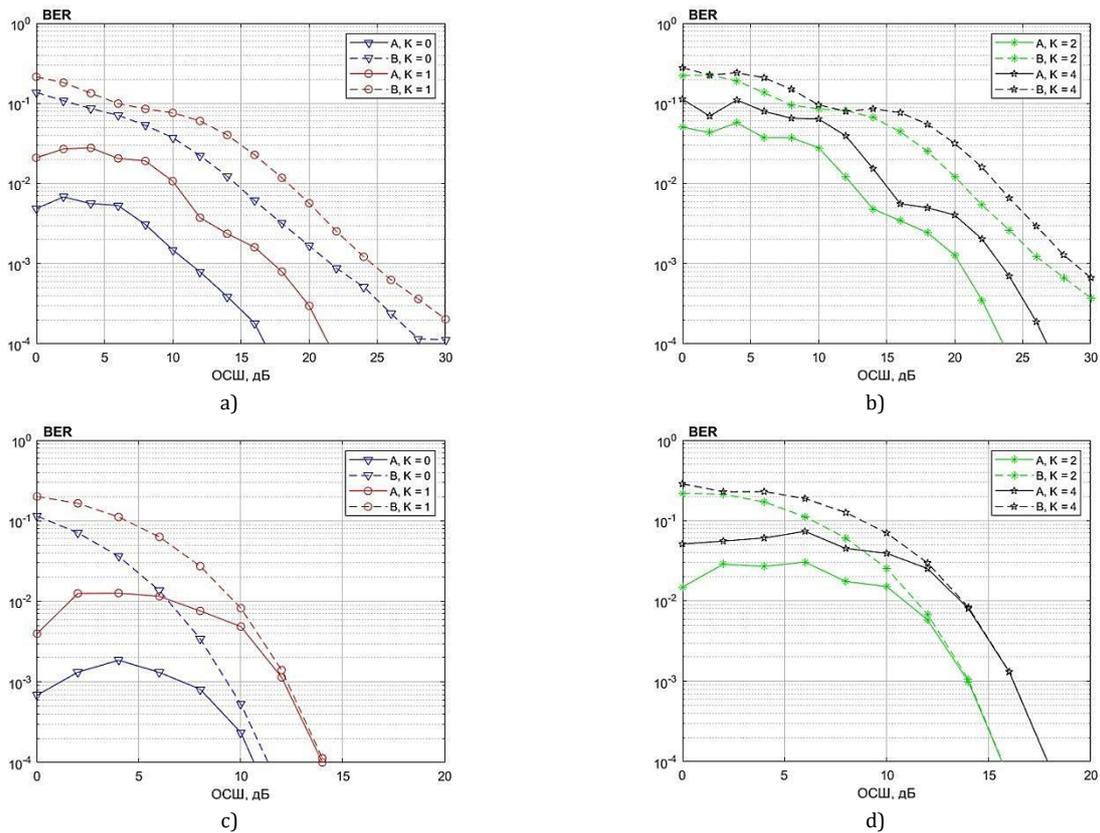


Рис. 2. Вероятность ошибки на бит для систем А и В: а, б) $M_k = 4$ и $N_k = 4$; с, д) $M_k = 4$ и $N_k = 8$
 Fig. 2. BER Performance for System A and B: а, б) $M_k = 4$ & $N_k = 4$; с, д) $M_k = 4$ & $N_k = 8$

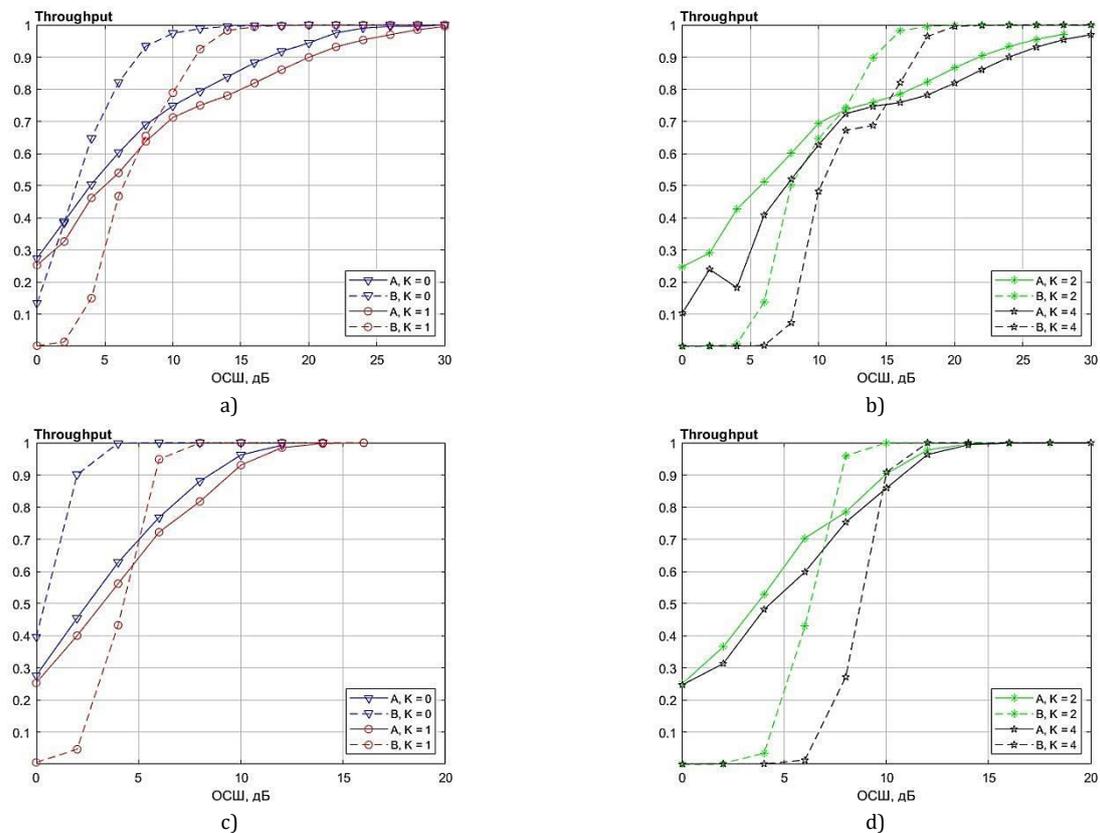


Рис. 3. Пропускная способность для систем А и В: а, б) $M_k = 4$ и $N_k = 4$; с, д) $M_k = 4$ и $N_k = 8$
 Fig. 3. Throughput for System A and B: а, б) $M_k = 4$ & $N_k = 4$; с, д) $M_k = 4$ & $N_k = 8$

В этом случае разброс усиления подканалов становится меньше. Число релейных станций различно и равно $K = 0, 1, 2$ и 4 . Соответствующее число этапов передачи составляет $1, 2, 3$ и 5 . Допустимые потери в скорости передачи из-за отключения слабых подканалов считаем равными $0,75$ при наименьшем ОСШ $\rho_{\min} = 0$ дБ. При моделировании эффективной пропускной способности длина пакета выбивается равной 100 битам и считается, что кодер способен исправить до 10% ошибочных бит.

Вероятности ошибки на бит в зависимости от ОСШ (дБ) для систем А и В с одинаковым числом антенн ($M_k = 4, N_k = 4$) показаны на рисунках 2а и 2б при числе релейных станций $K = 0$ и 1 (слева) и при $K = 2$ и 4 (справа). Соответствующие графики пропускной способности (англ. Throughput) представлены на рисунках 3а и 3б. Аналогичные кривые для систем А и В с разным числом передающих и приемных антенн ($M_k = 4, N_k = 8$) показаны на рисунках 2с и 2д при числе релейных станций $K = 0$ и 1 (слева) и при $K = 2$ и 4 (справа). Соответствующие графики пропускной способности представлены на рисунках 3с и 3д.

Из приведенных результатов моделирования следует, что с увеличением числа релейных станций вероятность ошибки на бит увеличивается, а пропускная способность уменьшается. Такое увеличение вероятности ошибки связано с тем, что на релейных станциях выполняется только линейная обработка сигналов. Поэтому ошибки накапливаются с ростом числа этих станций.

При одинаковом ОСШ в системе А обеспечивается меньшая вероятность ошибки на бит по сравнению с системой В. Зададим уровень вероятности ошибки, равный $0,001$, и найдем требуемые ОСШ. Получим, что для системы А при одинаковом числе передающих и приемных антенн ($M_k = 4, N_k = 4$) ОСШ (дБ) должно составлять: $11,3; 17,3; 20,4; 23,3$ при числе релейных станций $K = 0; 1; 2$ и 4 , соответственно. Для системы В аналогичные значения ОСШ (дБ) значительно больше и равны: $21,6; 24,6; 26,7; 28,8$. Т. е. для такой релейной ММО-системы

энергетический выигрыш в ОСШ (дБ) составляет примерно: $10,3; 7,3; 6,3; 5,5$ при $K = 0; 1; 2$ и 4 , соответственно. При разном числе передающих и приемных антенн ($M_k = 4, N_k = 8$) требуемое ОСШ становится значительно меньше и также уменьшается энергетический выигрыш в ОСШ, который составляет примерно $2,2$ и $0,2$; при $K = 0$ и 1 , соответственно.

Пропускная способность в системе А больше, чем в системе В для обычной ММО-системы. При наличии релейных станций пропускная способность в системе А становится больше, чем в системе В, в области меньших ОСШ. И наоборот, система А обеспечивает меньшую пропускную способность в области меньших ОСШ. Отметим также негладкий характер поведения приведенных кривых для вероятности ошибки и пропускной способности, особенно при одинаковом числе передающих и приемных антенн. Такой эффект связан с добавлением собственных подканалов при увеличении ОСШ.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены многоэтапные релейные ММО-системы сотовой связи с антенными решетками на каждом этапе передачи. Для формирования параллельных независимых собственных подканалов канальные матрицы, которые оцениваются на приемной стороне каждого этапа, сообщаются на его передающую сторону по обратной служебной линии связи. Показано, что вероятность ошибки на бит передаваемой информации может быть минимизирована при одновременном использовании метода раздельной оптимизации каждого этапа передачи и порогового метода отбора энергетически сильных подканалов. Приведенные результаты моделирования для вероятности ошибки и пропускной способности в случае многолучевого канала с релеевскими замираниями сигналов подтверждают высокую эффективность предложенного подхода.

Список используемых источников

1. Björnson E., Hoydis J., Sanguinetti L. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency // Foundations and Trends in Signal Processing. 2017. Vol. 11. Iss. 3-4. PP. 154–655. DOI:10.1561/20000000093
2. Palomar D., Jiang Y. MIMO transceiver design via majorization theory // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. 2007. Vol. 3. Iss. 4-5. PP. 331–551. DOI:10.1561/0100000018
3. Paylraj A., Nabar R., Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 278 p.
4. Jankiraman M. Space-time Codes and MIMO Systems. Norwood: Artech House, 2004. 328 p.
5. Gershman A.B., Sidoropoulos N.D. Space-Time Processing for MIMO Communications. Chichester: Wiley&Sons, 2005. 370 p. DOI:10.1002/0470010045
6. Palomar D.P., Lagunas M.A., Cioffi J.M. Optimum linear joint transmit-receive processing for MIMO channels with QoS constraints // IEEE Transactions on Signal Processing. 2004. Vol. 52. Iss. 5. PP. 1179–1197. DOI:10.1109/TSP.2004.826164
7. Scaglione A., Stoica P., Barbarossa S., Giannakis G.B., Sampath H. Optimal designs for space-time linear precoders and decoders // IEEE Transactions on Signal Processing. 2002. Vol. 50. Iss. 5. PP. 1051–1064. DOI:10.1109/78.995062
8. Ермолаев В.Т., Маврычев Е.А., Флакман А.Г. Уменьшение вероятности битовой ошибки при параллельной передаче информации в ММО-системе // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 3. С. 251–260.

9. Sanguinetti L., D'Amico A.A., Rong Y. A Tutorial on the Optimization of Amplify-and-Forward MIMO Relay Systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2012. Vol. 30. Iss. 8. PP. 1331–1346. DOI:10.1109/JSAC.2012.120904
10. Kramer G., Gastpar M., Gupta P. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks // IEEE Transactions on Information Theory. 2005. Vol. 51. Iss. 9. PP. 3037–3063. DOI:10.1109/TIT.2005.853304
11. Mo R., Chew Y.H. MMSE-based joint source and relay precoding design for amplify-and-forward MIMO relay networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009. Vol. 8. Iss. 9. PP. 4668–4676. DOI:10.1109/TWC.2009.081294
12. Rong Y., Tang X., Hua Y. A Unified Framework for Optimizing Linear Nonregenerative Multicarrier MIMO Relay Communication Systems // IEEE Transactions on Signal Processing. 2009. Vol. 57. Iss. 12. PP. 4837–4851. DOI:10.1109/TSP.2009.2027779
13. Borade S., Zheng L., Gallager R. Amplify-and-Forward in Wireless Relay Networks: Rate, Diversity, and Network Size // IEEE Transactions on Information Theory. 2007. Vol. 53. Iss. 10. PP. 3302–3318. DOI:10.1109/TIT.2007.904774
14. Hasna M.O., Alouini M.S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels // IEEE Transactions on Wireless Communication. 2003. Vol. 2. Iss. 10. PP. 1126–1131. DOI:10.1109/TWC.2003.819030
15. Krikidis I., Thompson J.S., MacLaughlin S., Goertz N. Max-min relay selection for legacy amplify-and-forward systems with interference // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009. Vol. 8. Iss. 6. PP. 3016–3027. DOI:10.1109/TWC.2009.080383
16. Маврычев Е.А., Елохин А.В., Сорокин И.С., Флакман А.Г. Метод раздельной оптимизации многоэтапной релейной ММО-системы // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 241–251.
17. Елохин А.В., Сорокин И.С., Флакман А.Г. Эффективность порогового метода оптимизации вероятности ошибки на бит и пропускной способности в ММО-системе с обратной связью // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 2. DOI:10.30898/1684-1719.2020.2.1
18. Воеводин В.В. Линейная алгебра. М.: Наука, 1980. 400 с.
19. Гантмахер Ф.П. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.
20. Palomar D.P., Cioffi J.M., Lagunas M.A. Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: a unified framework for convex optimization // IEEE Transactions on Signal Processing. 2003. Vol. 51. Iss. 9. PP. 2381–2401. DOI:10.1109/TSP.2003.815393
21. Danilov A.A., Mavrychev E.A. Separate MMSE optimization of multi-hop non-regenerative MIMO relay communication // Proceedings of the 17th International ITG Workshop on Smart Antennas (Stuttgart, Germany, 13–14 March 2013). Berlin: VDE-Verlag, 2013.
22. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Лысяков Д.Н. Увеличение пропускной способности ММО-системы радиосвязи с параллельной передачей данных по собственным подканалам // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия: Радиофизика. 2010. № 3(1). С. 79–86.

* * *

Minimizing the Probability of Bit Error in a Multi-Stage MIMO Relay System

A. Flaksman¹, I. Sorokin¹, A. Kokarev²

¹National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

²Radio Lab NN LLC
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44

Received 5th October 2020

Accepted 27th October 2020

For citation: Flaksman A., Sorokin I., Kokarev A. Minimizing the Probability of Bit Error in a Multi-Stage MIMO Relay System. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):36–44. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-36-44

Abstract: *This research is devoted to the investigation of the relay multi-stage relay MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) of cellular communication with antenna arrays at each stage of transmission, in which parallel independent subchannels for data transmission are formed, are considered. The possibility of minimizing the error probability per bit of transmitted information is investigated while using the method of separate optimization of each transmission stage and the threshold method for selecting energetically strong subchannels. The presented simulation results in the case of a multipath channel with Rayleigh signal fading confirm the high efficiency of the proposed approach.*

Keywords: *MIMO-system, Eigen sub channel, bit error rate, throughput, Rayleigh fading.*

References

1. Björnson E., Hoydis J., Sanguinetti L. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2017;11(3-4):154–655. DOI:10.1561/20000000093
2. Palomar D., Jiang Y. MIMO transceiver design via majorization theory. *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*. 2007;3(4-5):331–551. DOI:10.1561/0100000018
3. Paylraj A., Nubar R., Gore D. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003. 278 p.
4. Jankiraman M. *Space-time Codes and MIMO Systems*. Norwood: Artech House; 2004. 328 p.
5. Gershman A.B., Sidoropoulos N.D. *Space-Time Processing for MIMO Communications*. Chichester: Wiley&Sons; 2005. 370 p. DOI:10.1002/0470010045
6. Palomar D.P., Lagunas M.A., Cioffi J.M. Optimum linear joint transmit-receive processing for MIMO channels with QoS constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2004;52(5):1179–1197. DOI:10.1109/TSP.2004.826164
7. Scaglione A., Stoica P., Barbarossa S., Giannakis G.B., Sampath H. Optimal designs for space-time linear precoders and decoders. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2002;50(5):1051–1064. DOI:10.1109/78.995062
8. Ermolayev V.T., Flaksman A.G., Mavrychev E.A. Reduction of Bit Error Probability During Parallel Transmission of Information in a MIMO System. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003;46(3):224–232. DOI:10.1023/A:1024480520263
9. Sanguinetti L., D'Amico A.A., Rong Y. A Tutorial on the Optimization of Amplify-and-Forward MIMO Relay Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2012;30(8):1331–1346. DOI:10.1109/JSAC.2012.120904
10. Kramer G., Gastpar M., Gupta P. Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2005;51(9):3037–3063. DOI:10.1109/TIT.2005.853304
11. Mo R., Chew Y.H. MMSE-based joint source and relay precoding design for amplify-and-forward MIMO relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2009;8(9):4668–4676. DOI:10.1109/TWC.2009.081294
12. Rong Y., Tang X., Hua Y. A Unified Framework for Optimizing Linear Nonregenerative Multicarrier MIMO Relay Communication Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009;57(12):4837–4851. DOI:10.1109/TSP.2009.2027779
13. Borade S., Zheng L., Gallager R. Amplify-and-Forward in Wireless Relay Networks: Rate, Diversity, and Network Size. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2007;53(10):3302–3318. DOI:10.1109/TIT.2007.904774
14. Hasna M.O., Alouini M.S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communication*. 2003;2(10):1126–1131. DOI:10.1109/TWC.2003.819030
15. Krikidis I., Thompson J.S., MacLaughlin S., Goertz N. Max-min relay selection for legacy amplify-and-forward systems with interference. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2009;8(6):3016–3027. DOI:10.1109/TWC.2009.080383
16. Mavrychev E.A., Elokhin A.V., Sorokin I.S., Flaksman A.G. A Method of Separate Optimization of a Multistage Relay MIMO System. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019;62(3):218–227. DOI:10.1007/s11141-019-09970-1
17. Elokhin A.V., Sorokin I.S., Flaksman A.G. Efficiency of threshold method for optimizing bit error rate and throughput in MIMO system with feedback. *Journal of Radio Electronics*. 2020;2. (in Russ.) DOI:10.30898/1684-1719.2020.2.1
18. Voevodin V.V. *Linear algebra*. Moscow: Nauka Publ; 1980. 400 p. (in Russ.)
19. Gantmacher F.R. *The Theory of Matrices*. Providence: American Mathematical Society; 2000. 660 p.
20. Palomar D.P., Cioffi J.M., Lagunas M.A. Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: a unified framework for convex optimization. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2003;51(9):2381–2401. DOI:10.1109/TSP.2003.815393
21. Danilov A.A., Mavrychev E.A. Separate MMSE optimization of multi-hop non-regenerative MIMO relay communication. *Proceedings of the 17th International ITG Workshop on Smart Antennas, 13–14 March 2013, Stuttgart, Germany*. Berlin: VDE-Verlag; 2013.
22. Ermolaev V.T., Flaksman A.G., Lysyakov D.N. Throughput increase in a MIMO eigen subchannels. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Section: Radiophysics*. 2010;3(1):79–86. (in Russ.)

Сведения об авторах:

ФЛАКСМАН
Александр Григорьевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры статистической радиофизики и мобильной системы связи Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, flak@rf.unn.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6305-2690>

СОРОКИН
Игорь Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры статистической радиофизики и мобильной системы связи Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, igor.s.sorokin@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-1286-8678>

КОКАРЕВ
Александр Олегович

инженер ООО «Радио Лаб НН» (г. Нижний Новгород), al.kokarev@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5772-593X>

Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана

Г.А. Фокин^{1*}, А.Г. Владыко¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.10.2020

Принята к публикации 19.11.2020

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 45–59. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59

Аннотация: Настоящая работа посвящена исследованию математических моделей позиционирования транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана. На основе исследования вероятности наличия прямой видимости в условиях сверхплотного распределения опорных станций радиодоступа и транспортных средств, а также существующих математических моделей-прототипов позиционирования, разработана новая имитационная модель построения траектории транспортного средства для оценки соответствия требованиям по точности оценки координат на примере сценария приоритетного проезда перекрестков. В имитационной модели реализованы процедуры сбора первичных угломерных и дальномерных измерений опорными станциями, полученными от транспортного средства, для последующей вторичной обработки с использованием расширенного фильтра Калмана, в результате чего в реальном времени строится траектория движения транспортного средства. В отличие от существующих моделей-прототипов, разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет производить оценку соответствия заданным требованиям и другим спецификациям в зависимости от текущих условий наличия прямой видимости, а также точности сбора первичных угломерных измерений, определяемых установленной на опорном устройстве антенной решеткой. Результаты имитационного моделирования согласуются с известными оценками моделей-прототипов и подтверждают возможность достижения точности до 1 м для сценария управления дорожным движением при погрешности определения угла прихода сигнала в 2°.

Ключевые слова: позиционирование, сверхплотные сети 5G, vehicle to everything, дальномерные и угломерные измерения, расширенный фильтр Калмана.

1. Введение

Вопросы позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа (СРД) 5G являются актуальным направлением исследований на очередном этапе эволюции при переходе к экосистеме пятого поколения, в которой, помимо инфокоммуникационных услуг, реализуются также и новые услуги геолокации [1, 2].

Значительный вклад в исследование вопросов позиционирования подвижных устройств и транспортных средств в сетях 5G внесла исследовательская группа университета Тампере [3], результаты которой отражены в работах [4–9]. Нарботанный группой опыт по отслеживанию траекторий по-

движных и высокоподвижных устройств, в том числе в сверхплотных сетях радиодоступа 5G с использованием расширенного фильтра Калмана (РФК), представляет определенный интерес для перспективных интеллектуальных транспортных систем с учетом специфики построения и функционирования СРД 5G.

Новой особенностью построения и функционирования СРД 5G применительно к интеллектуальным транспортным системам является повышение плотности *опорных устройств радиодоступа* – RSU (аббр. от англ. Roadside Unit) – дорожной инфраструктуры для интеллектуальных транспортных систем, что, помимо увеличения удельной

пропускной способности на единицу площади, способствует практической реализации технологий высокоточного сетевого позиционирования *пользовательских устройств бортового оборудования транспортных средств* – VUE (аббр. от англ. Vehicular User Equipment). Уплотнение инфраструктуры RSU дает основания полагать, что осведомленность о местоположении транспортных средств VUE станет присущей особенностью СРД V2X/5G, причем решение задачи сетевой геолокации станет возможным, в том числе, в условиях отсутствия приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Следствием сверхплотного территориального и/или пространственного расположения опорных и пользовательских устройств является высокая вероятность наличия прямой видимости – LOS (аббр. от англ. Line of Sight) – между пользовательским VUE и несколькими опорными устройствами RSU. Условия LOS способствуют сбору первичных дальномерных (ДМ) – TOA (аббр. от англ. Time of Arrival) – и угломерных (УМ) – AOA/DOA (аббр. от англ. Angle/Direction of Arrival) – измерений, полученных без переотражений. При этом есть основания ожидать повышенной точности сбора первичных измерений в СРД 5G по сравнению с СРД предыдущих поколений: точность дальномерных измерений TOA может быть выше вследствие более широких используемых полос частот миллиметрового диапазона (mmWave), а точность угломерных измерений AOA может быть увеличена за счет многоэлементных антенных систем *mass ive* – MIMO (аббр. от англ. Multiple Input Multiple Output) [1, 2].

Для сбора первичных измерений в СРД может использоваться как канал «вниз» – DL (аббр. от англ. Downlink) – от опорного к пользовательскому устройству (RSU → VUE), так и канал «вверх» от пользовательского к опорному устройству (VUE → RSU). После сбора первичных измерений выполняется их обработка, в результате которой с использованием некоторого вычислительного алгоритма и знания координат опорных устройств RSU осуществляется вычисление координат пользовательского устройства VUE. В зависимости от того, где производятся вычисления, различают позиционирование с обработкой в пользовательском устройстве и в сети опорных устройств.

Предпочтительным вариантом позиционирования в СРД 5G является обработка в сети опорных устройств; первичные измерения при этом собираются базовыми опорными устройствами радиодоступа RSU в канале UL по транслируемым пользовательскими устройствами VUE сигналам; это могут быть не только выделенные сигналы позиционирования, как PRS (аббр. от англ. Positioning Reference Signals) в сетях LTE (аббр. от англ. Long-Term Evolution), но и другие служебные сигналы, например, для оценки канальной матрицы MIMO;

данный подход позволяет осуществлять определение местоположения в фоновом режиме работы VUE и, таким образом, снижать *энергопотребление* VUE на два порядка по сравнению с ГНСС – GNSS (аббр. от англ. Global Navigation Satellite System) [5].

Одним из направлений исследований высокоточного сетевого позиционирования устройств в СРД 5G является использование подхода, основанного на комплексировании первичных угломерных DOA и дальномерных TOA измерений с последующей их вторичной обработкой РФК – EKF (аббр. от англ. Extended Kalman Filter) [4–9].

Известным препятствием для использования дальномерных измерений в сценариях сетевого позиционирования является необходимость синхронизации передатчика и приемника первичных измерений TOA. Если синхронизация опорных дорожных устройств радиодоступа RSU, являющихся пунктами приема первичных измерений, может быть реализована с определенной погрешностью на практике, то синхронизация опорных RSU и пользовательских бортовых устройств транспортных средств VUE затруднительна, поэтому актуальной является задача позиционирования и совместной синхронизации передатчика первичных измерений (пользовательского устройства VUE) и приемника первичных измерений (опорного устройства RSU).

Для использования ДМ-измерений и предварительной синхронизации опорных устройств RSU, как пунктов приема сигналов TOA, и подвижных пользовательских устройств VUE, как источников сигналов TOA, в работах [4–9] исследуются вопросы совместной синхронизации и позиционирования методом DOA/TOA EKF. Анализ работ [5–7] позволяет сделать вывод о возможности одновременной совместной синхронизации опорных RSU и пользовательских устройств VUE и их позиционирования с использованием всего пары опорных станций RSU, что представляет определенный интерес для позиционирования в сценариях управления дорожным движением. Для подвижных пользовательских устройств целесообразно вместе с оценкой координат вычислять их траектории движения; в работах [5–7] для решения указанной задачи предлагается модель РФК/EKF.

Одним из перспективных приложений отслеживания траекторий подвижных и высокоподвижных устройств интеллектуальных транспортных систем в экосистеме 5G являются системы обмена данными между транспортными средствами, элементами дорожной инфраструктуры и другими участниками движения – V2X (аббр. от англ. Vehicle to Everything Communications), которые должны повысить уровень безопасности для водителей, пассажиров и пешеходов, снизить расход топлива и затраты времени на поездки.

Сети транспортных средств V2X появились как новый тип автомобильной связи, включающий в себя связь: между транспортными средствами – V2V (аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), между транспортными средствами и придорожной инфраструктурой – V2I (аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), между транспортными средствами и пешеходами – V2P (аббр. от англ. Vehicle-to-Pedestrian), между транспортными средствами и сетью – V2N (аббр. от англ. Vehicle-to-Network) и пр. [10]. Определение местоположения транспортных средств в сетях V2X представляет собой сложную задачу из-за широкого диапазона требований, включая высокую точность и надежность, сверхмалую задержку и экономичность [11].

Повышенные требования к точности определения местоположения включают в себя, помимо непосредственно точности оценки координат, оперативность получения, надежность и доступность данных искомого местоположения. Одним из примеров использования определения местоположения в СРД V2X/5G является предотвращение столкновений транспортных средств: каждое транспортное средство должно «знать» свое местоположение и местоположение соседних автомобилей, а также ожидаемые пути их передвижения для предупреждения столкновений. Критически важное значение в данном случае приобретают V2X-приложения для предупреждения о риске столкновения на перекрестке – ICRW (аббр. от англ. Intersection Collision Risk Warning) [12], а также другие V2X-приложения, связанные с необходимостью использования высокоточной навигации, например, такие, как приоритетный проезд перекрестков – TSP (аббр. от англ. Transit Signal Priority) [13] – и взимание платы за проезд транспортных средств – RUC (аббр. от англ. Road-User Charging) [14].

В настоящей работе выполняется оценка соответствия требований к позиционированию VUE в приложениях организации приоритетного проезда перекрестков [15]; TSP-Система реализуется посредством протоколов связи V2X. В общем случае радиосвязь организуется между устройствами VUE на транспортных средствах и устройствами RSU на светофорных контроллерах перекрестков. Связь осуществляется по определенной схеме для предоставления приоритета: транспортные средства отправляют запросы к перекрестку, к которому они приближаются или который они пересекают в соответствии с разработанным алгоритмом. После этого RSU принимает решение о возможности предоставления приоритетного проезда или состоянии перекрестка (информацию о будущем зеленом свете светофора). Принимаемые решения основаны на данных о текущем местоположении транспортных средств с приоритетом. Для реализации данного сценария предъявляются следующие требования к позиционированию VUE:

частота выдачи местоположения не менее 5 Гц; погрешность определения местоположения не хуже 1 м; погрешность определения курса не хуже 1 град.; время готовности к работе не более 30 с; допустимая скорость транспортного средства не хуже 150 км/ч (≈ 42 м/с).

Целью настоящей работы является разработка имитационной модели для верификации требований к точности позиционирования транспортных средств в сетях V2X/5G. Для достижения поставленной цели далее решаются следующие частные задачи. В разделе 2 представлен анализ математической модели позиционирования подвижных устройств с использованием РФК по материалам [5]. В разделе 3 формализована имитационная модель позиционирования транспортных средств с использованием РФК для сценария управления на примере системы приоритетного проезда перекрестков. Раздел 4 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2. Математическая модель позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G

2.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу совместной синхронизации RSU-VUE и оценки координат VUE комплексированием дальномерных (TOA) и угломерных (AOA) первичных измерений путем учета временного рассогласования в расширенном фильтре Калмана EKF по материалам [5]; результирующий алгоритм DOA/TOA EKF должен решать задачу оценки координат VUE и синхронизации с RSU в реальном времени. Будем полагать далее, что каждая опорная станция RSU оборудована антенной решеткой с возможностью определения направления прихода сигнала DOA. Для случая на плоскости обозначим через $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ известные координаты RSU_k , а через $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x[n], y[n])^T$ – вектор истинных координат пользовательского устройства VUE на транспортном средстве в дискретный момент времени n , если $n = 1, \dots, N$, где N – общее количество дискретных моментов времени сбора первичных измерений (число точек в оцениваемой траектории движения VUE). Также допустим, что опорные станции RSU синхронизированы между собой; точность временной синхронизации должна составлять порядка 1–4 нс и не превышать погрешность дальномерных измерений TOA, что соответствует 0,3–1,2 м для высокоточного позиционирования в сверхплотных сетях 5G. Допустим, VUE периодически излучают некоторые сигналы маяка в канале «вверх» UL, которые используются для оценки состояния канала – CSI (аббр. от англ. Channel State Information) – в опорной станции RSU, например, для оценки канальной матрицы MIMO. Получив сигналы маяка от VUE, опорная станция RSU устанавливает признак LOS/NLOS одним из известных способов. В случае приема сигнала в

условиях наличия прямой видимости RSU_k выполняет первичные измерения времени и угла прихода сигнала маяка DOA/TOA. После сбора первичных измерений на всех опорных пунктах осуществляется их вторичная обработка – оценка координат VUE с использованием алгоритма DOA/TOA EKF: $\hat{\mathbf{x}}_{VUE} = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$.

2.2. Модель временного сдвига опорного и подвижного устройств

Формализуем математическую модель рассинхронизации/расстройки (временного сдвига) опорного и подвижного устройств RSU-VUE. Временной сдвиг $\rho[n]$ является переменной по дискретному времени n величиной вследствие нестабильности опорных генераторов устройств VUE; на интервале времени сбора первичных измерений T временной сдвиг в дискретный момент времени n может быть представлен рекурсивным выражением [5]:

$$\rho[n] = \rho[n-1] + \alpha[n]T, \quad (1)$$

где $\alpha[n]$ – фазовый сдвиг (временной набег) между опорным и подвижным устройствами RSU-VUE (фазовый сдвиг синхронизирующих импульсов, или расфазировка синхросигналов, характеризующая скорость изменения временного сдвига). Иногда на интервале времени сбора первичных измерений T фазовый сдвиг принимают постоянным, однако измерения показывают, что он меняется со временем на значительном временном интервале. Для учета временной зависимости временной набег $\alpha[n]$ представляют авторегрессионной моделью – AR (аббр. от англ. Autoregressive Model); AR – модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же ряда. Временной набег $\alpha[n]$ характеризует скорость изменения временного сдвига $\rho[n]$ и определяется рекурсивным выражением [5]:

$$\alpha[n] = \beta\alpha[n-1] + \eta[n], \quad (2)$$

где β – постоянный параметр; $\eta[n] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_η . В имитационной модели параметры рассинхронизации устройств и опорных станций инициализируются следующим образом: начальная расстройка $\rho[0] = 20$ мкс; начальная скорость изменения расстройки $\alpha[0] = 25$ мкс/мкс; СКО $\sigma_\eta = 10$ мкс; интервал времени сбора первичных измерений T вместе со скоростью движения транспортного средства непосредственно влияет на точность позиционирования: для 10 км/ч интервал можно принять равным $T = 0,1$ с; для получения требуемой точности позиционирования высокоподвижных транспортных средств интервал измерений следует уменьшать пропорционально увеличению скорости движения. В [16] показано,

что для моделирования расширенного фильтра Калмана EKF в (2) справедливо допущение $\beta = 1$; из [5–7] также следует, что РФК DOA/TOA EKF оказывается слабо чувствительным к разнице между оценкой $\hat{\beta}$ и самим параметром β . Далее формализуем алгоритм совместной обработки DOA/TOA EKF и затем оценим порядок инициализации фильтра EKF.

2.3. Определение местоположения и временного сдвига с РФК

Фильтр EKF является нелинейным расширением популярного фильтра Калмана, которое итеративно оценивает состояние динамической системы. Рассмотрим итеративные процедуры EKF. Совместной оценке для подвижного объекта в дискретный момент времени n подлежат: координаты VUE $\mathbf{x}_{VUE} = (x[n], y[n])^T$, скорость движения по координатам $\mathbf{v}_{VUE} = (v_x[n], v_y[n])^T$, временной $\rho[n]$ и фазовый $\alpha[n]$ сдвиги. Таким образом, вектор состояния РФК в дискретный момент времени n , при $n = 1, \dots, N$, определяется выражением:

$$\mathbf{s}[n] = (x[n], y[n], v_x[n], v_y[n], \rho[n], \alpha[n])^T, \quad (3)$$

$$n = 1, \dots, N.$$

Вектор состояния на очередном этапе итерации в РФК определяется как [5]:

$$\mathbf{s}[n] = \mathbf{F}\mathbf{s}[n-1] + \mathbf{w}[n], \quad (4)$$

где $\mathbf{w}[n] \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q})$, $\mathbf{Q} = \text{diag}[0, 0, \sigma_v^2, \sigma_v^2, 0, \sigma_\eta^2]$, а матрица процесса, описывающая модель изменения состояния с течением времени, определяется выражением [5]:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & T \cdot \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_2 \\ \mathbf{0}_2 & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_2 \\ \mathbf{0}_2 & \mathbf{0}_2 & \mathbf{F}_c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где составные матрицы размерности $\mathbb{R}^{2 \times 2}$ определяются выражениями:

$$\mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{0}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & \beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вектор состояния РФК $\mathbf{s}[n]$ в дискретный момент времени n состоит из двух составляющих. С одной стороны, есть составляющая, характеризующая оценку траектории по координатам и скорости движения. С другой стороны, есть составляющая, характеризующая рассинхронизацию устройств VUE и опорных станций RSU параметрами временного $\rho[n]$ (1) и фазового сдвига $\alpha[n]$ (2).

Формализуем процедуру сбора первичных измерений для РФК согласно [5]. Обозначим через $L[n]$ число опорных станций RSU в дискретный момент времени n , находящихся в условиях прямой видимости с пользовательским устройством VUE, тогда множество $l = \{l_1, l_2, \dots, l_{L[n]}\}$ содержит индексы этих опорных LOS-станций RSU в дискретный момент времени n . На каждой опорной станции RSU_k $k \in l$

выражение для процедуры сбора первичных измерений DOA $y_{\varphi_k}[n]$ содержит угол прихода сигнала $\varphi_k[n]$; выражение для процедуры сбора первичных измерений TOA $y_{\tau_k}[n]$ содержит время прихода сигнала TOA $\tau_k[n]$:

$$y_{\varphi_k}[n] = \varphi_k[n] + \delta\varphi_k[n], \quad (7)$$

$$y_{\tau_k}[n] = \tau_k[n] + \delta\tau_k[n], \quad (8)$$

где $\delta\varphi_k[n] \sim N(0, \sigma_{\text{DOA}}^2)$ и $\delta\tau_k[n] \sim N(0, \sigma_{\text{DOA}}^2)$ – ошибки первичных УМ и ДМ-измерений, соответственно; $\sigma_{\text{DOA}} = 50$ нс – СКО первичных ДМ-измерений; $\sigma_{\text{DOA}} = 2$ – СКО первичных УМ-измерений. Вектор первичных измерений \mathbf{y}_k равен:

$$\mathbf{y}_k[n] = (y_{\varphi_k}[n], y_{\tau_k}[n])^T = \mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n]) + \mathbf{u}[n], \quad (9)$$

где вектор ошибок измерений определяется выражением:

$$\mathbf{u}_k = [\delta\varphi_k, \delta\tau_k]^T, \quad (10)$$

и имеет ковариационную матрицу:

$$\mathbf{R}_k = E[\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_k^T]^T, \quad (11)$$

а векторная функция $\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n])$ определяется выражением:

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n]) = [h_{k,1}(\mathbf{s}[n]), h_{k,2}(\mathbf{s}[n])]^T. \quad (12)$$

Векторная функция $\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n])$ преобразует размерность $\mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^2$ вектора состояния $\mathbf{s}[n]$ РФК в дискретный момент времени n и связывает вектор измерений \mathbf{y}_k с состоянием устройства VUE нелинейными соотношениями:

$$h_{k,1}(\mathbf{s}[n]) = \tan^{-1}(\Delta y_k[n]/\Delta x_k[n]), \quad (13)$$

$$h_{k,2}(\mathbf{s}[n]) = d_k[n]/c + \rho[n], \quad (14)$$

$$\Delta x_k[n] = x[n] - x_k; \quad \Delta y_k[n] = y[n] - y_k, \quad (15)$$

$$d_k[n] = \sqrt{\Delta^2 x_k[n] + \Delta^2 y_k[n]}, \quad (16)$$

где c – скорость света; $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x[n], y[n])^T$ – вектор истинных координат устройства VUE в дискретный момент времени n ; вектор координат стационарной опорной станции RSU_k $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$; $d_k[n]$ – расстояние между VUE и опорной станцией RSU_k в дискретный момент времени n (рисунок 1).

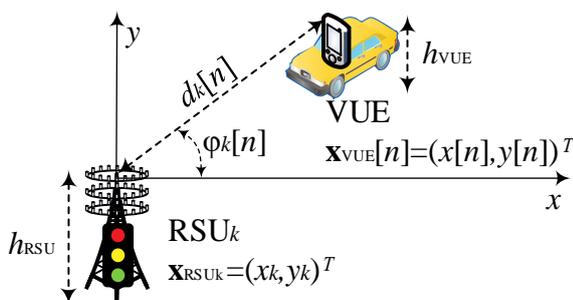


Рис. 1. Вычисление параметров угла и расстояния между RSU_k и VUE

Fig. 1. Calculating the Angle and Distance Between RSU_k and VUE

Таким образом, полное выражение сбора первичных измерений \mathbf{y}_k в дискретный момент времени n от всех $L[n]$ RSU , находящихся в условиях прямой видимости, можно записать как вектор размера $\mathbb{R}^{L[n] \times 1}$:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{h}(\mathbf{s}[n]) + \mathbf{u}[n], \quad (17)$$

где

$$\mathbf{y}[n] = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_{L[n]}^T]^T; \quad (18)$$

$$\mathbf{h} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_{L[n]}^T]^T. \quad (19)$$

Вектор ошибок $\mathbf{u} \sim N(0, \mathbf{R})$ имеет нормальное распределение с диагональной матрицей ковариаций размера $\mathbb{R}^{L[n] \times L[n]}$:

$$\mathbf{R} = \text{blkdiag}(\mathbf{R}_{l_1}, \mathbf{R}_{l_2}, \dots, \mathbf{R}_{l_{L[n]}}). \quad (20)$$

Формализуем процедуру вторичной обработки первичных измерений в РФК. Обозначим через $\mathbf{s}^- [n]$ априорную оценку состояния, т.е. оценку, полученную по измерениям $y_{\varphi_k}[n]$ и $y_{\tau_k}[n]$ до момента дискретного времени n , и не включающую измерения $\mathbf{y}[n]$; обозначим через $\mathbf{s}^+ [n]$ апостериорную оценку состояния, т.е. оценку, полученную по измерениям, включая измерения $\mathbf{y}[n]$. Используя введенные обозначения, можно записать априорную оценку состояния и соответствующую матрицу ковариации в дискретный момент времени n :

$$\hat{\mathbf{s}}^- [n] = \mathbf{F}\hat{\mathbf{s}}^+ [n-1]; \quad (21)$$

$$\mathbf{P}^- [n] = \mathbf{F}\mathbf{P}^+ [n-1]\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}[n]. \quad (22)$$

Апостериорная оценка состояния и соответствующая матрица ковариации в дискретный момент времени n определяются выражениями:

$$\mathbf{K}[n] = \mathbf{P}^- [n]\mathbf{H}^T [n](\mathbf{H}[n]\mathbf{P}^- [n]\mathbf{H}^T [n] + \mathbf{R}[n])^{-1}; \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{s}}^+ [n] = \hat{\mathbf{s}}^- [n] + \mathbf{K}[n](\mathbf{y}[n] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^- [n])); \quad (24)$$

$$\mathbf{P}^+ [n] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[n]\mathbf{H}[n])\mathbf{P}^- [n]. \quad (25)$$

В выражениях (23) и (25) используется матрица Якоби $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}[n]/\partial \mathbf{s}[n]$, вычисленная в состоянии $\mathbf{s}[n]$. Частные производные для алгоритма DOA/TOA EKF выражений (13) и (14) по двум координатам x и y с учетом выражений (15) и (16) дадут следующие элементы матрицы \mathbf{H} при $k = 1, \dots, L[n]$:

$$\mathbf{H}_{2k-1,1}[n] = [\mathbf{h}_{k,1}]_{\partial x}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = -\frac{\Delta y_k[n]}{d_k^2[n]}, \quad (26)$$

$$\mathbf{H}_{2k-1,2}[n] = [\mathbf{h}_{k,1}]_{\partial y}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta x_k[n]}{d_k^2[n]}, \quad (27)$$

$$\mathbf{H}_{2k,1}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial x}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta x_k[n]}{cd_k[n]}, \quad (28)$$

$$\mathbf{H}_{2k,2}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial y}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta y_k[n]}{cd_k[n]}, \quad (30)$$

$$\mathbf{H}_{2k,5}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial \rho}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = 1. \quad (31)$$

Оценка координат $\hat{\mathbf{x}}_{VUE} = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ в момент дискретного времени n определяется первыми двумя элементами вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{\mathbf{s}}_1^+[n], \hat{\mathbf{s}}_2^+[n])^T = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$; ковариационная матрица оценки координат образована верхней левой подматрицей размера $\mathbb{R}^{2 \times 2}$ матрицы $\mathbf{P}^+[n]$ в (25) оценка скорости $\hat{\mathbf{v}}_{VUE} = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])$ определяется вторыми двумя элементами вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_{34}^+[n] = (\hat{\mathbf{s}}_3^+[n], \hat{\mathbf{s}}_4^+[n])^T = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])^T$; оценка временного сдвига $\hat{\rho}[n]$ содержится в $\hat{\mathbf{s}}_5^+[n] = \hat{\rho}[n]$; оценка временного набега $\hat{\alpha}[n]$ содержится в $\hat{\mathbf{s}}_6^+[n] = \hat{\alpha}[n]$.

Инициализация РФК включает выбор вектора оценки начального состояния $\hat{\mathbf{S}}^+[0]$, начальной матрицы ковариации $\mathbf{P}^+[0]$ и является важной составляющей эффективной работы EKF [5]. В пессимистическом сценарии неудачный выбор $\hat{\mathbf{S}}^+[0]$ приведет к отсутствию сходимости РФК. В сверхплотных СРД 5G расхождение полученной оценки координат можно легко проверить, сопоставив ее с известными координатами ближайшей опорной станции RSU, которая осуществляет сбор первичных измерений от VUE, находясь в условиях LOS. Инициализировать вектор начальной оценки координат можно по принципу соседства к ближайшей опорной станции RSU с погрешностью расстояния LOS; инициализировать вектор скорости можно по предполагаемому сценарию позиционирования (транспортное средство со скоростью пешехода, транспортное средство, высокоподвижное транспортное средство). Временной сдвиг между RSU и VUE ограничен временем распространения сигнала от RSU на расстояние LOS, которое можно уточнить по временной метке момента отправления сигнала RSU; приняв этот сигнал, VUE корректирует свое время. Таким образом, временной сдвиг между RSU и VUE определяется задержкой передачи, приема и распространения сигнала между RSU и VUE [5]. Обычно производители указывают фазовый сдвиг генераторов устройств в единицах миллионной доли ppm (миллионная доля – единица измерения каких-либо относительных величин, равная $1 \cdot 10^{-6}$ от базового показателя). Так, значение 20 ppm для генератора означает, что временной сдвиг составит ± 20 мкс за 1 с работы; практика показывает, что чаще наблюдается положительный сдвиг. В [5] в качестве оценки для инициализации временного набега используется значение $\hat{\alpha}[0] = 25$ ppm с СКО $\sigma_\eta = 10$ ppm.

2.4. Анализ позиционирования по сценарию METIS Madrid

Проанализируем результаты оценки траектории алгоритмом DOA/TOA EKF [5] по сценарию городской застройки типа METIS Madrid [17] (рисунок 2). В двумерной модели сценария (см. рисунок 2а) здание в городе моделируется на плоскости квадратным блоком размера 120 м; всего на карте имита-

ционной модели представлено 16 зданий; ширина дороги принимается равной 12 м; опорные станции RSU установлены через каждые 60 м.

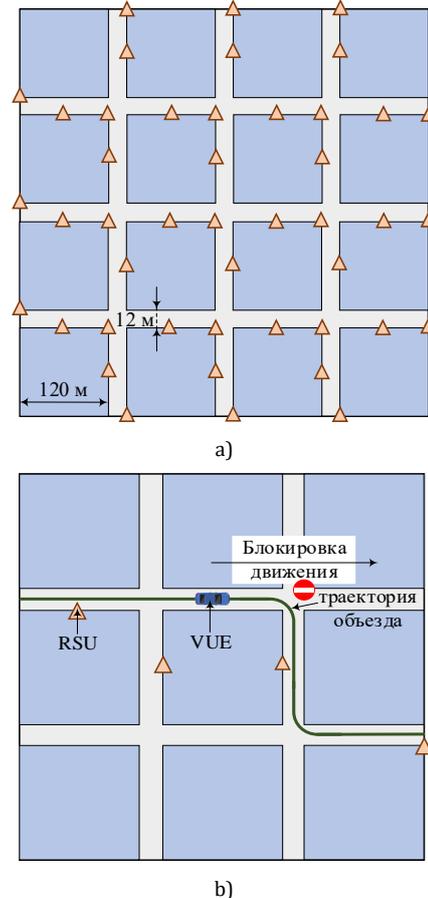


Рис. 2. Сценарий имитационного моделирования METIS Madrid в условиях LOS с VUE: а) несколько RSU; б) один RSU

Fig. 2. METIS Madrid Simulation Scenario в условиях LOS с VUE: а) several RSU; б) single RSU

По сценарию имитационной модели устройство VUE начинает движение по дороге в направлении от одного из углов здания (север, юг, запад, восток); на перекрестке маршрут VUE выбирается случайным образом, исключая то направление, откуда устройство начинало свое движение; маршрут заканчивается после 6 перекрестков, или при достижении подвижным устройством границы карты имитационной модели.

Для удобства моделирования предполагается, что VUE перемещается по середине дороги и движется с постоянной скоростью:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 15 \text{ км/ч.} \tag{31}$$

Для каждого нового устройства VUE в начале его движения инициализируется случайное начальное значение временного и фазового сдвигов: временной сдвиг имеет нормальное распределение $\rho[0] \sim N(0, \sigma_{\rho,0}^2)$ с параметром СКО $\sigma_{\rho,0} = 100$ мкс; временной набег также имеет нормальное распре-

деление $\alpha[0] \sim N(\mu_{\alpha,0}, \sigma_{\alpha,0}^2)$ с параметрами математического ожидания $\mu_{\alpha,0} = 25$ ppm и СКО $\sigma_{\alpha,0} = 30$ ppm. По материалам [16] значение параметра СКО шума фазового сдвига $\eta[n] \sim N(0, \sigma_{\eta}^2)$ в (2), имеющего нормальное распределение, можно принять равным $\sigma_{\eta} = 6,3 \cdot 10^{-8}$. Для каждого нового подвижного устройства VUE инициализируется совместный алгоритм DOA/TOA EKF.

В [5] сделано допущение о том, что начальная оценка $\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}[0] = (\hat{x}[0], \hat{y}[0])^T$ истинного местоположения VUE $\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0] = (x[0], y[0])^T$ получается извне, например, с использованием ГНСС; при этом начальная оценка имеет нормальное распределение $\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}[0] \sim N(\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0], \sigma_{xy,0}^2 \mathbf{I}_2)$, с математическим ожиданием $\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0]$ и СКО $\sigma_{xy,0} = 5$ м. Таким образом, вектор состояния и ковариационная матрица инициализируются следующим образом:

$$\hat{\mathbf{s}}^+[0] = (\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}^T[0], 0, 0, 0, \mu_{\alpha,0})^T, \quad (32)$$

$$\mathbf{P}^+[0] = \text{diag}(\sigma_{xy,0}^2, \sigma_{xy,0}^2, \sigma_{v,0}^2, \sigma_{v,0}^2, \sigma_{\rho,0}^2, \sigma_{\alpha,0}^2), \quad (33)$$

где СКО оценки скорости $\sigma_{v,0} = 5$ м/с. Состояния фильтра EKF обновляются каждый интервал $T = N_T T_f$, где $T_f = 167,3$ мкс – длительность кадра и N_T – некоторое постоянное целое число [5]. В каждый момент дискретного времени n предполагается, что VUE передает сигналы двум ближайшим RSU, находящимся в условиях прямой видимости. Опорные станции RSU осуществляют сбор первичных угломерных DOA и дальномерных TOA измерений согласно (17). При этом составная матрица \mathbf{R}_{l_i} ковариационной матрицы \mathbf{R} (20) становится нижней границей Крамера – Рао, полученной для кратчайших расстояний между ближайшей RSU с индексом l_i и подвижным устройством VUE. Настраиваемыми параметрами EKF являются СКО шума движения $\sigma_v = 0,1$ м/с и $\sigma_{\eta}^2 = 10^{-4}$; последнее значение значительно превышает фактические, однако способствует лучшей сходимости EKF, так как при выборе значительно меньшего σ_{η}^2 весьма вероятно расхождение алгоритма DOA/TOA EKF вследствие высоких погрешностей оценки временного и фазового сдвига (временного набега), который имеет место, например, при инициализации.

Имитационная модель алгоритма DOA/TOA EKF в [5] показала точность позиционирования по метрике RMSE (аббр. от англ. Root-Mean-Square Error) до 1 м; 0,4 м; 0,6 м; и 1,0 м для параметра N_T , равного 100, 500 и 1000, соответственно; результаты получены по усреднению 10^3 различных маршрутов движения VUE, в каждом из которых моделировались свои погрешности первичных измерений DOA/TOA. Для учета эффекта итеративной сходимости РФК, первые 20 оценок координат исключались при подсчете итоговой ошибки позиционирования RMSE вследствие значительно более высокой погрешности при первоначальной настройке фильтра. Оценка СКО времен-

ного сдвига составила 4 нс, что значительно меньше СКО начальной оценки в 100 мкс; рост ошибки с числом N_T говорит об известном эффекте накопления/размножения ошибки. Таким образом, прием и обработка первичных измерений по алгоритму DOA/TOA EKF от двух опорных станций RSU, находящихся в условиях прямой видимости VUE, позволяет достигнуть точности RMSE до 1 м и синхронизации в единицы нс, что удовлетворяет требованиям к сценариям позиционирования в СРД 5G и представляет несомненный интерес для приложений интеллектуальных транспортных систем в задачах управления дорожным движением для сценариев V2X/5G. Преимущество алгоритма совместной обработки УМ и ДМ-измерений заключается в следующем. Для алгоритма DOA наблюдается резкое снижение точности при таких конфигурациях территориального распределения, когда две RSU и VUE оказываются выстроенными в линию, и объясняется недостаточностью исключительно УМ-измерений. Комплексование угломерных и дальномерных измерений DOA/TOA EKF позволяет преодолеть этот недостаток DOA и применимо для решетчатой топологии территориального распределения опорных устройств RSU, в качестве которых могут выступать светофоры на перекрестках. В [5] представлено также исследование пессимистического сценария (см. рисунок 2б), когда в результате движения VUE оказывается в условиях прямой видимости только с одной опорной станцией RSU: алгоритм DOA/TOA EKF показал точность позиционирования с RMSE порядка 3 м с рассинхронизацией в 10,3 нс для параметра $N_T = 100$.

Результаты анализа прототипа имитационной модели по сценарию городской застройки типа METIS Madrid позволяют корректно инициализировать параметры разрабатываемой модели; сам сценарий является достаточно распространенным для оценки точности позиционирования в сверхплотных СРД 5G и будет далее реализован в имитационной модели для проверки соответствия требованиям по точности координат на примере сценария приоритетного проезда перекрестков.

3. Имитационная модель позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G

3.1. Описание работы имитационной модели

Для учета влияния погрешностей первичных измерений на оценку траектории движения VUE в настоящей работе реализован трехмерный сценарий территориального распределения RSU в сети V2X/5G, оборудованных планарной антенной решеткой; пример сценария в 3D и 2D для планарной решетки из 64 элементов с возможностью определения направления прихода сигнала с точностью до 2° , реализованной в Phased Array Toolbox [18], показан на рисунке 3.

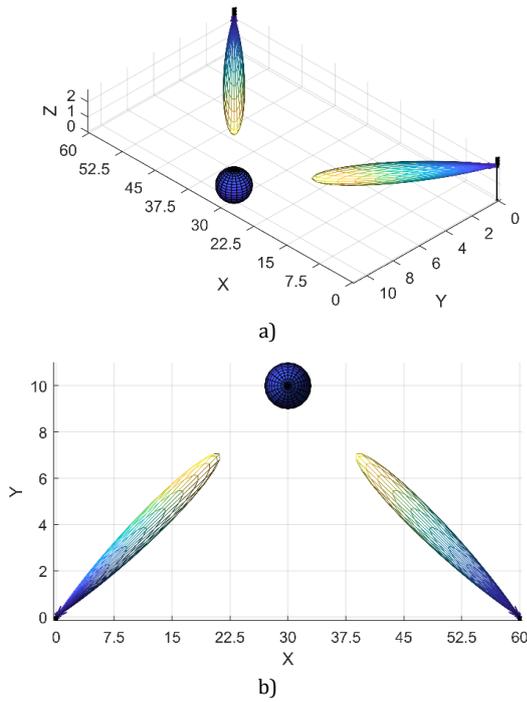


Рис. 3. Трехмерный сценарий имитационной модели с двумя RSU, оборудованными прямоугольной антенной решеткой из 64 элементов

Fig. 3. 3D Simulation Scenario with Two RSUs, Equipped with a Rectangular Antenna Array of 64 Elements

Имитационная модель предназначена для анализа работы РФК, использующего ДМ и УМ-измерения в сети V2X/5G. Измерения собираются опорными стационарными устройствами радиодоступа RSU, местоположение которых известно. Траектория подвижного устройства VUE на транспортном средстве определяется массивом точек траектории, периодом измерений T (с) и скоростью движения v (м/с). Помимо двумерных координат и скоростей VUE алгоритм РФК оценивает временную расстройку/сдвиг $\rho[n]$ между RSU и VUE, а также скорость изменения этой расстройки $\alpha[n]$.

В имитационной модели шум измерений принимается гауссовым, а точность первичных измерений задается СКО в единицах измеряемой величины и для дальности составляет 50 нс, для угла 2 градуса. В имитационной модели предполагается, что первичные измерения доступны и РФК обрабатывает их для каждой точки траектории движения VUE. Ошибка вычисляется как среднее значение евклидова расстояния между истинными координатами текущего местоположения VUE $\mathbf{x}_{VUE} = (x[n], y[n])^T$ и их оценкой $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ в n -ый момент времени:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{(x[n] - \hat{x}[n])^2 + (y[n] - \hat{y}[n])^2}, \quad (34)$$

где $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ – n -ая оценка координат VUE; $n = 1, \dots, N$; N – общее количество оценок по траектории движения устройства VUE.

Алгоритм РФК позволяет оценить вектор состояния динамической системы (3), используя модель изменения состояния динамической системы (4) и ряд измерений (7, 8), косвенно описывающих ее состояние. Далее уточним математическую модель DOA/TOA EKF для двух опорных пунктов приема первичных измерений RSU.

Алгоритм работы РФК можно описать в 2 этапа:

1) этап получения априорной оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}^-[n]$ (21) для момента дискретного времени n и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния $\mathbf{P}^-[n]$ (22) для шага n на основе данных с предыдущего шага $n - 1$;

2) этап обновления, на котором формируется апостериорная оценка $\hat{\mathbf{s}}^+[n]$ (24) и ковариационная матрица ошибок оценки состояния $\mathbf{P}^+[n]$ (25) с учетом новых измерений $\mathbf{y}[n]$ (17).

Априорная оценка описывается уравнениями (21) и (22), где $\hat{\mathbf{s}}^-[n]$ и $\mathbf{P}^-[n]$ – априорные оценки вектора состояния и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния в момент дискретного времени n ; $\hat{\mathbf{s}}^+[n - 1]$ и $\mathbf{P}^+[n - 1]$ – апостериорные оценки в предыдущий момент дискретного времени $n - 1$; либо значения $\hat{\mathbf{s}}^+[0]$ и $\mathbf{P}^+[0]$ в начальный момент времени $n = 0$. Оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n], \hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n], \hat{\rho}[n], \hat{\alpha}[n])^T$ для момента дискретного времени n содержит оценку координат VUE $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$, оценку скорости $\hat{\mathbf{s}}_{34}^+[n] = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])^T$ по x и y ; и параметры рассинхронизации RSU-VUE: оценку расстройки временного сдвига $\hat{\mathbf{s}}_5^+[n] = \hat{\rho}[n]$, выраженную в м; оценку скорости изменения расстройки $\hat{\mathbf{s}}_6^+[n] = \hat{\alpha}[n]$ в м/с; \mathbf{F} – матрица процесса из (5), описывающая модель изменения состояния системы с течением времени:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где T – период измерений. Подстановка выражений (6) в формулу (5) приводит к выражению (35).

Ковариационная матрица ошибок принятой модели изменения состояния $\mathbf{Q} = \mathbf{G}\mathbf{G}^T\sigma_s^2$ зависит от матрицы управления \mathbf{G} и определяет погрешность, вносимую в оценку состояния на этапе предсказания; σ_s – параметр задающий неточность модели заложенной в РФК. Если допустить, что между $(n-1)$ -ым и n -ым интервалами VUE движется с постоянным ускорением, распределенным по нормальному закону, матрица \mathbf{G} определяется как:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Этап обновления описывается уравнениями (23–25), где $\mathbf{K}[n]$ – матрица усиления РФК; $\hat{\mathbf{s}}^+[n]$; $\mathbf{P}^+[n]$ – новые апостериорные оценки вектора состояния и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния соответственно; \mathbf{I} – единичная матрица. Вектор обновления ($\mathbf{y}[n] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^-[n])$) в момент дискретного времени n для $k = 1, 2$ выражается как:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^-) &= \begin{bmatrix} y_{k,2} - h_{k,2}(\mathbf{s}) \\ y_{k,1} - h_{k,1}(\mathbf{s}) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \hat{d}_k - (d_k + c\rho) \\ \hat{\varphi}_k - \tan^{-1}(\Delta y_k / \Delta x_k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (37)$$

где $y_{k,2} = \hat{d}_k$ – оценка расстояния от RSU $_k$ с координатами $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ до VUE с априорной оценкой координат устройства $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-) = (\hat{x}, \hat{y})$:

$$\hat{d}_k = \sqrt{(\hat{\mathbf{s}}_1^- - x_k)^2 + (\hat{\mathbf{s}}_2^- - y_k)^2} + c\hat{\mathbf{s}}_5^-, \quad (38)$$

где $y_{k,1} = \hat{\varphi}_k$ – оценка угла прихода сигнала на RSU $_k$ с координатами $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ от VUE с априорной оценкой координат $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-) = (\hat{x}, \hat{y})$:

$$\hat{\varphi}_k = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\mathbf{s}}_2^- - y_k}{\hat{\mathbf{s}}_1^- - x_k} \right). \quad (39)$$

Ковариационная матрица ошибок измерений \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_d^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

где σ_φ – СКО измерений угла прихода; σ_t – СКО измерений времени прихода.

Функция, связывающая измеренные расстояния с положением VUE, является, согласно (15) и (16), нелинейной функцией положения VUE:

$$\begin{aligned} d_k &= \|\mathbf{x}_{\text{VUE}} - \mathbf{x}_{\text{RSU}_k}\| = \\ &= \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} + \Delta, \quad k = 1, 2, \end{aligned} \quad (41)$$

где d_k – дальность от VUE до k -й RSU; $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x, y)^T$ – координаты VUE; $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ – вектор координат стационарной опорной станции RSU $_k$; $\Delta = c\rho$ – временной сдвиг между RSU и VUE (в метрах).

Функция, связывающая измеренные углы прихода с положением VUE, является, согласно (13) и (15), нелинейной функцией положения VUE:

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_k}{x - x_k} \right). \quad (42)$$

Матрица наблюдений \mathbf{H} , для построения которой используются оценки величин d и φ , полученные из априорной оценки $\hat{\mathbf{s}}^-$, т. е. величины \hat{d}_k и $\hat{\varphi}_k$, представляет собой матрицу частных производных $\frac{\partial \mathbf{h}[n]}{\partial \mathbf{s}[n]}$, вычисленную по элементам вектора состояний $\hat{\mathbf{s}}^-$ (26–30) и, с учетом (41) и (42) для двух RSU определяется выражением:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial x} & \frac{\partial d_1}{\partial y} & \frac{\partial d_1}{\partial v_x} & \frac{\partial d_1}{\partial v_y} & \frac{\partial d_1}{\partial \Delta} & \frac{\partial d_1}{\partial \delta} \\ \frac{\partial d_2}{\partial x} & \frac{\partial d_2}{\partial y} & \frac{\partial d_2}{\partial v_x} & \frac{\partial d_2}{\partial v_y} & \frac{\partial d_2}{\partial \Delta} & \frac{\partial d_2}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial v_x} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial v_y} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \Delta} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial v_x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial v_y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \Delta} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \delta} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

В имитационной модели матрица \mathbf{H} имеет вид:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (x - x_1)/r_1 & (y - y_1)/r_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ (x - x_2)/r_2 & (y - y_2)/r_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -(y - y_1)/r_1^2 & (x - x_1)/r_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(y - y_2)/r_2^2 & (x - x_2)/r_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (44)$$

где $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ – вектор координат стационарной опорной станции RSU $_k$; (x, y) – координаты VUE из вектора $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-)$.

Этапы 1 и 2 алгоритма РФК повторяются циклично по мере поступления новых измерений, обновляя вектор состояния и ковариационную матрицу ошибок оценки состояния системы.

3.2. Оценка условий прямой видимости в сверхплотных СРД 5G

Оценка условий прямой видимости в сверхплотных СРД 5G приводится для обоснования возможности сбора первичных УМ и ДМ-измерений в условиях LOS при сверхплотном территориальном распределении RSU и VUE на основе рекомендаций ITU [19, 20] в сценариях городской застройки типа METIS Madrid; полученное значение расстояния прямой видимости используется затем в имитационной модели для учета числа текущих опорных приемных устройств, находящихся в условиях LOS, и позволяет оценивать точность позиционирования транспортного средства при смене направления движения на перекрестках.

В соответствии с рекомендацией ITU-R M.2083-0 [19] сценарии использования сетей 5G классифицированы МСЭ на 3 группы:

- усовершенствованная подвижная широкополосная связь – eMBB (*аббр. от англ. Enhanced Mobile Broadband*);
- крупномасштабные системы межмашинной связи – mMTC (*аббр. от англ. massive Machine Type Communications*);
- сверхнадежная передача данных с малой задержкой – URLLC (*аббр. от англ. Ultra-Reliable and Low Latency Communications*).

В соответствии с рекомендацией ITU-R M.2412-0 [20] для оценки показателей функционирования СРД 5G с точки зрения условий распространения радиоволн и типа услуг eMBB/mMTC/URLLC различают следующие сценарии:

- *Indoor hotspot-eMBB*: внутри помещений для стационарных и малоподвижных устройств (пешеходы) с очень высокой их плотностью;
- *Dense Urban-eMBB*: город для малоподвижных (пешеходы) и подвижных (транспорт) устройств с высокой их плотностью;
- *Rural-eMBB*: село с большими зонами обслуживания для малоподвижных (пешеходы), подвижных (транспорт) и высокоподвижных устройств;
- *Urban Macro-mMTC*: город с большими зонами обслуживания большого числа устройств межмашинной связи;
- *Urban Macro-URLLC*: город с большими зонами обслуживания устройств URLLC.

В соответствии с перечисленными сценариями ITU-R M.2412-0 [20] содержит следующие типы моделей распространения радиоволн для СРД 5G: InH (аббр. от англ. Indoor Hotspot), UMa (аббр. от англ. Urban Macro), UMi (аббр. от англ. Urban Micro) и RMa (аббр. от англ. Rural Macro); оценка вероятности наличия прямой видимости осуществляется по формулам в таблице 1 с учетом расстояния между RSU и VUE на плоскости d_{2D} . Оценка расстояния в пространстве с учетом высот подвеса определяется как:

$$d_{3d} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_{RSU} - h_{VUE})^2}, \quad (46)$$

где h_{RSU} – высота подвеса антенной решетки опорной станции RSU; h_{VUE} – высота подвеса антенны пользовательского устройства VUE на транспортном средстве.

Зависимость вероятности прямой видимости от расстояния между опорным и пользовательским устройствами для сценария V2X/5G согласно формулам в таблице 1 для транспортных средств с высотой $h_{VUE} < 13$ м представлена на рисунке 4. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что при расстоянии d_{LOS} до 30 м вероятность пря-

мой видимости между RSU и VUE составляет более 80 % для всех сценариев снаружи помещений и, таким образом, дает основания для надежного сбора и обработки первичных УМ и ДМ-измерений в сверхплотных СРД для сценариев V2X/5G.

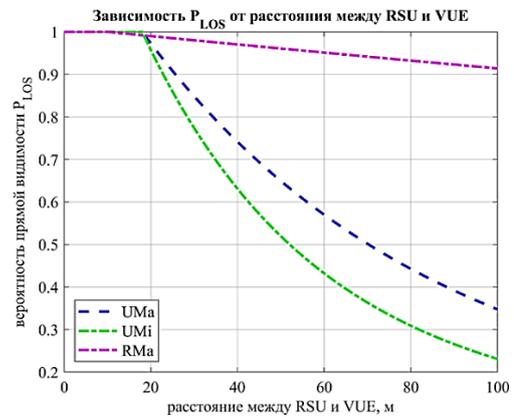


Рис. 4. Зависимость вероятности LOS от расстояния между RSU и VUE

Fig. 4. LOS Probability Dependence on Distance between RSU and VUE

3.3. Результаты имитационной модели для сценария приоритетного проезда перекрестков

Допустим, СКО первичных УМ-измерений DOA $\sigma_\phi = 2^\circ$; СКО первичных ДМ-измерений TOA $\sigma_\tau = 50$ нс. На рисунке 5 представлен пример оценки координат и визуализации точности оценки эллипсом рассеивания для сценария с двумя опорными станциями RSU, оборудованными антенными решетками и находящимися в условиях LOS с VUE (рисунк 6): расстояние между опорными станциями – 60 м; высокоподвижное транспортное средство движется слева направо со скоростью $v = 42$ м/с (≈ 150 км/ч); рассматривается точность позиционирования для двух интервалов сбора измерений $T = 0,1$ с и $T = 0,01$ с.

ТАБЛИЦА 1. Вероятность прямой видимости в СРД 5G [20]

TABLE 1. LOS Probability Dependence in 5G RAN [20]

Тип	Выражение для вычисления вероятности
UMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \left[\frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{VUE}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{63}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right) \right) & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$ <p>где</p> $C'(h_{VUE}) = \begin{cases} 0 & h_{VUE} \leq 13 \text{ м} \\ \left(\frac{h_{VUE} - 13}{10}\right)^{1,5} & 13 \text{ м} < h_{VUE} \leq 23 \text{ м} \end{cases}$
UMi	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$
RMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 10 \text{ м} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D} - 10}{1000}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & 10 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$

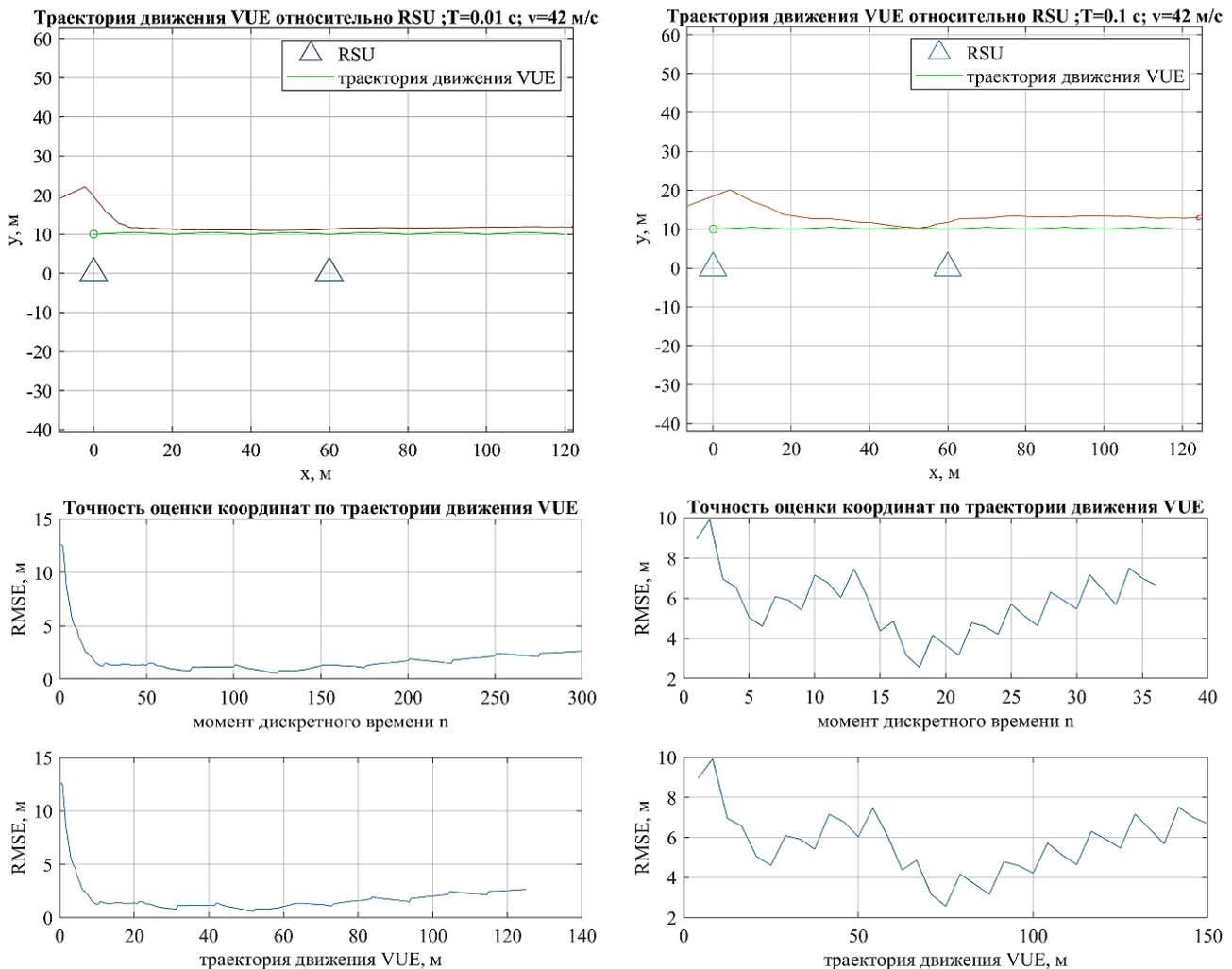


Рис. 5. Пример оценки и визуализации точности позиционирования высокоподвижных транспортных средств; $v = 42$ м/с (≈ 150 км/ч)

Fig. 5. An Example of Assessing and Visualizing Positioning Accuracy of Highly Mobile Vehicles; $v = 42$ m/s (≈ 150 km/h)

Анализ графиков (см. рисунок 5) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) в начале движения VUE наблюдаются высокие погрешности оценки координат RMSE вследствие настройки РФК; для схождения РФК требуется порядка 20 итераций, что согласуется с результатами в [5]; после схождения точность позиционирования VUE достигает 1 м для интервала измерений $T = 0,01$ с; с увеличением длительности на порядок до $T = 0,1$ с точность снижается в разы;
- 2) при движении слева направо VUE при выходе за зону непосредственного охвата второй опорной станции RSU после 60 м погрешность оценки координат RMSE увеличивается.

Этот пример соответствует оптимистическому сценарию (см. рисунок 2а), когда VUE находится в условиях LOS с двумя RSU. Рассмотрим пессимистический сценарий, когда VUE в результате поворота на перекрестке оказывается временно в условиях LOS с одним опорным устройством RSU (см. рисунок 2б); в разработанной BV данная возможность реализована установкой параметра d_{LOS} . Используя результаты оценки условий LOS в зави-

симости от расстояния между RSU и VUE, при заданной траектории движения VUE воспроизводятся сценарии сбора первичных измерений от одной, или двух опорных станций RSU.

На рисунке 6 представлен пример оценки координат и визуализации точности оценки эллипсом рассеивания для сценария с тремя опорными станциями RSU, оборудованными антенными решетками; VUE движется слева направо со скоростью $v \approx 3$ м/с и при достижении второй опорной станции RSU осуществляет поворот вниз; интервал сбора измерений равен $T = 0,1$ с; рассматривается точность позиционирования для двух расстояний $d_{LOS} = 40$ м и $d_{LOS} = 30$ м. Для снижения погрешности позиционирования на интервалах утраты LOS, т.е. при повороте транспортного средства на перекрестке, целесообразно использовать дополнительные измерения, например, данные бортовых инерциальных навигационных систем, которые на непродолжительном интервале позволяют компенсировать недостаток первичных измерений от RSU, находящихся в условиях NLOS [21–23].

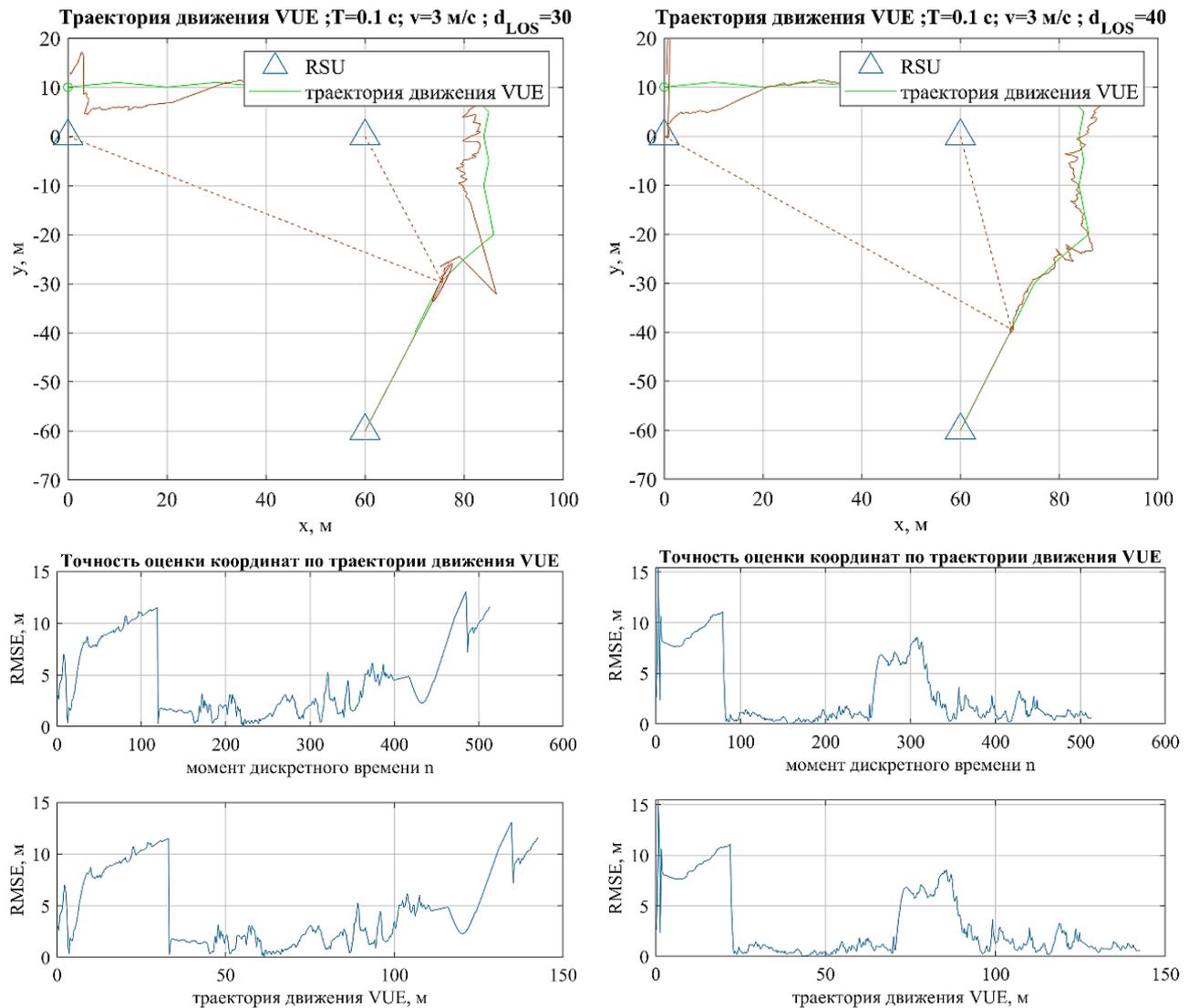


Рис. 6. Пример оценки и визуализации точности позиционирования транспортных средств при повороте на перекрестке; $v = 3 \text{ м/с}$ ($\approx 11 \text{ км/ч}$)

Fig. 6. An Example of Assessing and Visualizing Positioning Accuracy Vehicles when Turning at an Intersection; $v = 3 \text{ m/s}$ ($\approx 11 \text{ km/h}$)

Выводы

Разработанная в настоящем исследовании имитационная модель позволяет получить результаты, которые согласуются с известными оценками моделей-прототипов университета Тампере и подтверждают возможность достижения точности позиционирования транспортного средства VUE до 1 м для сценария управления дорожным движением путем комплексирования дальномерных и угломерных измерений расширенным фильтром Калмана в условиях прямой видимости с двумя опорными устройствами RSU при погрешности определения угла прихода сигнала в 2° , времени прихода 50 нс и начальной рассинхронизации RSU-VUE в 20 мкс. В отличие от существующих моделей-прототипов, разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет производить оценку соответствия заданным требованиям к точности позиционирования в зависимости от

наличия условий прямой видимости и точности сбора первичных угломерных измерений, определяемых установленной на опорном устройстве антенной решеткой, реализованной в Phased Array Toolbox. Также разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет устанавливать зависимости периода сбора дальномерных и угломерных первичных измерений от скорости движения устройства для достижения требуемой точности прогноза траектории без предварительной синхронизации с опорными пунктами инфраструктуры сверхплотной сети радиодоступа в приложениях интеллектуальных транспортных систем. В дальнейшем имитационную модель планируется усовершенствовать для реализации возможности сопровождения транспортного средства VUE лучом адаптивно-формируемой диаграммы направленности антенны RSU для обеспечения пространственного уплотнения в сетях V2X/5G.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках исполнения Государственного контракта № ПЗ3-1-26/9.

Список используемых источников

1. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
2. Фокин, Г. А. Технологии сетевого позиционирования: монография. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
3. Positioning and Location-Awareness in Future 5G Networks // Tampere University of Technology. 2019. URL: <http://www.tut.fi/5G/positioning/index.html> (дата обращения 11.11.2020).
4. Hakkarainen A., Werner J., Costa M., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Localization in 5G Ultra-Dense Networks: Prospects and Enabling Technologies // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 6–9 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390965
5. Werner J., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K., Valkama M. Joint User Node Positioning and Clock Offset Estimation in 5G Ultra-Dense Networks // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, San Diego, USA, 6–10 December 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417360
6. Koivisto M., Costa M., Werner J., Heiska K., Talvitie J., Leppänen K., Koivunen V., Valkama M. Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 5. PP. 2866–2881. DOI:10.1109/TWC.2017.2669963
7. Koivisto M., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K. and Valkama M. Joint 3D Positioning and Network Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks Using UKF and EKF // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps, Washington, USA, 4–8 December 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/GLOCOMW.2016.7848938
8. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Kela P., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Positioning and Location-Aware Communications in Dense 5G Networks // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. Iss. 8. PP. 188–195. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600655
9. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Talvitie J., Heiska K., Leppänen K., et al. Continuous high-accuracy radio positioning of cars in ultra-dense 5G networks // Proceedings of the 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC, Valencia, Spain, 26–30 June 2017). IEEE, 2017. PP. 115–120. DOI:10.1109/IWCMC.2017.7986272
10. Wang J., Shao Y., Ge Y., Yu R. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 2. DOI:10.3390/s19020334
11. Ko S.W., Chae H., Han K., Lee S., Seo D.W., Huang K. V2X-based vehicular positioning: Opportunities, challenges, and future directions // arXiv Preprint, 2019, arXiv:1908.04606. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.04606> (дата обращения 20.11.2021)
12. ETSI TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06). Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification. ETSI, 2018.
13. Zhang Y., Yang T., Tan J., Qiu T.Z. Research on Transit Signal Priority Strategy of Single Intersection Based on V2X Environment // Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS, Liverpool, UK, 14–17 July 2019). IEEE, 2019. PP. 356–363. DOI:10.1109/ICTIS.2019.8883556
14. Toledo-Moreo R., Santa J., Ubeda B., Piñana C., Zamora-Izquierdo M.A., Gomez-Skarmeta A.F. Performance Aspects of Navigation Systems for GNSS-Based Road User Charging // Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010, Portland, USA, 21–24 September 2010). 2010. PP. 1157–1165.
15. Владыко А.Г., Кучерявый А.Е., Буйневич М.В., Парамонов А.И., Киричек Р.В., Фокин Г.А. и др. Разработка и экспериментальная апробация аппаратно-программной платформы предоставления приоритетного проезда регулируемых перекрестков для общественного, грузового и специального транспорта. Отчет о НИР № АААА-Б19-219080890025-6. СПб: СПбГУТ, 2018. 367 с.
16. Kim H., Ma X., Hamilton B.R. Tracking Low-Precision Clocks with Time-Varying Drifts Using Kalman Filtering // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2012. Vol. 20. Iss. 1. PP. 257–270. DOI:10.1109/TNET.2011.2158656
17. METIS D6.1. Simulation guidelines. Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS). METIS, 2013.
18. Phased Array Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc, September 2019. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased_ug.pdf (дата обращения 20.11.2021)
19. Rec. ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU, 2015.
20. Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU, 2017.
21. Киреев А.В., Фокин Г.А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 4. С. 54–62.
22. Духовницкий О.Г., Рагило М.А., Сиверс М.А., Фокин Г.А. Применение фильтра Калмана в задачах позиционирования // Электросвязь. 2016. № 1. С. 78–81.
23. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Al-Odhari A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks // Proceedings of the 16th International on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2016) and 9th Conference on Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART 2016), St. Petersburg, Russia, 26–28 September 2016. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2016. Vol. 9870. PP. 465–476. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_39

* * *

The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter

G. Fokin¹, A. Vladyko¹

¹The Bonch-Bruevich State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59

Received 30th October 2020

Accepted 19th November 2020

For citation: Fokin G., Vladyko A. The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):45–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59

Abstract: *This work is devoted to the study of mathematical models of vehicle positioning in ultra-dense V2X / 5G radio access networks using the extended Kalman filter. Based on the study of the probability of line-of-sight availability in the conditions of ultra-dense distribution of reference radio access stations and vehicles, as well as existing mathematical prototype positioning models, a new simulation model for constructing the trajectory of a vehicle has been developed to assess compliance with the requirements for the accuracy of coordinate assessment on the example of the scenario of priority passage of intersections. The simulation model implements the procedures for collecting primary angle and rangefinder measurements by reference stations received from the vehicle for subsequent secondary processing using the extended Kalman filter, as a result of which the vehicle trajectory is built in real time. In contrast to the existing prototype models, the simulation model developed in this work makes it possible to assess compliance with the specified requirements and other specifications depending on the current conditions of line-of-sight availability, as well as the accuracy of collecting primary angle measurements determined by the antenna array installed on the support device. The results of simulation are consistent with the known estimates of prototype models and confirm the possibility of achieving an accuracy of up to 1 m for a traffic control scenario with an error in determining the angle of arrival of a signal of 2 °.*

Keywords: *positioning, ultra-dense 5G networks, vehicle to everything, range and angle measurements, extended Kalman filter.*

References

1. Fokin G.A., Koucheryavy A.Y. Network Positioning in 5G Ecosystem. *Electrosvyaz*. 2020;9:51–58. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
2. Fokin G.A. Technologies of Network Positioning. St. Petersburg.: The Bonch-Bruevich State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p. (in Russ.)
3. Tampere University of Technology. *Positioning and Location-Awareness in Future 5G Networks*. 2019. Available from: <http://www.tut.fi/5G/positioning/index.html> [Accessed 10.12.2020]
4. Hakkarainen A., Werner J., Costa M., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Localization in 5G Ultra-Dense Networks: Prospects and Enabling Technologies. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 6–9 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390965
5. Werner J., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K., Valkama M. Joint User Node Positioning and Clock Offset Estimation in 5G Ultra-Dense Networks. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 6–10 December 2015, San Diego, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417360
6. Koivisto M., Costa M., Werner J., Heiska K., Talvitie J., Leppänen K., Koivunen V., Valkama M. Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(5):2866–2881. DOI:10.1109/TWC.2017.2669963
7. Koivisto M., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K. and Valkama M. Joint 3D Positioning and Network Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks Using UKF and EKF. *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, 4–8 December 2016, Washington, USA*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/GLOCOMW.2016.7848938
8. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Kela P., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Positioning and Location-Aware Communications in Dense 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2017;55(8):188–195. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600655

9. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Talvitie J., Heiska K., Leppänen K., et al. Continuous high-accuracy radio positioning of cars in ultra-dense 5G networks. *Proceedings of the 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC, 26–30 June 2017, Valencia, Spain*. IEEE; 2017. p.115–120. DOI:10.1109/IWCMC.2017.7986272
10. Wang J., Shao Y., Ge Y., Yu R. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing. *Sensors*. 2019;19(2). DOI:10.3390/s19020334
11. Ko S.W., Chae H., Han K., Lee S., Seo D.W., Huang K. V2X-based vehicular positioning: Opportunities, challenges, and future directions. *arXiv Preprint, 2019, arXiv:1908.04606*. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.04606> [Accessed 20th November 2020]
12. ETSI TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06). *Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification*. ETSI; 2018.
13. Zhang Y., Yang T., Tan J., Qiu T.Z. Research on Transit Signal Priority Strategy of Single Intersection Based on V2X Environment. *Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS, 14–17 July 2019, Liverpool, UK*. IEEE; 2019. p.356–363. DOI:10.1109/ICTIS.2019.8883556
14. Toledo-Moreo R., Santa J., Ubeda B., Piñana C., Zamora-Izquierdo M.A., Gomez-Skarmeta A.F. Performance Aspects of Navigation Systems for GNSS-Based Road User Charging. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2010, 21–24 September 2010, Portland, USA*. 2010. p.1157–1165.
15. Vladyko A.G., Kucheryavy A.E., Buinevich M.V., Paramonov A.I., Kirichek R.V., Fokin G.A., et al. *Development and Experimental Testing of a Hardware and Software Platform for Providing Priority Passage at Controlled Intersections for Public, Freight and Special Transport*. Tech. report No. AAAA-Б19-219080890025-6. St. Petersburg.: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2018. 367 p. (in Russ.)
16. Kim H., Ma X., Hamilton B.R. Tracking Low-Precision Clocks with Time-Varying Drifts Using Kalman Filtering. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2012;20(1):257–270. DOI:10.1109/TNET.2011.2158656
17. *METIS D6.1. Simulation guidelines. Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)*. METIS, 2013.
18. *Phased Array Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc, September 2019*. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased Ug.pdf [Accessed 20th November 2020]
19. Rec. ITU-R M.2083-0. *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. ITU; 2015.
20. Report ITU-R M.2412-0. *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*. ITU; 2017.
21. Kireev A.V., Fokin G.A. Accuracy Evaluation of Local Positioning by Radiomap Building and Inertial Navigation Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 54–62.
22. Dukhovnitskiy O.G., Ragilo M.A., Sivers M.A., Fokin G.A. Kalman Filtering for Positioning Applications. *Electrosvyaz*. 2016;1:78–81. (in Russ.)
23. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Al-Odhari A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks. *Proceedings of the 16th International on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN 2016, and 9th Conference on Conference on Internet of Things and Smart Spaces. ruSMART 2016, St. Petersburg, Russia, 26–28 September 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2016. vol.9870. p.465–476. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_39

Сведения об авторах:

ФОКИН
Григорий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

ВЛАДЬКО
Андрей Геннадьевич

кандидат технических наук, директор НИИ «Технологии связи» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, vladyko@sut.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8852-5607>

Интеграция топологий сети мобильной связи и навигации в интересах управления подвижными объектами

С.А. Якушенко¹, С.В. Дворников^{2*}

¹Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

*Адрес для переписки: practicsdv@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.10.2020

Принята к публикации 12.11.2020

Ссылка для цитирования: Якушенко С.А., Дворников С.В. Интеграция топологий сети мобильной связи и навигации в интересах управления подвижными объектами // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 60–68. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-60-68

Аннотация: Разработан подход совместного использования ресурса системы связи с подвижными объектами и локальной радионавигационной системы на основе интеграции их топологий по критерию электромагнитной доступности мобильных станций одновременно к нескольким базовым станциям сети. Данный подход может применяться при проектировании навигационно-связных комплексов и навигационной аппаратуры потребителя.

Ключевые слова: система мобильной связи, системы определения местоположения, электромагнитная доступность, интеграция систем навигации и связи.

Введение

Современные глобальные системы спутниковой навигации неустойчиво функционируют в городских условиях, при плохой радиовидимости спутников, в лесистой и горной местности [1–3]. Подобные проблемы обнаруживаются и в условиях внешних деструктивных электромагнитных воздействий (ЭМВ) [4–6]. Это связано с рядом причин, основная из которых характеризуется малым уровнем мощности сигналов на входе аппаратуры спутниковой навигации, излучаемых опорными станциями. Следствием этого является ухудшение показателей позиционирования и безопасности систем навигационного обеспечения (СНО) подвижных объектов управления [7–9]. Поэтому становится актуальным вопрос повышения показателей устойчивости и безопасности функционирования радионавигационной системы (РНС) [10–13].

Одним из путей совершенствования СНО является проектирование локальной РНС на основе ее телекоммуникационной сети связи с последующей интеграцией в глобальные системы спутниковой навигации [14]. Создание локальных РНС целесообразно проводить на основе уже существующих систем (сетей) мобильной связи, например, тран-

кинговой, так как значительно сокращаются материальные затраты СНО. Система мобильной связи с услугой позиционирования будет обладать новыми свойствами, которые определяются ее топологией [15]. Максимальный выигрыш от интеграции можно достичь, решив соответствующую задачу формирования совместной топологии связи и навигации. Для этого необходимо определить показатели, выбрать критерий решения задачи и разработать методику формирования совместной топологии систем мобильной связи и РНС. Этим вопросам и посвящена данная статья.

Критерий формирования топологии системы определения местоположения абонентов сети мобильной связи

В настоящее время существует широкий спектр подходов к выбору показателей топологии сетей связи и навигации [16–18]. Под топологией будем понимать геометрическую форму сети, т. е. физическое расположение базовых станций (вершин U) по отношению к друг другу и расстояния (длины ребер V) между ними. Из свойств топологии рассмотрим количество базовых станций, их взаимное расположение и пространственную метрику между ними и подвижными объектами [7].

Применительно к топологии системы определения местоположения в условиях деструктивных электромагнитных воздействий выделяется три основных показателя [1, 17, 18]: показатели доступности D , точности определения местоположения σ и стоимости ресурса сети C . Показатели систем мобильной связи и систем определения местоположения взаимозависимы через количество используемых базовых станций и пространственную метрику между ними, которые определяют D , σ и C . Поэтому критерием выбора топологии может быть достижение экстремума доступности $F(D) \rightarrow \max$ при ограничениях на точность и стоимость.

Топология систем мобильной связи с услугой позиционирования формируется для абонентов (подвижных объектов), распределенных по обслуживаемой территории произвольным образом. Тогда показатель стоимости ресурса систем мобильной связи будет, в основном, определяться стоимостью базовых станций:

$$C = MC_{\text{ос зад}}, \quad (1)$$

где M – количество базовых (опорных) станций; $C_{\text{ос зад}}$ – заданная стоимость одной базовой станции.

В качестве второго ограничения задачи целесообразно выбрать точность определения местоположения, которая численно вычисляется среднеквадратической погрешностью:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{тр}}$ – требуемое значение среднеквадратической погрешности определения местоположения подвижных объектов [17, 18].

Третье ограничение задачи заключается в выполнении условия покрытия рабочими зонами позиционирования заданной обслуживаемой территории:

$$K_{\text{п}} > K_{\text{п зад}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{п зад}}$ – заданное органами управления значение коэффициента покрытия рабочими зонами обслуживаемой территории; $K_{\text{п}}$ – расчетный коэффициент покрытия территории рабочими зонами [17, 18].

Показатели в ограничениях связаны с индексом доступности посредством параметров топологии сети навигации и связи (метрикой между базовыми станциями). Доступность и точность местоположения взаимосвязаны через геометрический фактор точности, который определяется количеством станций, их местоположением (x_i, y_i) и геометрией расположения подвижных объектов относительно этих станций [19]. Геометрический фактор точности имеет аналитическую взаимосвязь с инструментальной погрешностью РНС [17]. Очевидно, что стоимость и коэффициент покрытия также зависят от количества базовых станций. Таким образом, параметрами топологии сети явля-

ется количество опорных станций системы определения местоположения и их взаимное размещение на местности (пространственная метрика).

Показатель электромагнитной доступности подвижных объектов к базовым станциям отображает вероятность того, что в любое время в любой точке рабочей зоны система определения местоположения обеспечивает потребителя (подвижный объект) информацией, достаточной для определения координат с заданной точностью. Мерой доступности является выраженное в процентах отношение времени, в течение которого навигационные сигналы данной системы пригодны для определения местоположения, к общему времени работы системы. Тогда применительно к системам мобильной связи с услугой позиционирования электромагнитная доступность подвижного объекта к базовым станциям будет определяться варьируемыми параметрами топологии: количеством базовых (опорных) станций M ; координатами размещения опорных станций на заданной территории обслуживания подвижных объектов (x_i, y_i) ; геометрическим фактором системы $K_{\text{г}}$ при выполнении требований к точности определения местоположения.

С учетом вышесказанного и выражений (1, 2, 3) задачу выбора топологии систем мобильной связи с услугой позиционирования можно сформулировать следующим образом – для заданного ресурса системы мобильной связи требуется сформировать топологию системы определения местоположения с максимальной доступностью:

$$F(D) \rightarrow \max, \quad (4)$$

при следующих ограничениях:

$$C \leq MC_{\text{ос зад}}; \sigma(K_{\text{г}}, M) \leq \sigma_{\text{тр}}; K_{\text{п}}(M) > K_{\text{п зад}}, \quad (5)$$

где $M = \{M_1((x_1, y_1), M_2((x_2, y_2), \dots, M_m((x_m, y_m))\}$ – распределяемый ресурс базовых станций; $F(D)$ – целевая функция; X – вариант распределения станций.

В зависимости от заданного ресурса сети можно получить несколько вариантов интегрированной топологии сети связи и навигации. В этом случае задача решается в 2 этапа. На первом этапе определяется множество вариантов совместной топологии с $D_i > D_{\text{тр}}$, удовлетворяющие требованиям по точности определения местоположения подвижных объектов $\sigma < \sigma_{\text{тр}}$ в заданной территориальной зоне, а на втором этапе выбирается лучший вариант по обобщенному показателю, для случая $C_i = C_{\text{мин}}^*$, на основе использования метода уступок [20].

Таким образом, выбранный критерий интегрированной топологии мобильной связи и навигации имеет взаимосвязь с наложенными на него ограничениями, что позволяет сформировать целевую функцию для определения доступности подвижных объектов к опорным станциям.

Методика формирования интегрированной топологии

Содержательная постановка задачи заключается в формировании наилучшей интегрированной топологии сети связи и навигации, с точки зрения показателя доступности подвижных объектов к радионавигационному полю, реализующей услуги позиционирования на основе ресурса сети связи с подвижными объектами. Под подвижными объектами в работе понимается любое транспортное средство, имеющее на борту совмещенный навигационно-связной терминал (навигационный приемник и мобильную радиостанцию), связанный по каналу управления и мониторинга системы навигационного обеспечения с должностными лицами органов управления. Подвижные объекты являются объектами управления системы навигационного обеспечения.

Имеется M базовых станций сети связи с подвижными объектами, образующих граф $G(U, V)$, где U – вершины графа (базовые станции); V – связи между базовыми и мобильными станциями. Каждая из них имеет блоки измерения навигационных параметров системы определения местоположения, реализующих один из методов определения местоположения координат. Задана территория позиционирования, ограниченная действиями подвижных объектов со сторонами прямоугольника a и b . Каждая базовая станция обслуживает пространственную зону, размеры которой $R_i, i = 1 \dots M$ зависят от тактико-технических характеристик мобильных терминалов подвижных объектов и базовых станций (мощности передатчика, коэффициента усиления антенны, чувствительности приемника и т. п.). Характеристики внешних деструктивных ЭМВ будем учитывать, как воздействие шумовой помехи, влияющей на отношение сигнал/шум на входе приемника.

Необходимо выбрать координаты базовых станций (x_i, y_i) и сформировать топологию системы определения местоположения, т. е. граф $G(U, V)$, обеспечивающий максимально возможные значения показателя доступности системы определения местоположения, при выполнении требований, предъявляемых к радионавигационным системам и системам мобильной связи.

Формальная постановка задачи сводится к поиску такого распределения базовых станций по заданной территории, (матрицы назначения станций $X = \{x_{qi}\}$), при котором целевая функция доступности $P_d = \max F(X_0)$ достигает максимального значения, где P_d – вероятность доступности подвижного объекта к опорным станциям.

Анализ требований к качеству каналов связи и радионавигации показывает, что требования к вероятности связи выше, чем к доступности мобильных станций к одной опорной станции [17, 21, 22]. Поэтому для выполнения требований к качеству связи в дальнейшем будем оперировать понятием вероятности связи или вероятности приема сигнала j -ой мобильной станций от i -ой опорной. Итак, доступность системы определения местоположения j -ой мобильной к i -ой опорной станции характеризуется параметром p_{ij} .

Сформулируем целевую функцию. Пусть событие вероятности приема сигнала мобильных станций – есть вероятность p , тогда вероятность неприема этой станции сигнала от опорной равна $q = 1 - p$. Пусть n – число требуемых для измерения навигационного параметра опорных станций, к которым может быть одновременный доступ мобильных станций, а m – общее число выделенных базовых станций (ресурс сети).

Из теории вероятностей [23] известно, что вероятность полных событий равна единице, т. е.:

$$p^m + mp^{m-1}(1-p) + C_m^{m-2}p^{m-2}(1-p)^m + \dots + C_m^n p^n(1-p)^{m-n} + \dots + (1-p)^n. \quad (6)$$

При использовании разностно-дальномерного метода определения местоположения необходимо осуществлять одновременный прием сигналов от трех опорных станций, что обеспечит размер рабочей зоны позиционирования, на которой выполняются требования по точности $\sigma_{мп} \geq \sigma_{мптр}$ [24]. Тогда вероятность одновременного приема не менее n радионавигационных сигналов от m опорных станций в одной точке, т. е. вероятность сложного события будет иметь вид [23, 25]:

$$P_{n,m} = \sum_n \left[\sum_{i_1=1}^{m-n+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{m-n+2} \dots \sum_{i_n=i_{n-1}+1}^m \frac{p_{i_1} p_{i_2} \dots p_{i_n}}{q_{i_1} q_{i_2} \dots q_{i_n}} \prod_{j=1}^m q_j \right], \quad (7)$$

где p_i – вероятность приема сигнала от i -ой опорной станции; $q_i = 1 - p_i$ – вероятность неприема сигнала от i -ой станции.

Окончательно целевую функцию доступности для системы определения местоположения (4), где $p_i(x, y)$ – вероятность приема сигнала от i -ой опорной станции при нахождении мобильной станции в точке с координатами (x, y) ; $q_i(x, y)$ – вероятность неприема сигнала в этой точке; T_{xy} – количество точек сканирования в заданной зоне обслуживания, размером $a \times b$; (x, y) – координаты местоположения станций, можно записать в виде выражения:

$$F[(x, y), m] = \max_{[(x,y),n]} \left(\frac{1}{T_{xy}} \left(\sum_{k=1}^a \sum_{l=1}^b \sum_n \left[\sum_{i_1=1}^{m-n+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{m-n+2} \dots \sum_{i_n=i_{n-1}+1}^m \frac{p_{i_1}(x,y) p_{i_2}(x,y) \dots p_{i_n}(x,y)}{q_{i_1}(x,y) q_{i_2}(x,y) \dots q_{i_n}(x,y)} \prod_{j=1}^m q_j(x,y) \right] \right) \right). \quad (8)$$

Условиями и ограничениями являются:

$$\begin{aligned} \sigma(M, K_r) &\geq \sigma_{тр}; C(M) \leq C_{зад}; S \leq S_{зад}; \\ m &\leq M_{зад}; m, n \in \{M_{зад}\}, K_n \geq K_{n\text{ зад}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\sigma(M)$ – ошибка измерения местоположения; $M_{зад}$ – заданное количество станций; $S = a \times b (S_{зад})$ – площадь (заданная заказчиком) района позиционирования.

В целевой функции вероятность приема (неприема) сигнала зависит от отношения сигнал/шум на входе приемника и определяется первым уравнением передачи с учетом деструктивных ЭМВ [17]. Величина среднеквадратической погрешности определения местоположения равна произведению инструментальной погрешности навигационного параметра σ_n и геометрического фактора системы ($\sigma = \sigma_n K_r$). В свою очередь, геометрический фактор определяется пространственной метрикой топологии сети РНС (количеством базовых станций M и угловым положением мобильных станций относительно базовых, т. е. (x_i, y_i)). Инструментальная погрешность навигационного приемника зависит от отношения сигнал/шум на его входе, базы сигнала и времени измерения параметров. Количество точек сканирования T_{xy} – в заданной зоне обслуживания зависит от шага сканирования Δx и Δy по координатам (x, y) зоны. Шаг сканирования выбирается с учетом размерности и точность решения задачи [17, 21, 22]. Следовательно, показатель доступности в целевой функции (8) и параметры-ограничения (9) имеют взаимосвязь с параметрами топологии сети, тактико-техническими параметрами радиолиний навигации и связи параметрами. Таким образом, формализованная интерпретация постановки задачи следующая: требуется найти такое местоположение станций, чтобы максимизировать показатель доступности системы навигации при выполнении остальных требований и ограничений.

Классификация задачи и выбор метода ее решения

Изменяемыми параметрами целевой функции являются координаты опорной станции и их количество в сети. Целевая функция (8) сложная аддитивная, нелинейная и целочисленная. Задача (8, 9) относится к классу экстремальных поисковых задач, определяемому как класс нелинейных, дискретных с зависимыми переменными и неполной информацией [26–28]. Классические методы математического программирования в этом случае неэффективны из-за невозможности строгого математического описания целевой функции и ограничений.

Одним из методов решения подобного класса задач является метод последовательного анализа вариантов [29]. Для задач большой размерности поиск оптимального решения проводят методом ветвей и границ. Суть метода последовательного анализа вариантов заключается в следующем. По

определенному правилу генерируются все варианты топологий сети $\{St_i\}$. Количество возможных вариантов $\{St_{зад}\}$ ограничивается заданным ресурсом базовых станций, размером района обслуживания и коэффициентом покрытия [26]. Кроме того, количество структур топологии сети ограничивается тремя типами: равносторонним треугольником, квадратом и правильным шестиугольником (гексогоном). Данные структуры имеют максимальное значение коэффициента покрытия $K_n(M)^T$ заданной территориальной зоны $S = a \times b$. Далее каждый вариант топологии сети оценивается значением целевой функции (доступностью P_d) и рядом параметров-ограничений. Оценка вариантов осуществляется с помощью имитационного моделирования с использованием метода сканирования [28]. После рассмотрения всех вариантов производится выбор наилучшего варианта интегрированной топологии сети связи и навигации с использованием обобщенного показателя [27].

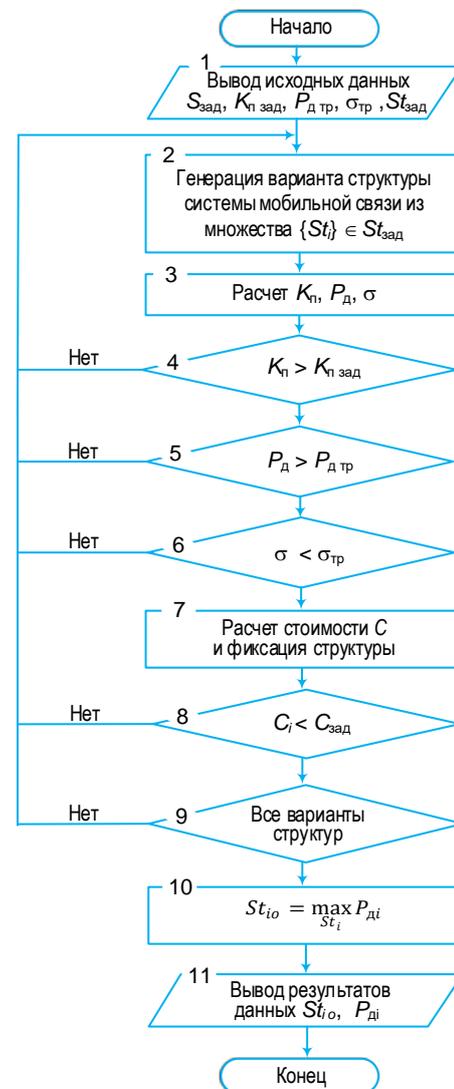


Рис. 1. Алгоритм решения оптимизационной задачи
Fig. 1. Algorithm for Solving the Optimization Problem

На рисунке 1 представлен алгоритм решения задачи методом последовательного анализа возможных вариантов топологии сети путем определения показателя доступности P_d (8) на основе расчета достоверности каналов связи к каждой станции (здесь же учитываются внешние деструктивные ЭМВ); точности определения местоположения σ ; коэффициента покрытия территории зоны позиционирования K_p и проверки ограничений: соответствие рассчитанных значений показателей требуемым. На заключительном этапе определяется наилучший вариант топологии сети, обеспечивающий максимальную доступность при заданном ресурсе связи и ограничениях на показатели системы.

Достоинством данного алгоритма является простота и возможность точного получения наилуч-

шего решения. Такой подход является предпочтительнее в случае выбора систем мобильной связи с услугой позиционирования, поскольку множество возможных вариантов ограничено. Точность метода целиком и полностью определяется шагом сканирования зоны обслуживания и полнотой множества вариантов структуры систем мобильной связи.

Результаты формирования интегрированной топологии сети мобильной связи и навигации

Формирование интегрированной топологии системы связи и навигации осуществлялось по единым исходным данным, что позволило определить наилучшую систему по критерию «эффективность-стоимость» [17]. Количество вариантов определялось градациями ограничений. В результате получено 4 варианта топологий системы определения местоположения, которые представлены на рисунке 2.

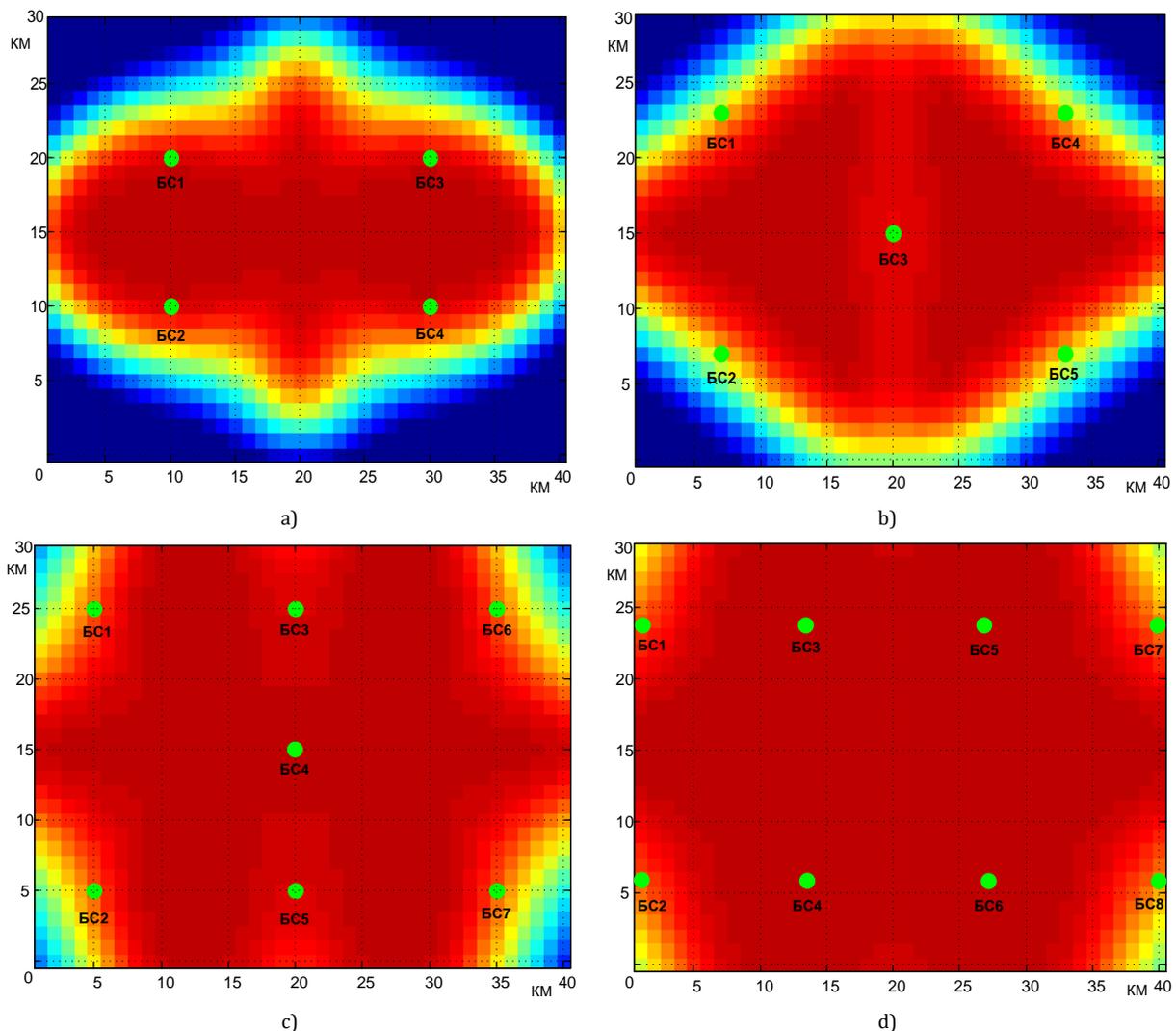


Рис. 2. Варианты топологий системы определения местоположения для различного количества опорных станций: а) 4; б) 5; в) 7; г) 8

Fig. 2. Variants of Location System Topologies for Different Number of Reference Stations: а) 4; б) 5; в) 7; г) 8

Анализ результатов показывает, что полученные варианты интегрированных топологий абонентов удовлетворяют требованиям, предъявляемым к навигационному обеспечению, однако отличаются плотностью распределения и местоположением базовых станций. Причем более распределенные сети имеют лучшие показатели электромагнитной доступности и меньше подвержены деструктивным ЭМВ. Структуры вариантов топологий имеют форму «квадрата». Это решетчатая структура сети, занимающая промежуточное состояние между триангулярной и гексогенной.

Проведем оценку полученных вариантов топологий интегрированной сети с использованием обобщенного показателя [30] эффективности. Частные показатели равнозначные: p_d – доступность системы определения местоположения, p_y – устойчивость к деструктивным ЭМВ. Результаты расчетов приведены в таблице 1 и на рисунке 3.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета показателей вариантов интегрированных топологий сети мобильной связи и навигации

TABLE 1. Results of Calculating Indicators for Integrated Mobile Network and Navigation Topologies

N	4	5	6	7	8
p_d	0,73	0,81	0,90	0,95	0,97
p_y	0,25	0,45	0,63	0,85	0,86
Эффект	0,54	0,70	0,85	1	1
Стоимость	0,625	0,75	0,875	1	1,25
Эффективность	0,864	0,93	0,97	1	0,89

Примечание: Эффективность = Нормированный эффект/Нормированная стоимость

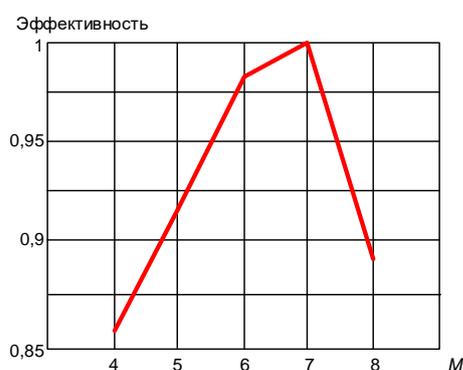


Рис. 3. Эффективность различных вариантов интегрированных топологий сети мобильной связи и навигации

Fig. 3. Effectiveness of Various Variants of Integrated Mobile Network and Navigation Topologies

Список используемых источников

1. Якушенко С.А. Проблемы навигационного обеспечения систем мониторинга и диспетчеризации подвижных объектов и оценка его безопасности // Информация и космос. 2019. № 2. С. 78–81.
2. Рябов И.В., Чернов Д.А., Толмачев С.В. Разработка алгоритма повышения точности местоопределения в условиях городского ландшафта с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2019. Т. 9. № 2. С. 22–26.
3. Маттос Ф., Русак А., Буланова В. ГЛОНАСС/GPS для всех: испытания на точность и доступность позиционирования однокристального приемника в сложных условиях эксплуатации // Компоненты и технологии. 2012. № 5(130). С. 165–170.

Оценка эффективности функционирования исследуемых систем определения местоположения с использованием метода свертки частных показателей позволяет сделать вывод, что наибольший эффект имеют системы определения местоположения с максимальным числом базовых станций. Однако, дальнейшее увеличение их количества приводит к незначительному приросту эффекта и существенному увеличению стоимости системы. Поэтому наибольшей эффективностью обладают системы определения местоположения из 7 станций.

Заключение

Существующие спутниковые РНС не в полной мере удовлетворяют современным требованиям навигационного обеспечения подвижных объектов управления. Повышение устойчивости и качества навигационного обеспечения возможно путем ее резервирования с подсистемой определения местоположения абонентов сети мобильной связи.

Анализ полученных результатов и перспективных структур систем мобильной связи показывает возможность использования их аппаратно-частотного ресурса для навигационного обеспечения подвижных объектов управления. Предложенная в статье методика формирования интегрированной топологии на основе определения доступности подвижных объектов к опорным станциям с заданной точностью позволяет оценить существующие и перспективные структуры систем мобильной связи с целью их эффективного использования в интересах навигации и связи.

Несмотря на характерный недостаток, заключающийся в возможности получения квазиоптимального решения, подобный подход широко используется в прикладных задачах [31, 32]. Ресурс СНО распределяется таким образом, чтобы в наихудших внешних деструктивных ЭМВ обеспечить наилучшую вероятность устойчивости ее функционирования.

Для повышения доступности спутниковой РНС в сложных физико-географических условиях местности необходима ее интеграция с локальной наземной РНС на основе системы связи с подвижными объектами управления. Интеграция с топологией глобальной системы спутниковой навигации в целях повышения устойчивости, надежности и безопасности функционирования СНО является вопросом дальнейшего исследования.

4. Якушенко С.А., Прасько Г.А., Дворовой М.О., Веркин С.С. К вопросу решения антагонистических задач при комплексном противодействии сторон // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2012. Т. 4. № 1. С. 24–26.
5. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Аванесов М.Ю. Модель деструктивного воздействия когнитивного характера // Информация и космос. 2018. № 2. С. 22–29.
6. Самойленко Д.В., Финько О.А. Обеспечение целостности информации в группе беспилотных летательных аппаратов в условиях деструктивных воздействий нарушителя // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 5-6(107-108). С. 20–27.
7. Якушенко С.А., Малышев А.К., Маняшин Д.А., Карманова Н.А. Многопараметрический поиск оптимальных маршрутов движения подвижных объектов в условиях дестабилизирующих факторов // Информация и космос. 2016. № 4. С. 144–151.
8. Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М. Помехозащищенный навигационный комплекс транспортного средства // Новости навигации. 2016. № 3. С. 9–17.
9. Вокин Г.Г. Концептуальные основы обеспечения защиты позиционирования стационарных и мобильных объектов по данным космических систем глобальной навигации в условиях навигационного противодействия // Информационно-технологический вестник. 2019. № 4(22). С. 9–16.
10. Якушенко С.А., Дворников С.В. Модель угроз навигационной безопасности пользователей спутниковой радионавигационной системы // XXII Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 3–7 июня 2019 г.). СПб: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 199–206.
11. Затучный Д.А. Методы противодействия несанкционированным радиотехническим атакам на навигационные системы воздушного судна гражданской авиации // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1(21). С. 21–27. DOI:10.21685/2307-4205-2018-1-3
12. Забегалин Е.В. К вопросу об определении термина "информационно-техническое воздействие" // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 121–150.
13. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73–77.
14. Перминов А.Н. Современное состояние и перспективы развития системы ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 3(48). С. 5–11.
15. Каюмов А.О., Аксютин М.Н. Перспективы развития систем профессиональной подвижной радиосвязи // Молодежный научный форум: технические и математические науки. 2017. № 4(44). С. 80–85.
16. Агаян А.А. Математические модели для проектирования цифровых сетей связи. М.: МПСС, 1987. 127 с.
17. Снежко В.К., Якушенко С.А. Военные интегрированные системы навигации, связи и управления. СПб.: ВАС, 2014. 452 с.
18. Снежко В.К., Якушенко С.А., Сазонов М.А. и др. Средства и комплексы навигационного обеспечения систем управления специального назначения. СПб.: ВАС, 2018. 508 с.
19. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Дмитриев В.И. Системы мобильной связи. СПб: СПбГУТ, 1999.
20. Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2016. 520 с.
21. Ильин Е.С. Вероятность нарушения связи в сотовой сети мобильной радиосвязи в условиях замираний сигнала и помехи // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 2. С. 27–31.
22. Ванюков А.Ю. Определение вероятности ошибки в канале связи // Т-Com: Телекоммуникации и транспорт. 2008. Т. 2. № 6. С. 38–40.
23. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчетам. М: Воениздат, 1970. 270 с.
24. Волков Р.В., Саяпин В.Н. и др. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиозлучений. СПб.: ВАС, 2013. 116 с.
25. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.
26. Роджерс К. Укладки и покрытия. М.: Мир, 1968, 132 с.
27. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. М.: Советское радио, 1974, 304 с.
28. Саати Т. Принятие решений: метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
29. Гриф М.Г., Цой Е.Б. Реализация метода последовательного анализа вариантов при оптимизации сложных систем по нечетким и вероятностным показателям // Сибирский журнал индустриальной математики. 2001. Т. 4. № 2(8). С. 123–141.
30. Книга Е.В., Жаринов И.О. Принципы построения комбинированной топологии сети для перспективных бортовых вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6(88). С. 92–98.
31. Дворников С.В., Якушенко С.А., Лянгузов Д.А. Динамический выбор радиолиний для систем подвижной спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 28–36. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-28-36
32. Якушенко С.А., Малышев А.К. Прогнозирование точности позиционирования в сложных физико-географических условиях // НАУЧНАЯ СЕССИЯ ГУАП (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 10-14 апреля 2017). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2017. С. 154–160.

* * *

Integration of Mobile Network and Navigation Topologies for Mobile Object Management

S. Yakushenko¹, S. Dvornikov²

¹State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

²Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-60-68

Received 8th October 2020

Accepted 12th November 2020

For citation: Yakushenko S., Dvornikov S. Integration of Mobile Network and Navigation Topologies for Mobile Object Management. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):60–68. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-60-68

Abstract: An approach is developed for sharing the resource of the mobile object communication system and the local radio navigation system based on the integration of their topologies according to the criterion of electromagnetic availability of mobile stations simultaneously to several base stations of the network. This approach can be used in the design of navigation and communication systems and navigation equipment of the consumer.

Keywords: mobile communication system, location detection systems, electromagnetic accessibility, integration of navigation and communication systems.

References

1. Yakushenko S. Problems of the Navigation Support of Monitoring and Dispatching Systems of Mobile Objects and Assessment of its Safety. *Information and Space*. 2019;2:78–81. (in Russ.)
2. Ryabov I.V., Chernov D.A., Tolmachev S.V. Development of an Algorithm for Increasing the Accuracy of Positioning in the Conditions of an Urban Landscape Using GLONASS system and GPS signals. *REDS: Telekommunikatsionnye ustroystva i sistemy*. 2019;9(2):22–26. (in Russ.)
3. Mattos F., Rusak A., Bulanova V. GLONASS system / GPS for All: Testing the Accuracy and Availability of Single-Chip Receiver Positioning in Difficult Operating Conditions. *Komponenty i tekhnologii*. 2012;5(130):165–170. (in Russ.)
4. Yakushenko S.A., Prasko G.A., Dvorovoy M.O., Verkin S.S. Solution of antagonistic tasks in case of complex counteraction of the sides. *H&ES research*. 2012;4(1):24–26. (in Russ.)
5. Dvornikov S., Pshenichnikov A., Avanesov M. Cognitive destruction effect model. *Information and Space*. 2018;2:22–29. (in Russ.)
6. Samoylenko D.V., Finko O.A. Providing Integrity Information Group Unmanned Aerial Vehicles under Destructive Impact Pursu. *Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*. 2017;5-6(107-108):20–27. (in Russ.)
7. Yakushenko S., Malyshev A., Manyashin D., Karmanova N. Multi Parameter Search of Movable Object Optimum Travelling Routes under Condition of Destabilizing Factors. *Information and Space*. 2016;4:144–151. (in Russ.)
8. Veremeenko K.K., Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M. Vehicle Fault Tolerant Integrated Navigation System. *Novosti navigatsii*. 2016;3:9–17. (in Russ.)
9. Vokin G.G. Conceptual Bases of Provision of Protection of Positioning of Stationary and Mobile Objects According to Space Systems of Global Navigation in the Conditions of Navigation Counteraction. *Information Technology Bulletin*. 2019;4(22):9–16. (in Russ.)
10. Yakushenko S.A., Dvornikov S.V. Navigation Security Threat Model of Satellite Position Fixing Navigation System. *Proceedings of the XXIInd International Scientific Conference on Wave Electronics and Infocommunication Systems, 3–7 June 2019, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2019. p.199–206. (in Russ.)
11. Zatuchnyy D.A. Methods of Preventing Unauthorized Electronic Attacks on the Navigation System of the Aircraft of Civil Aviation. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2018;1(21):21–27. (in Russ.) DOI:10.21685/2307-4205-2018-1-3
12. Zabegalin E.V. A Question of Definition of the Term "Information and Technical Impact". *Systems of Control, Communication and Security*. 2018;2:121–150. (in Russ.)
13. Dvornikov S., Dukhovnitsky O. Assessing interference immunity of professional radio navigation equipment of GLONASS system. *Information and Space*. 2015;4:73–77. (in Russ.)
14. Perminov A.N. The Glonass System Current Status and Evolution Prospects. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2007;3(48):5–11. (in Russ.)

15. Kayumov A.O., Aksyutin M.N. Prospects for the development of professional mobile radio communication systems. *Molodezhnyi nauchnyi forum tekhnicheskie i matematicheskie nauki*. 2017;4(44):80–85. (in Russ.)
16. Agayan A.A. *Mathematical Models for the Design of Digital Communication Networks*. Moscow: MPSS Publ.; 1987. 127 p. (in Russ.)
17. Snezhko V.K., Yakushenko S.A. *Military Integrated Navigation, Communications and Control Systems*. St. Petersburg: Telecommunications Military Academy Publ.; 2014. 452 p. (in Russ.)
18. Snezhko V.K., Yakushenko S.A., Sazonov M.A. et al. *Means and Complexes of Navigation Support for Special Purpose Control Systems*. St. Petersburg: Telecommunications Military Academy Publ.; 2018. 508 p. (in Russ.)
19. Babkov V.Yu., Voznyuk M.A., Dmitriev V.I. *Mobile Communication Systems*. St. Petersburg: Telecommunications Military Academy Publ.; 1999. (in Russ.)
20. Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavsky A.V., Kryanev A.V. *Decision Making Methods in Problems of Assessing the Quality and Technical Level of Complex Technical Systems*. Moscow: LENAND Publ.; 2016. 520 p. (in Russ.)
21. Iljin E.S. Outage Probability in Cellular Mobile Radio in the Conditions of Signal and Interferers Fadings. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2009;7(2):27–31. (in Russ.)
22. Vanyukov A.Yu. Determination of the Error Probability in the Communication Channel. *T-Comm*. 2008;2(6):38–40. (in Russ.)
23. Abezgauz G.G., Tron A.P., Kopenkin Yu.N., Korovina I.A. *Probabilistic Calculations Handbook*. Moscow: Voenizdat Publ.; 1970. 270 p. (in Russ.)
24. Volkov R.V., Sayapin V.N., et al. *Fundamentals of Construction and Functioning of Differential-Range-finder Systems for Coordinateometry of Radio Emission Sources*. St. Petersburg: Telecommunications Military Academy Publ.; 2013. 116 p. (in Russ.)
25. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Applied Problems of Probability Theory*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1983. 416 p. (in Russ.)
26. Rogers K. Styling and Covering. Moscow: Mir Publ.; 1968. 132 p. (in Russ.)
27. Berzin E.A. *Optimal Resource Allocation and Elements of Systems Synthesis*. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1974. 304 p. (in Russ.)
28. Saati T. *Decision Making: a Method for Analyzing Hierarchies*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1993. 278 p. (in Russ.)
29. Grif M.G., Tsoi E.B. Implementation of the Method of Sequential Analysis of Options when Optimizing Complex Systems for Fuzzy and Probabilistic Indicators. *Sibirskii zhurnal industrialnoi matematiki*. 2001;4(2):123–141. (in Russ.)
30. Kniga E., Zharinov I. Design Principles of a Combined Network Topology for Advanced On-Board Computing System. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2013;6(88):92–98. (in Russ.)
31. Dvornikov S., Yakushenko S., Lyanguzov D. Dynamic Radio Links Selection for Mobile Satellite Communication Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(4):28–36. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-28-36
32. Yakushenko S.A., Malyshev A.K. Prediction of Positioning Accuracy in Difficult Physiographic Conditions. SCIENTIFIC SESSION of Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 10–14 April 2017, St. Petersburg, Russian Federation. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2017. p.154–160. (in Russ.)

Сведения об авторах:

ЯКУШЕНКО
Сергей Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры медицинской радиоэлектроники Государственного университета аэрокосмического приборостроения, was16@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7722-020X>

ДВОРНИКОВ
Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, practicdsv@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6680-7550>

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации**

**05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы
и комплексы программ**

**05.13.19 – Методы и системы защиты
информации,
информационная безопасность**

Система поддержки принятия решений для выбора оптимального постквантового механизма инкапсуляции ключей. Часть 1. Алгоритм принятия решений

А.В. Власенко¹, М.В. Евсюков¹, М.М. Путято¹, А.С. Макарян¹

¹Кубанский государственный технологический университет,
Краснодар, 350072, Российская Федерация
*Адрес для переписки: putyato.m@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.09.2020

Принята к публикации 22.10.2020.

Ссылка для цитирования: Власенко А.В., Евсюков М.В., Путято М.М., Макарян А.С. Система поддержки принятия решений для выбора оптимального постквантового механизма инкапсуляции ключей // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 70–79. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-70-79

Аннотация: Цель данного исследования – разработка системы поддержки принятия решений (СППР), которая позволит для заданных условий применения криптосистемы выбрать наиболее подходящую реализацию постквантового механизма инкапсуляции ключей. В первой части цикла статей задача выбора оптимальной реализации постквантового механизма инкапсуляции ключей представлена как многокритериальная. Определены методы принятия решения, которые наиболее применимы к рассматриваемой задаче. Синтезирован алгоритм работы СППР и спроектировано веб-приложение, реализующее ее функционал.

Ключевые слова: квантовый компьютер, информационная безопасность, постквантовая криптография, механизм инкапсуляции ключей, принятие решений, метод последовательных уступок, веб-приложение.

Введение

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в области разработки квантовых компьютеров – вычислительных устройств, использующих квантовые явления запутанности и суперпозиции для хранения и обработки информации. Эксплуатация данных физических явлений позволяет квантовым компьютерам демонстрировать экспоненциально большую производительность по сравнению с классическими компьютерами при решении некоторых видов задач [1].

Как известно, безопасность наиболее распространенных на данный момент асимметричных криптосистем опирается на вычислительную сложность задач факторизации и дискретного логарифмирования [2]. В связи с этим значительное влияние на криптографию оказывает квантовый алгоритм Шора, позволяющий выполнять решение данных задач с полиномиальной сложностью [3]. Практическим следствием эффективности алгоритма Шора является полная неспособность информационных систем, использующих современную асимметричную криптографию, противостоять угрозе взлома при помощи квантового компьютера.

Данная уязвимость широко используемых асимметричных криптосистем потребовала создания алгоритмов нового поколения, способных эффективно противостоять квантовому криптоанализу. В результате такие криптосистемы стали называться постквантовыми, а алгоритмы, основанные на сложности задач факторизации и дискретного логарифмирования, – классическими [4].

Оценивается, что для разработки полноценного квантового компьютера потребуется около 10 лет [5]. В связи с этим Национальный институт стандартов и технологий США (NIST, аббр. от англ. National Institute of Standards and Technology) в 2016 г. начал процесс выбора алгоритмов на роль постквантовых криптографических стандартов электронно-цифровой подписи, шифрования с открытым ключом и механизма инкапсуляции ключей (МИК). Стандарты NIST имеют определяющее значение для криптографии во всем мире, поскольку многие международные организации, включая крупные банки и удостоверяющие центры инфраструктуры открытых ключей, используют криптографические алгоритмы, стандартизованные NIST.

Процедура выбора и утверждения криптографических стандартов проводится NIST в форме прозрачного, открытого для заявок и комментариев соревнования. Всего на конкурс потенциальных постквантовых стандартов были поданы 82 заявки, 69 из которых удовлетворили основным требованиям NIST и были допущены в первый тур. Во второй тур конкурса успешно прошли 26 кандидатов, 17 из которых – алгоритмы асимметричного шифрования и инкапсуляции ключей, а 9 – схемы цифровой подписи [6].

В ходе первых двух туров конкурса NIST заявителям удалось усовершенствовать предложенные алгоритмы, а научному сообществу – подробно исследовать кандидатов, оценить их безопасность, производительность, а также применимость к различным сценариям использования.

В результате второго тура конкурса 16 алгоритмов прошли в третий тур. Оставшиеся в конкурсе кандидаты были разделены на 2 группы: «финалисты конкурса» и «альтернативные кандидаты», которые являются потенциальными кандидатами для будущих процессов стандартизации [7].

Несмотря на то, что задача NIST – выбрать определенные алгоритмы в качестве стандарта, в своих отчетах институт подчеркивает полезность дифференцированного подхода к выбору используемой криптосистемы. В зависимости от особенностей защищаемого канала связи, предпочтительным может быть использование алгоритма, отличного от того, который закреплен в стандарте [8].

Постановка задачи

Цель данного исследования – разработка системы поддержки принятия решений, которая позволит для заданных условий применения средства защиты выбрать наиболее подходящую реализацию постквантового криптографического алгоритма.

В рамках данного исследования предполагается сконцентрироваться на задаче выбора оптимального МИК, в связи со следующими причинами:

- МИК реализует наиболее востребованную функцию асимметричной криптографии – безопасную доставку ключевого материала для алгоритма шифрования с закрытым ключом;

- среди представленных в конкурсе NIST кандидатов большая часть криптосистем являются именно МИК [6], что, с одной стороны, усложняет выбор оптимального алгоритма, а с другой – предоставляет достаточно большое пространство оптимизации, чтобы сделать эффективным дифференцированный подход.

Обоснование преимуществ предлагаемого подхода

Оценка эффективности и сравнение постквантовых криптографических алгоритмов – важные задачи современной криптологии, о чем свидетель-

ствует большое количество научных работ, посвященных данной теме [4, 9, 10]. При этом, в большинстве исследований проводится прямое сравнение характеристик алгоритмов между собой с целью поиска лучшей криптосистемы. Преимущество такого подхода заключается в том, что он позволяет исследовать достоинства, недостатки, а также особенности применения криптосистем. В то же время существует ряд факторов, свидетельствующих об актуальности иного подхода к решению задачи выбора оптимального постквантового криптографического алгоритма, а именно – подхода, ориентированного на свойства и требования защищаемой информационной системы.

Во-первых, в ходе процесса стандартизации было выявлено большое количество алгоритмов, которые отвечают базовым требованиям производительности и достаточно безопасны для того, чтобы их можно было использовать на практике. Более того, они демонстрируют значительную вариативность характеристик от алгоритма к алгоритму, что предоставляет потенциальному пользователю широкое разнообразие альтернатив для выбора средства обеспечения информационной безопасности, которое наиболее полно отвечает требованиям объекта защиты [6].

Во-вторых, для каждого из представленных заявителями кандидатов существует несколько реализаций, каждая из которых задает собственный баланс между метриками безопасности и эффективности. Так, например, алгоритм «Round5» имеет 5 различных реализаций уровня безопасности AES-128 [11]. Данный фактор позволяет пользователю определить наиболее подходящую под требования конкретной информационной системы реализацию алгоритма. В дополнение к предыдущему фактору это значительно увеличивает количество и разнообразие альтернатив, доступных пользователю.

В-третьих, существует большое количество сценариев применения, в которых использование криптографии не попадает под строгие законодательные регуляции. Следовательно, становится целесообразным рассмотреть возможности эксплуатации алгоритмов, которые не закреплены в стандарте NIST, поскольку некоторые из них могут оказаться более предпочтительными при использовании для защиты конкретной информационной системы.

В-четвертых, изучение способности конкретных реализаций МИК соответствовать требованиям различных сценариев использования представляет исследовательскую ценность. Данные сведения важны для будущих процессов стандартизации, в частности, при принятии специальных стандартов, ориентированных на информационные системы определенного рода, а также локальных государственных стандартов, например, российских.

Описание задачи выбора оптимальной реализации постквантового МИК в терминологии теории принятия решений

Для решения задачи выбора оптимальной реализации постквантового МИК целесообразно воспользоваться теорией принятия решений.

Теория принятия решений – математическая дисциплина, изучающая методы эффективного поиска оптимальной альтернативы из доступного множества [12].

Частным случаем общей задачи принятия решения является задача многокритериального выбора. Данная задача состоит из следующих компонентов:

– $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ – конечное множество допустимых решений, из которого требуется выбрать одну или несколько альтернатив, в наибольшей мере соответствующих предъявляемым требованиям;

– $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ – конечное множество критериев оценки, т. е. совокупность значимых для конкретной задачи принятия решения характеристик рассматриваемых альтернатив;

– $a_i(X) = \{a_i(x_1), \dots, a_i(x_m)\}$, где $i = \overline{1, n}$ – векторные оценки каждой альтернативы по каждому критерию из множества X ;

– $R = \{R_{x_1}, \dots, R_{x_m}\}$ – множество бинарных отношений предпочтения «не хуже», определенное для значений каждого критерия $x \in X$ и позволяющее путем сравнения пары значений определить не менее предпочтительное из них; например, для $h, k \in x$, если $hR_x k$, то значение h критерия x не хуже значения k ; данные отношения обладают свойствами рефлексивности:

$$\forall h \in x \ hR_x h, \quad (1)$$

а также транзитивности:

$$\forall h, k, l \in x \ hR_x k \wedge kR_x l \Rightarrow hR_x l. \quad (2)$$

Кроме того, в рамках рассматриваемой задачи, для удобства дальнейших рассуждений целесообразно наложить следующие ограничения на отношения предпочтения:

– множество значений любого критерия x является линейно упорядоченным;

– каждое отношение R_x является отношением строгого порядка над множеством соответствующего ему критерия x :

$$\forall h, k \in x \ hR_x k \vee kR_x h, \quad (3)$$

из этого также следует, что отношение R_x антисимметрично:

$$\forall h, k \in x \ hR_x k \wedge kR_x h \Leftrightarrow k = h, \quad (4)$$

для удобства, будет использовано бинарное отношение «строго лучше» R_x^s , которое выполняется, для неравных значений критерия находящихся в

отношении R_x (R_x^s – нерефлексивная версия отношения «не хуже»).

Таким образом, представление задачи выбора оптимальной реализации постквантового МИК для заданных условий применения в терминологии теории принятия решений принимает следующий вид:

– в роли множества альтернатив A выступает множество из 91 реализаций постквантовых МИК, признанных безопасными в результате первого этапа конкурса NIST [7];

– в роли множества X критериев оценки выступает система критериев, предложенная в исследовании [13];

– в роли векторной оценки некоторого МИК $a_i(X)$ по списку критериев X выступают значения замеров производительности [14] количественных параметров и формализованные качественные характеристики, представленные в числовой форме;

– в роли бинарного отношения «не хуже» R_x для количественных критериев, таких как длина открытого ключа, выступает отношение «меньше или равно» (меньшая длина ключа предпочтительнее большей); для качественных критериев, таких как надежность, используется отношение «больше или равно» (большая надежность предпочтительнее меньшей);

– в роли бинарного отношения «строго лучше» R_x^s , соответственно, выступают отношения «меньше» или «больше», в зависимости от рассматриваемого критерия x .

Система критериев оценки постквантовых МИК

Как было отмечено выше, важной составляющей задачи принятия решения является множество критериев, используемых для оценки и сравнения альтернатив. В данном разделе приводится краткое изложение системы критериев оценки постквантовых МИК, сформулированных в исследовании [13]:

1) безопасность:

– *изученность* математической задачи, вычислительная сложность решения которой обеспечивает надежность криптосистемы; характеристика отражает временной срок, на протяжении которого математический аппарат, используемый криптосистемой, изучается в качестве механизма обеспечения криптографической стойкости: *задачи, предложенные более 20, более 10, менее 10 лет назад*;

– *доказательство* или убедительность теоретического обоснования надежности схемы; качество доказательства криптографической стойкости алгоритма вносит не меньший вклад в обеспечение уверенности в безопасности криптосистемы, чем выбор математического аппарата: *одно из наиболее убедительных доказательств; доказательство не содержит суждений, которые оцени-*

ваются экспертами NIST, как сомнительные; доказательство содержит суждения, истинность которых не вызывают у экспертов NIST полной уверенности;

– устойчивость МИК – тип криптоаналитических атак, к которым устойчив МИК: устойчивость к атакам на основе подобранного шифртекста; устойчивость к атакам на основе подобранного открытого текста;

2) ресурсоемкость:

– размер открытого ключа;

– размер шифртекста;

– производительность инкапсуляции – вычислительная эффективность операции зашифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора;

– производительность декапсуляции – вычислительная эффективность операции расшифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора;

– производительность генерации пары ключей – вычислительная эффективность операции расшифрования передаваемого симметричного ключа в циклах работы процессора.

Далее следует провести оценку каждой альтернативы, воспользовавшись выделенной системой критериев. Источником информации о производительности реализаций служат бенчмарки, выполненные различными группами исследователей [14]. Сведения о безопасности и гибкости реализаций получены в результате изучения комментариев NIST о заявках [6, 8, 11], а также информации об алгоритмах, предоставленной заявителями [12].

Для того, чтобы сведения о безопасности реализаций было возможно использовать в математических методах принятия решения, их необходимо привести к числовой форме. Поскольку такие свойства, как убедительность доказательства и изученность математического аппарата характеризуют степень доверия к предположению безопасности, на котором основана криптосистема, целесообразно консолидировать их в один параметр.

Применяемый способ формализации частных критериев «Изученность сложной задачи» и «Убедительность доказательства» приведен в таблице 1. Полученный числовой параметр называется «Доверие».

ТАБЛИЦА 1. Создание числового параметра «Доверие»

TABLE 1. Creating Numeral Parameter "Trust"

Изученность сложной задачи	Убедительность доказательства	Доверие
Консервативная	Отлично	6
Зрелая	Отлично	5
Зрелая	Хорошо	4
Зрелая	Требуется исследование	3
Новая	Хорошо	2
Новая	Требуется исследование	1

На основе общедоступной информации сформирована база данных о 91 реализации постквантовых МИК, прошедших во второй этап конкурса NIST, представленная в форме файла формата json. При этом, в структуру объекта json включены следующие поля:

«name» – название реализации;

«submission» – название заявки (алгоритма);

«subproblem» – разновидность сложной задачи реализацией;

«genAvg» – средние затраты на генерацию пары ключей;

«encAvg» – средние затраты на инкапсуляцию;

«decAvg» – средние затраты на декапсуляцию;

«sk» – длина секретного ключа;

«pk» – длина открытого ключа;

«ct» – длина шифртекста;

«securityLevel» – уровень безопасности реализации;

«ind» – разновидность защищенности от криптоанализа;

«trust» – упрощенная характеристика надежности, которая учитывает только изученность сложной задачи реализации;

«trustDetailed» – числовой параметр «доверие»;

«id» – уникальный идентификатор реализации в базе данных.

Поиск множества Парето-оптимальных альтернатив

В качестве первого шага алгоритма работы проектируемой советующей системы целесообразно выбрать один из наиболее широко используемых инструментов теории принятия решений, а именно понятие Парето-оптимальности.

Для выделения подмножества альтернатив, выбор которых является оптимальным в смысле Парето, вводится понятие бинарного отношения доминирования D на множестве альтернатив A [15].

Говорят, что альтернатива a_1 доминирует альтернативу a_2 по Парето, если оценки альтернативы a_1 по всем частным критериям не хуже, чем у a_2 и строго лучше хотя бы по одному критерию:

$$a_1 D a_2 \Leftrightarrow [\forall x \in X a_1(x) R_x a_2(x)] \wedge [\exists y \in X a_1(y) R_y^s a_2(y)]. \quad (5)$$

Действительно, если a_1 и a_2 находятся в отношении доминирования (именно в таком порядке), то выбор альтернативы a_1 более предпочтителен, чем выбор альтернативы a_2 . Тогда, используя данное отношение, из множества альтернатив A можно выделить подмножество A^{HD} тех альтернатив, которые не доминируются никакой другой альтернативой:

$$A^{HD} = \{a \in A | \nexists b \in A b D a\}. \quad (6)$$

Принцип оптимальности Парето утверждает, что рациональным является выбор любой альтернативы, входящей в множество A^{HD} . Множество A^{HD}

построено таким образом, что в него включены только те элементы области выбора, для которых не нашлось строго лучшей альтернативы [15].

Тем не менее, использование принципа оптимальности Парето зачастую недостаточно для принятия обоснованного решения. Во-первых, при большом порядке исходного множества A , множество A^{HD} , как правило, также оказывается слишком большим, чтобы его можно было считать успешным решением задачи оптимального выбора. Во-вторых, при сравнении двух произвольных альтернатив из множества A^{HD} друг с другом, каждая из них будет превосходить другую, как минимум, по одному параметру.

В связи с этим, после применения принципа оптимальности Парето требуется использование методов, учитывающих приоритет частных критериев, обусловленный условиями задачи.

Адаптация метода последовательных уступок под особенности задачи выбора оптимальной реализации МИК

В качестве основного метода принятия решения выбран метод последовательных уступок (далее – МПУ) [15], поскольку он обладает следующими преимуществами:

- позволяет принять во внимание все частные критерии, с учетом их приоритета;
- обеспечивает возможность компенсации значений одних критериев значениями других таким образом, чтобы это приводило к повышению общей оптимальности решения;
- позволяет использовать нечеткие данные для описания задачи.

МПУ применим в тех случаях, когда допустимо снижение оптимальности значений более важных критериев, в пользу повышения значений менее важных [15].

При использовании МПУ для описания требований конкретной задачи к характеристикам альтернатив выполняются следующие действия:

- частные критерии сортируются в порядке убывания их приоритета: наиболее важный критерий становится первым, а наименее важный – последним;
- для каждого критерия (кроме последнего) определяется размер уступки, которую допустимо совершить с целью улучшения значений менее приоритетных критериев.

После описания требований задачи происходит поиск лучшего решения по наиболее важному критерию. Затем ищется лучшее решение по следующему приоритетному критерию, при этом допускается потеря от лучшего значения первого критерия не более, чем на определенную величину, т. е. делается уступка. На третьем шаге решение оптимизируется по третьему критерию, при заданных максимальных допустимых уступках по

первому и второму критериям и т. д., пока не будет рассмотрен последний по важности критерий [15].

Важно заметить, что эффективное решение задачи выбора оптимального МИК не может быть ограничено рассмотрением таких просто формализуемых характеристик алгоритмов, как безопасность и производительность. Необходимо также учесть особенности алгоритмов, характеризующие гибкость их применения. В качестве примеров гибкости выступают возможность легкого встраивания алгоритма в существующие приложения, простота регулирования характеристик криптосистемы путем изменения ее параметров, а также другие особенности, которые не представляется возможным принять во внимание в рамках математических методов принятия решения.

Поскольку МПУ в его оригинальной форме нацелен на выбор единственной лучшей альтернативы [15], оптимальное, согласно методу, решение будет выбрано без учета неформализованных свойств алгоритма. Это может быть неприемлемо для лица, принимающего решение, поэтому МПУ целесообразно использовать не для выбора единственной оптимальной альтернативы, а для составления рейтинга лучших альтернатив по безопасности и производительности. Информацию о неформализованных свойствах алгоритма при разработке системы поддержки принятия решения в таком случае можно донести до лица, принимающего решение, в форме справочной информации.

Для повышения эффективности МПУ, применительно к рассматриваемой задаче, предлагается внести в него две модификации.

Во-первых, алгоритм будет выполняться итерационно. На каждой итерации, при помощи МПУ, в множестве Парето-оптимальных альтернатив находится наиболее оптимальное решение. Затем оно помещается в конец рейтинга решений и исключается из множества альтернатив. Алгоритм повторяется до тех пор, пока в множестве альтернатив не останется последний элемент.

Во-вторых, будет видоизменен сам механизм уступки. Пусть альтернатива b имеет худшее значение более приоритетного критерия x , но лучшее значение менее приоритетного критерия y по сравнению с альтернативой a . Тогда альтернатива b будет считаться более предпочтительной, чем альтернатива a при выполнении следующих условий:

- разность между $a(x)$ и $b(x)$ не превышает размер уступки, установленной для критерия x ;
- разность между $b(y)$ и $a(y)$ больше, чем размер уступки, установленной для критерия y .

Иными словами, сравнение альтернатив происходит с учетом отношения безразличия, которое задается для каждого критерия его уступкой.

Алгоритм работы системы поддержки принятия решений

Описанные в предыдущих разделах аспекты задачи выбора оптимального постквантового МИК позволяют сконструировать алгоритм работы системы поддержки принятия решений, который состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Ввод пользователем параметров, описывающих условия использования криптосистемы.

Шаг 2. Выбор из базы данных реализаций, предоставляющих требуемый уровень криптографической защиты.

Шаг 3. Фильтрация выбранных реализаций по соответствию целевому способу управления закрытым и открытым ключами.

Шаг 4. Нахождение множества Парето-оптимальных альтернатив.

Шаг 5. Определение приоритета частных критериев и размеров их уступок, в зависимости от введенного пользователем описания условий информационного взаимодействия.

Шаг 6. Применение адаптированного МПУ для построения рейтинга альтернатив.

Шаг 7. Вывод рейтинга реализаций постквантовых МИК, отсортированных в порядке убывания оптимальности по критериям «безопасность» и «производительность».

Кроме того, в системе поддержки принятия решения будет предусмотрена возможность ознакомления со справочной информацией об алгоритмах, включенных в рейтинг.

Пользовательский интерфейс системы поддержки принятия решений

Обоснованность рекомендаций системы поддержки принятия решений напрямую зависит от подробности описания условий применения криптографического алгоритма. В связи с этим необходимо выделить набор параметров, совокупность которых позволит достаточно точно смоделировать свойства ИС-абонентов и характер их взаимодействия. В то же время, важно не перегружать интерфейс избыточным количеством входных параметров, чтобы обеспечить его дружелюбность по отношению к пользователю.

Минимальная версия входного интерфейса приложения содержит следующие параметры.

Сценарий взаимодействия.

1) Формат связи: веб-сайт (протокол TLS с односторонней аутентификацией); VPN (протокол IPsec); приложение банка (протокол TLS с взаимной аутентификацией); мессенджер (протокол Signal).

2) Способ управления парой ключей: ключи не используются повторно; ключи используются повторно и открытый ключ не кешируется на стороне клиента; ключи используются повторно и открытый ключ кешируется на стороне клиента.

Характеристики целевого клиента.

1) Мощность клиента: смартфон; ноутбук; настольный компьютер.

2) Пропускная способность канала связи: низкая; средняя; высокая.

Характеристики целевого сервера.

1) Мощность сервера: смартфон; ноутбук; настольный компьютер.

2) Количество одновременных подключений: низкое; среднее; высокое.

Требуемый уровень безопасности соединения: AES-128; AES-256; AES-512.

Приведенная система входных параметров, описывающих информационное взаимодействие, представляется минимальной и поддерживает возможность детализации и расширения. Ввод формата связи позволяет определить используемый в ходе информационного обмена протокол. На подготовительном этапе адаптированного МПУ именно для конкретных протоколов определяется приоритет частных критериев и допустимые размеры уступок.

В целях упрощения интерфейса, рассматриваемые в рамках системы поддержки принятия решений разновидности вычислительных устройств, выступающих в роли клиентов и серверов, разделены на несколько условных категорий (в порядке увеличения производительности): смарткарта (токен); устройство интернета вещей; смартфон; микрокомпьютер; ноутбук; настольный компьютер; промышленный сервер.

Аналогично количеству подключений к серверу также определено в словесной форме. Однако предполагается указывать конкретное число подключений в интерфейсе ввода, в зависимости от мощности сервера. Интерфейс вывода рейтинга реализаций МИК и справочной информации – на рисунке 1.

Принцип определения приоритета критериев и размеров уступок при использовании адаптированного МПУ

Важнейшим аспектом использования МПУ является выбор приоритета частных критериев и размеров допустимых уступок. Именно на основании этих параметров делается вывод о предпочтительности той или иной альтернативы [15]. В данном разделе описывается принцип подбора этих параметров, в зависимости от данных, введенных пользователем.

С точки зрения абонентов, свойства канала связи, защищаемого при помощи криптографии, можно смоделировать, используя следующие метрики: безопасность канала связи; затраты на клиентские вычисления; затраты на серверные вычисления; затраты на передачу данных во время выполнения протокола.

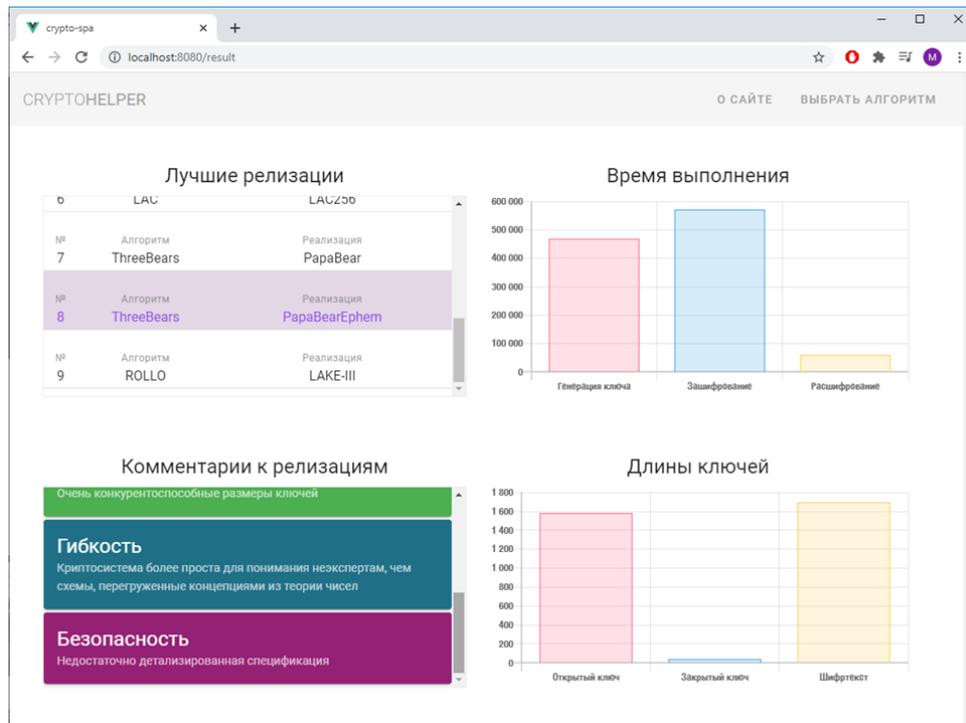


Рис. 1. Интерфейс вывода рейтинга реализаций МИК

Fig. 1. Implementation Rating Output Interface

Первая метрика из перечисленных отражает качество связи, а остальные – временные затраты на выполнение сеанса протокола. Именно эти метрики предполагается использовать в качестве частных критериев в МПУ. Таким образом, при подготовке информации для адаптированного МПУ, в зависимости от условий применения алгоритма, введенных пользователем, необходимо определить комбинацию характеристик постквантовых МИК, которая сможет служить в качестве значения для каждой из метрик канала связи.

В таблице 2 приведен используемый способ выразить метрики канала связи через характеристики реализаций постквантовых МИК в зависимости от способа управления ключами.

ТАБЛИЦА 2. Выражение метрик канала связи через свойства МИК

TABLE 2. Representing Datachannel Metrics via KEM's Properties

Метрика канала связи	Ключи не используются повторно	Ключи используются повторно	
		без кеширования на стороне клиента	с кешированием на стороне клиента
Безопасность	«trustDetailed» – для 3-го уровня безопасности, «trust» – в остальных случаях		
Клиентские вычисления	«encAvg»		
Серверные вычисления	«decAvg» + «genAvg»	«decAvg», «genAvg»	
Передача данных	«pk» + «ct»		«ct», «pk»

В данной таблице символ «+» означает сложение значений характеристик, а символ «,» значит, что характеристики учитываются отдельно, как

разные частные критерии. Таким образом, МПУ оперирует наибольшим числом критериев при повторном использовании ключей с кешированием на стороне клиента. Это связано с тем, что в таком случае генерация пары ключей сервером и передача открытого ключа клиенту происходят не в каждом сеансе протокола. Несмотря на это, даже при таких условиях параметрами «рк» и «genAvg» не всегда можно пренебречь. Поэтому рациональным представляется их рассмотрение в МПУ, как второстепенных свойств реализаций, оказывающих меньшее влияние на метрики канала связи, чем «ст» и «decAvg».

Приоритет частных критериев и размеры уступок определяются путем выполнения последовательности проверок описания условий применения криптосистемы, введенного пользователем. Предполагается по результату каждой проверки поместить в массив специальный объект, описывающий приоритет некоторой метрики и размер допустимой уступки. Далее адаптированный МПУ будет использовать данный массив в качестве источника данных о частных критериях, избегая повторной оптимизации по каждой из четырех метрик канала связи. При сравнении пары альтернатив будет указан размер уступки относительно той альтернативы, которая обладает меньшим значением рассматриваемой характеристики.

Кроме того, в сигнатуру объекта, из экземпляров которого состоит массив, предполагается добавить специальное поле – показатель приоритета (используется при сортировке массива объектов для адаптированного МПУ). Меньший показатель

приоритета означает большую важность оптимизируемой метрики.

В таблице 3 приведен пример последовательности условий, используемой для протокола TLS-handshake, применяемого без повторного использования ключей. Таблица является частным случаем общего набора условий для сценария применения, использующего TLS-handshake с односто-

ронней аутентификацией, применяемого без повторного использования ключей. Поэтому последнее условие всегда является истинным. Тем не менее, его наличие в последовательности условий целесообразно, поскольку оно задает приоритет и уступки для метрик «Передача данных» и «Серверные вычисления» для случая, когда эти метрики не были покрыты предыдущими условиями.

ТАБЛИЦА 3. Последовательность условий для протокола TLS-Handshake

TABLE 3. Sequence of Conditions for TLS-Handshake Protocol

Условие	Метрика канала связи	Характеристики МИК	Размер уступки	Показатель приоритета
Требуемый уровень безопасности – AES3	Безопасность	«trustDetailed»	1 уровень	1
Высокая нагрузка на сервер	Серверные вычисления	«decAvg» + «genAvg»	30 %	Если мощность сервера не превосходит мощность клиента – 11, иначе – 13
	Передача данных	«pk» + «ct»	100 %	Если канал связи обладает малой пропускной способностью – 12, иначе – 14
Мощность сервера не превосходит мощность клиента	Серверные вычисления	«decAvg» + «genAvg»	30 %	21
Канал связи обладает малой пропускной способностью	Передача данных	«pk» + «ct»	100 %	31
Требуемый уровень безопасности – AES2	Безопасность	«trust»	1 уровень	41
Малая мощность вычислительного устройства клиента	Клиентские вычисления	«encAvg»	30 %	51
Низкая нагрузка на сервер	Клиентские вычисления	«encAvg»	30 %	61
	Безопасность	«trust»	1 уровень	62
Не допускается повторное использование ключей	Серверные вычисления	«decAvg» + «genAvg»	30 %	71
	Передача данных	«pk» + «ct»	100 %	72

Заключение

В ходе первой части исследования произведен выбор алгоритмов принятия решения для разрабатываемой системы, выполнена адаптация МПУ в соответствии с особенностями рассматриваемой задачи. В качестве частных критериев для МПУ предложено использовать метрики канала связи, которые затем выражены через характеристики МИК. Сформирована база данных характеристик существующих реализаций механизмов инкапсуляции ключей. Выполнена практическая реализация прототипа поддержки принятия решения в форме

веб-приложения. Приведены доводы в пользу предлагаемого подхода к решению задачи выбора оптимального постквантового МИК.

Однако конкурентоспособность предложенного подхода требует научного обоснования. Для этого требуется провести практическую апробацию и оценку эффективности разработанной системы поддержки принятия решений с учетом существующих аналитических исследований в области постквантовой криптографии. Именно решению данных задач будет посвящена вторая часть цикла статей.

Список используемых источников

1. Гринштейн Д., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. М.: Изд-во Интеллект, 2012. 432 с.
2. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. М.: Изд-во Триумф, 2002. 815 с.
3. Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // SIAM Review. 1999. Vol. 41. Iss. 2. PP. 303–332. DOI:10.1137/S0036144598347011

4. Комарова А.В., Коробейников А.Г. Анализ основных существующих пост-квантовых подходов и схем электронной подписи // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 2(30). С. 58–68. DOI:10.21681/2311-3456-2019-2-58-68
5. Chen L., Jordan S., Liu Y., Moody D., Peralta R., Perlner R., et al. Report on Post Quantum Cryptography. Gaithersburg: NIST, 2016. 15 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8105
6. Alagic G., Alperin-Sheriff J., Apon D., Cooper D., Dang Q., Liu Y.-K., et al. Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process. Gaithersburg: NIST, 2019. 27 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8240
7. Moody D. Round2 of the NIST PQC “Competition” what was NIST thinking? // The 10th International Conference on Post-Quantum Cryptography (PQCrypto 2019), Chongqing, China, 8–10 May 2019. URL: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/Round-2-of-the-NIST-PQC-Competition-What-was-NIST/images-media/pqcrypto-may2019-moody.pdf> (дата обращения 03.11.2020)
8. Alagic G., Alperin-Sheriff J., Apon D., Cooper D., Dang Q., Kelsey J., et al. Status Report on the Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process. Gaithersburg: NIST, 2020. 39 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8309
9. Луценко М.С., Киян А.С., Кузнецова Т.Ю., Кузнецов А.А. Анализ и сравнительные исследования кодовых схем инкапсуляции ключей, представленные на конкурсе NIST PQC // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». 2018. № 193. С. 66–53. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/rvmnts_2018_193_8.pdf (дата обращения 14.09.2020)
10. Михайличенко Д.А., Егорова А.А. Основные направления развития постквантовой криптографии // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2. С. 41–45.
11. Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Post-Quantum Cryptography Standardization Process // NIST. URL: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/projects/post-quantum-cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016.pdf> (дата обращения 03.11.2020)
12. Baan H., Bhattacharya S., Fluhrer S., Garcia-Morchon O., Laarhoven T., Player R., et al. Round5: KEM and PKE based on (Ring) Learning with Rounding // Round5 submission to NIST PQC standardization. URL: https://round5.org/doc/Round5_Submission042020.pdf (дата обращения 03.11.2020)
13. Власенко А.В., Евсюков М.В., Пуцято М.М., Макарян А.С. Исследование реализации механизмов инкапсуляции ключей постквантовых криптографических методов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 4(48). С. 121–127. DOI:10.21672/2074-1707.2019.48.4.121-127
14. Kannwischer M.J., Rijneveld J., Schwabe P., et al. Testing and Benchmarking NIST PQC on ARM Cortex-M4 // Radboud University. URL: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Events/Second-PQC-Standardization-Conference/documents/accepted-papers/kannwischer-pqm4.pdf> (дата обращения 14.09.2020)
15. Горбунов В.М. Теория принятия решений: учебное пособие. Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. 67 с.

* * *

Decision Support System for Finding an Optimal Postquantum Key Encapsulation Mechanism

Part 1. Decision Making Algorithm

A. Vlasenko¹, M. Evsyukov¹, M. Putyato¹, A. Makaryan¹

¹Kuban State Technological University,
Krasnodar, 350072, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-70-79

Received 21st September 2020

Accepted 22nd October 2020

For citation: Vlasenko A., Evsyukov M., Putyato M., Makaryan A. Decision Support System for Finding an Optimal Postquantum Key Encapsulation Mechanism. Part 1. Decision Making Algorithm. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):70–79. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-70-79

Abstract: *The purpose of this study is to develop a decision support system that will allow, for the given conditions of using the cryptosystem, to choose the most appropriate implementation of the post-quantum key encapsulation mechanism. In the first part of the series of articles, the problem of choosing the optimal implementation of the post-quantum key encapsulation mechanism is presented as a multi-criteria choice problem. Decision-making methods that are best applicable to the problem under consideration have been determined. An algorithm for solving the problem has been developed. A web application has been designed that implements the functionality of a decision support system.*

Keywords: quantum computer, information security, postquantum cryptography, key encapsulation mechanism, decision-making, asymmetric cryptography, web-application.

References

1. Grinshteyn D., Zayonz A. *Quantum Challenge. Modern Research of Quantum Mechanic's Basics*. Moscow: Intellect Publ.; 2012. 432 p. (in Russ.)
2. Schneier B. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code*. Moscow: Triumph Publ.; 2002. 815 p. (in Russ.)
3. Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. *SIAM Review*. 1999;41(2):303–332. DOI:10.1137/S0036144598347011
4. Komarova A.V., Korobeynikov A.G. The Analysis of Existing Post-Quantum Approaches and Electronic Signature Schemes. *Voprosy kiberbezopasnosti (Cybersecurity issues)*. 2019;2(3):58–68. (in Russ.) DOI:10.21681/2311-3456-2019-2-58-68
5. Chen L., Jordan S., Liu Y., Moody D., Peralta R., Perlner R., et al. *Report on Post Quantum Cryptography*. Gaithersburg: NIST; 2016. 15 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8105
6. Alagic G., Alperin-Sheriff J., Apon D., Cooper D., Dang Q., Liu Y.-K., et al. *Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process*. Gaithersburg: NIST; 2019. 27 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8240
7. Moody D. Round2 of the NIST PQC “Competition” what was NIST thinking? *The 10th International Conference on Post-Quantum Cryptography (PQCrypto 2019), Chongqing, China, 8–10 May 2019*. Available from: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Presentations/Round-2-of-the-NIST-PQC-Competition-What-was-NIST/images-media/pqcrypto-may2019-moody.pdf> [Accessed 3rd November 2020]
8. Alagic G., Alperin-Sheriff J., Apon D., Cooper D., Dang Q., Kelsey J., et al. *Status Report on the Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process*. Gaithersburg: NIST; 2020. 39 p. DOI:10.6028/NIST.IR.8309
9. Lucenko M.S., Kiyani A.S., Kuznetsova T.U., Kuznetsov A.A. Analysis and Comparative Studies of Key Encapsulation Code Schemes Presented in the Competition NIST PQC. *All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Journal “Radiotekhnika”*. 2018;193. (in Russ.) Available from: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/rvmnts_2018_193_8.pdf [Accessed 14th September 2020]
10. Mihaylichenko D.A., Egorova A.A. Main Areas of Post Quantum Cryptography. *Proceedings of the Rostov State Transport University*. 2016;2:41–45. (in Russ.)
11. Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Post-Quantum Cryptography Standardization Process. *NIST*. Available from: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/projects/post-quantum-cryptography/documents/call-for-proposals-final-dec-2016.pdf> [Accessed 3rd November 2020]
12. Baan H., Bhattacharya S., Fluhrer S., Garcia-Morchon O., Laarhoven T., Player R., et al. *Round5: KEM and PKE based on (Ring) Learning with Rounding*. Available from: https://round5.org/doc/Round5_Submission042020.pdf [Accessed 3rd November 2020]
13. Vlasenko A.V., Evsyukov M.V., Putyato M.M., Makaryan A.S. Research of Key Encapsulation Mechanisms Based on Postquantum Cryptographic Algorithms. *Caspian journal: Management and High Technologies*. 2019;4(48):121–127. (in Russ.) DOI:10.21672/2074-1707.2019.48.4.121-127
14. Kannwischer M.J., Rijneveld J., Schwabe P., et al. *Testing and Benchmarking NIST PQC on ARM Cortex-M4*. Available from: <https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Events/Second-PQC-Standardization-Conference/documents/accepted-papers/kannwischer-pqm4.pdf> [Accessed 14th September 2020]
15. Gorbunov V.M. *Decision Theory*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ.; 2010. 67 p. (in Russ.)

Сведения об авторах:

**ВЛАСЕНКО
Александра Владимировна**

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Компьютерных технологий и информационной безопасности» Кубанского государственного технологического университета, alex.vlasenko@list.ru

**ЕВСЮКОВ
Михаил Витальевич**

аспирант кафедры «Компьютерных технологий и информационной безопасности» Кубанского государственного технологического университета, michael.evsyukov@gmail.com

**ПУТЯТО
Михаил Михайлович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Компьютерных технологий и информационной безопасности» Кубанского государственного технологического университета, putyato.m@gmail.com

**МАКАРЯН
Александр Самвелович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Компьютерных технологий и информационной безопасности» Кубанского государственного технологического университета, msanya@yandex.ru

Предобработка текстов электронных писем в задаче обнаружения спама

С.В. Корелов^{1*}, А.М. Петров¹, Л.Ю. Ротков², А.А. Горбунов²

¹Национальный координационный центр по компьютерным инцидентам,
Москва, 107031, Российская Федерация

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижегород, 603950, Российская Федерация

*Адрес для переписки: korelovsv@cert.gov.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 31.08.2020

Принята к публикации 23.11.2020.

Ссылка для цитирования: Корелов С.В., Петров А.М., Ротков Л.Ю., Горбунов А.А. Предобработка текстов электронных писем в задаче обнаружения спама // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 80–90. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-80-90

Аннотация: *Функционирование практически любой организации в той или иной степени зависит от того, насколько надежно защищены ее информационные ресурсы от различных угроз безопасности информации, одной из которых является спам. При этом было совершено множество попыток раз и навсегда решить проблему его обнаружения. В данной предметной области постоянно ведутся исследования. По их результатам предлагаются и реализуются на практике различные подходы. Ранее авторами предложена модель электронных писем, учитывающая содержание электронных писем, которое зачастую меняется в зависимости от выполняемых пользователями задач и меняющихся их информационных потребностей. В настоящей статье обсуждается вопрос предобработки текстов электронных писем в задаче обнаружения спама с использованием модели электронных писем, полученной на основе генетического подхода к формированию математических моделей текстов, зарекомендовавшего себя для решения различных задач.*

Ключевые слова: *информационная безопасность, спам, обнаружение, модель электронного письма, генетический подход, генетическая модель, электронная почта, электронные почтовые сообщения, электронные письма, предобработка текста.*

Введение

В условиях интенсивного развития различных сфер деятельности государства и общества использование передовых информационных технологий становится одним из наиболее важных, а часто и решающим фактором, определяющим эффективность всех уровней управления.

Наряду с заметным в последние годы ростом популярности использования таких форм онлайн-коммуникаций, как мессенджеры и социальные сети, электронная почта широко применяется для деловой переписки, а также является обязательным требованием для использования различных электронных услуг и сервисов. По оценкам The Radicati Group, Inc. [1], в 2020 г. электронной почтой пользуется половина населения Земли; при этом их количество до конца 2020 г. превысит отметку в 4 млрд. с прогнозом более 4,4 млрд. в 2024 г.

Однако столь высокая популярность электронных писем сопровождается рядом проблем. Одним из ставших классическими бизнес-рисков, связан-

ных с использованием электронных почтовых сообщений, является спам. На сегодняшний день спам является настоящей проблемой для мирового потока электронных писем в частности и трафика в общем. Средняя доля спама в почтовом трафике в 2018 г. составила 52,48 % [2], а в 2019 – 56,51 % [3]. Спам является причиной различных негативных последствий для его получателей, а также серьезного негативного эффекта для мировой экономики [4–10].

Представляется очевидным, что обнаружение спама является не просто желательной, а острой необходимостью и неотъемлемой частью общей системы безопасности информационных систем. Необходимо отметить, что невозможно сформировать универсальное описание спамовых писем, поскольку возможна ситуация, когда в зависимости от интересов конкретного пользователя электронное письмо может быть отнесено к спамовым или легальным. Несмотря на это, ученые и специалисты по всему миру продолжают исследования в области обнаружения спама в поисках на 100 %

эффективного решения [8]. Однако из-за своей сложности и сложности задача обнаружения спама не имеет единственно верного и универсального решения [4, 5].

Целью данной работы является оценка возможности повышения эффективности применения предложенной в [11] модели электронных писем в задаче обнаружения спама.

Краткий обзор современных исследований в области обнаружения спама

Электронные письма состоят из различных частей и частей, на основании которых можно выделить следующие два наиболее распространенных подхода для обнаружения спама [6]: базирующиеся на заголовках писем и их содержимом. Первый из них обладает недостатками, позволяющими отправителям спама достаточно легко обходить разработанные на его основе механизмы фильтрации спамовых сообщений [6, 12]. Успех методов машинного обучения в классификации текстов обратил внимание исследователей на обучающие алгоритмы для решения задачи обнаружения спама [12], в основе которых лежит второй подход. Его применение представляется более эффективным [6, 8].

Многие исследования последних лет в области обнаружения спама основываются именно на подходе анализа содержимого электронных писем и посвящены вопросу оценки эффективности применения в различных условиях методов машинного обучения в задаче обнаружения спама [например, 4, 6, 7, 10, 13], а также вопросу отбора признаков электронных писем.

Среди методов машинного обучения имеется большое количество разнообразных эффективных алгоритмов и их модификаций, используемых в задаче обнаружения спама. Они включают такие распространенные методы, как, например, наивный Байесовский классификатор [например, 6, 8, 9, 13–16], дерево решений [например, 17, 18], опорных векторов [например, 13, 14, 16, 19], k -ближайших соседей [16, 20], искусственные иммунные системы [5, 21, 22], искусственные нейронные сети [23–28] и другие. В качестве базовых признаков электронных писем в задаче их классификации в основном используются слова (и/или их сочетания) и рассчитываемые различными способами их веса [например, 5–9, 24, 25].

Методы машинного обучения позволяют автоматически строить списки слов с их весами на основе знания спамовых и легальных писем. Неправильная же классификация легальных писем как спамовых (ложноположительный результат) и неправильная классификация спамовых писем как легальных (ложноотрицательный результат) ведет к издержкам [4]. При этом отправители спама вся-

чески стараются снизить вероятность обнаружения их писем путем использования слов, присущих легальным письмам.

Основываясь на изложенном, авторы приходят к выводу, что в исследованиях последних лет, посвященных решению задачи обнаружения спама, как правило, используются одни и те же методы классификации или предлагаются их модификации. В то же время большое внимание уделяется вопросу выделения и отбора признаков электронных писем и оценке эффективности обнаружения спама с применением известных методов классификации, но с использованием различных признаков (и/или их сочетаний).

Также авторы приходят к выводу о том, что «борьба» исследователей не останавливается [29] и идет буквально за каждые 0,01 % точности и полноты обнаружения спама. При этом продолжает оставаться актуальным вопрос выбора эффективных (с точки зрения качества обнаружения спама) признаков электронных почтовых сообщений для процесса классификации, что требует разработки новых подходов к определению и выделению признаков электронных писем и оценки эффективности их применения.

В связи с актуальностью и важностью данного направления исследований в задаче обнаружения спама в [11] авторами для обнаружения спама предложена, обоснована и описана генетическая модель электронных писем, позволяющая специфическим способом выделять текстовые отрезки электронных писем, являющиеся отражением их отличительных признаков:

$$\Psi_{el} = \langle gens, Gen_Code \rangle. \quad (1)$$

Ключевой особенностью данной модели является то, что она оперирует с преобразованными в числовой вектор данными, полученными из исходных текстов электронных писем.

В качестве параметров модели электронных писем, оказывающих влияние на выделение текстовых отрезков писем, являющихся отражением их отличительных признаков, авторами в [30] обоснованы:

q – количество числовых кодов, сопоставляемых символам текста, в функции преобразования писем в числовой вектор;

Δt – шаг выборки символов текста в функции преобразования писем в числовой вектор;

n – длина «генератора» (последовательность, порождающая «ген»).

Там же продемонстрированы корректность и практическая применимость данной модели для обнаружения спама (классификации электронных писем на спамовые и легальные), а также обоснован выбор численного значения параметра n модели электронных писем.

Для методов машинного обучения важным является предварительная обработка данных [4, 7–9]. В связи с этим настоящая статья посвящена исследованию вопроса применения в задаче обнаружения спама предложенной модели (1) совместно с предварительной обработкой текстов электронных писем.

Краткий анализ предметной области

В машинном обучении важную роль играют непосредственно сами данные, а точнее – их подготовка [4, 7–9, 31, 32]. На практике электронные письма поступают от разных отправителей и состояются ими с использованием различных почтовых клиентов в различных форматах. При этом они могут содержать различного рода «шумы»: ошибки и искажения различной природы, незначимые с точки зрения содержания (смысла) слова и символы, а также неинформативные элементы, например, спецсимволы HTML, скрипты, рекламные вставки и т. п. [7, 9, 33–35]. Такие «шумы» негативно влияют на качество непосредственно самих данных для анализа и могут снизить полноту и точность классификации. Поэтому первым значимым этапом в задачах интеллектуального анализа текстов является их предобработка [7–9, 24, 33–35], представляющая собой процесс их очистки и подготовки к классификации [32].

Процесс предобработки текста можно разбить на отдельные операции; при этом выполняемые в ходе них действия обрабатывают текст различными способами. В качестве основных способов предобработки текстовых данных можно выделить следующие [31, 32, 34–37]:

- 1) удаление неинформативных с точки зрения содержания (смысла) элементов;
- 2) удаление стоп-символов (например, знаков препинания);
- 3) удаление стоп-слов;
- 4) удаление повторяющихся символов пробелов, повторяющихся (всех) символов табуляции, повторяющихся (всех) символов переносов строк;
- 5) перевод всех букв в верхний или нижний регистр;
- 6) лемматизация;
- 7) токенизация;
- 8) стемминг (от англ. stemming – находить происхождение).

При этом нельзя заранее утверждать, какие из перечисленных способов или их комбинаций однозначно при любых условиях приводят к улучшению результатов классификации применительно к конкретной решаемой задаче [36]. В [32, 36, 37] экспериментально продемонстрировано, что подобранные применительно к конкретным текстовым данным и решаемой задаче способы предобработки могут улучшить качество классификации.

Обобщая изложенное, авторы приходят к выводу, что использование предобработки электронных писем в модели электронных писем (3) также может повысить полноту и точность классификации в задаче обнаружения спама. И поскольку в модели применяется специфический способ выделения значимых характеристик, среди указанных актуальными в ее контексте являются 2–5 и их сочетания.

При этом необходимо отметить, что, по большому счету, ни один из них не оказывает существенного влияния на содержание (смысл) писем (кроме, вероятно, стоп-слов). Так, переносы строк необходимы для выделения мыслей и придания логической структуры тексту. Знаки препинания в основном предназначены для формирования логической связи. А приведение всех букв к одному регистру позволяет избежать различий при написании одних и тех же слов, стоящих первыми в предложениях и в других позициях.

Выбор же конкретных способов предобработки в задаче обнаружения спама с использованием модели электронных писем (1) целесообразно осуществить при проведении экспериментальных исследований [37].

Таким образом, проведение исследования вопроса применения в задаче обнаружения спама предложенной модели (1) с включением в ее состав процедуры предварительной обработки текстов электронных писем, а также оценка получаемых при этом результатов обнаружения в сравнении с результатами без применения предварительной обработки является актуальным.

Экспериментальная часть

В результате правительственного расследования по факту банкротства компании Enron в начале 2000-х годов в открытом доступе стали доступны более 600 тысяч электронных писем ее сотрудников [15]. Ценность этого массива заключается в том, что все письма написаны людьми и представляют собой реальное человеческое общение на различные темы. На протяжении последних лет эти письма в том или ином объеме использовались исследователями в области обнаружения спама.

Для проведения эксперимента был использован основывающийся на этих письмах набор [38], сформированный и описанный в [15] с дополнительными изменениями в соответствии с [30]). Легальные письма в нем представлены упорядоченными по имени файла электронными письмами шести сотрудников компании Enron, почтовые ящики которых содержали достаточно большое количество электронных писем. Спамовые письма представляют собой письма из корпуса SpamAssassin, проекта HoneyPot, из коллекции Bruce Guenter, а также были собраны Georgios Paliouras [15]. Дубликаты среди них не удалялись, поскольку они являлись частью

естественного потока всех электронных писем (легальных и спамовых) на почтовый ящик конкретного отдельно взятого пользователя. Также авторами [15] осуществлена предварительная обработка писем – удалены в следующем объеме:

- сообщения, отправленные владельцем почтового ящика самому себе;
- все html-теги и html-заголовки (сохранены только темы писем и их содержание);
- спамовые сообщения, содержащие символы нелатинского набора.

Таким образом, для проведения эксперимента сформирован набор англоязычных писем, состоящий из 6 групп легальных писем общим количеством 16100 писем и 6 групп спамовых писем общим количеством 16420 писем. Их тексты содержат строчные и прописные буквы, цифры, знаки препинания и другие символы. Для целей настоящего эксперимента дополнительно из всех писем были удалены строки с их темами, после чего из набора были удалены письма с нулевой длиной (т.е. изначально содержащие только тему). Дополнительно проведенный анализ их содержимого показал следующее:

- практически все буквы переведены в нижний регистр (за исключением некоторых спамовых писем, в которых содержатся единожды встречающаяся буква «В» в слове «Вinагу»);
- письма не содержат знаков табуляции.

Также для эксперимента был сформирован набор русскоязычных электронных писем, состоящих из 3 групп рассылок порталов securitylab.ru, security.nnov.ru и хакер.ru (за период с 28 апреля 2009 г. по 4 марта 2011 г.) общим количеством 1242 письма и 2 группы спамовых писем, поступивших на индивидуальные почтовые адреса двух различных адресатов одного почтового сервера в зоне .ru, общим количеством 3215 писем. Из писем удалены все html-теги и html-заголовки (сохранено только их содержание). Их тексты содержат строчные и прописные буквы, цифры, знаки препинания и другие символы. Дополнительно проведенный анализ их содержимого показал следующее:

- письма содержат повторяющиеся пробелы, в особенности, их большое число содержится в письмах информационной рассылки портала security.nnov.ru;
- письма содержат небольшое число знаков табуляции, включая повторяющиеся;
- письма содержат строчные и прописные кириллические буквы, в отдельных письмах присутствуют латинские буквы.

С учетом изложенного в разделе «Краткий анализ предметной области» для эксперимента определены способы предобработки и их сочетания, которые перечислены ниже по пунктно.

п. 1. Без предобработки (далее по тексту при упоминании способов предобработки используется нумерация в соответствии с данным списком).

п. 2. Удаление:

а) стоп-символов (под стоп-символами в настоящей статье понимаются одиночные небуквенные символы, в качестве которых заданы следующие: «-», «—», «`», «^», «~», «<», «=», «>», «|», «_», «,», «;», «:», «!», «?», «/», «.»», «'», «"», ««», «»», «(», «)», «[», «]», «{», «}», «@», «\$», «*», «\», «&», «#», «%», «+», «№»); в общем случае стоп-символы являются подмножеством более общего понятия стоп-слов);

б) стоп-слов (в качестве англоязычных стоп-слов заданы слова из перечня http://www.antula.ru/noise-word_3.htm, в качестве русскоязычных – частицы, суффиксы, глаголы, причастия, предлоги, союзы, междометия, вводные слова, местоимения и некоторые сочетания букв из перечней http://www.antula.ru/noise-word_2.htm и <https://russkiyazyk.ru/chasti-rechi/spisok-mezhdometiy.html>);

с) всех символов табуляции;

д) всех переносов строк с заменой на пробел;

е) всех пробелов.

п. 3. Перевод всех буквенных символов в верхний регистр:

а) тождественно п. 3;

б) п. 3 + удаление стоп-символов;

с) п. 3 + удаление всех переносов строк с заменой на пробел;

д) п. 3 + удаление всех пробелов;

е) п. 3 + удаление стоп-символов и всех переносов строк с заменой на пробел;

ф) п. 3 + удаление стоп-символов и всех пробелов;

г) п. 3 + удаление всех переносов строк с заменой на пробел и все пробелы;

h) п. 3 + удаление стоп-символов и всех переносов строк с заменой на пробел, а также всех пробелов.

В качестве значений параметров модели электронных писем заданы следующие:

$$q = 256;$$

$\Delta t = 1$ – шаг дискретизации равен одному символу;

$$n = 1 \dots 2 [30].$$

Таким образом, с учетом изложенного, модель (1) примет следующий вид:

$$\Psi_{el} = \langle Prepr, gens, Gen_Code \rangle, \quad (2)$$

где *Prepr* – процедура предобработки.

Эксперимент и оценка его результатов проводились аналогично описанным в [30]. Для каждой категории (класса) писем (легальные и спамовые) каждой группы писем были рассчитаны наборы «генов» и определен коэффициент принадлежности каждого письма к легальным или спамовым письмам, за который принято суммарное количе-

ство содержащихся в письме «генов», встретившихся в соответствующих категориях всех групп.

Решение о принадлежности письма к спамовым или легальным принималось с использованием простейшего решающего правила – по принципу большего суммарного количества «генов» соответствующей категории. При этом для классифицируемого письма расчет набора «генов» его группы велся только для писем, стоящих перед ним в списке, что позволило частично имитировать процесс получения писем адресатом.

В качестве мер оценки результатов эксперимента использованы полнота, точность и F -мера обнаружения (классификации) [39–43].

Под полнотой R обнаружения спамовых и легальных писем будем понимать соотношение числа всех верно классифицированных электронных писем к числу электронных писем, которые должны были быть отнесены к тому или иному классу:

$$R = \frac{N_{corr_a}}{N_{corr_a} + N_{incorr_r}}, \quad (3)$$

где N_{corr_a} – количество электронных писем, корректно отнесенных к заданной категории (истинно положительные результаты или TP, аббр. от англ. True Positive); N_{incorr_r} – количество электронных писем, некорректно признанных не принадлежащими заданной категории (ложноотрицательные результаты или FN, аббр. от англ. False Negative).

Иначе, полнота характеризует потери процесса классификации электронных писем. Как следует из представленной формулы, чем выше значение полноты, тем меньше потери правильных классификаций. Таким образом, R определяет способность процесса классификации электронных писем обнаруживать заданный класс вообще.

Под точностью P обнаружения спамовых и легальных писем будем понимать соотношение числа верно классифицированных электронных писем к числу всех классифицированных электронных писем как принадлежащих к тому или иному классу:

$$P = \frac{N_{corr_a}}{N_{corr_a} + N_{incorr_a}}, \quad (4)$$

где N_{incorr_a} – количество электронных писем, некорректно признанных принадлежащими заданной категории (ложноположительные результаты или FP (аббр. от англ. False Positive)).

Иначе, точность можно интерпретировать как долю объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющимися положительными. Таким образом, P определяет способность процесса классификации электронных писем правильно обнаруживать заданный класс (долю правильных классификаций), т. е. чем лучше выстроен процесс классификации,

тем меньше будет неверно классифицированных электронных писем как принадлежащих заданному классу.

Безусловно, чем выше полнота и точность, тем лучше. Но очевидно, что достичь максимальной полноты и точности одновременно невозможно. В связи с этим для выбора лучшего варианта классификации использована сбалансированная F -мера обнаружения (классификации) [40–44] спамовых и легальных писем, которая позволяет объединить полноту и точность в агрегированную величину для оценки, представляющую собой их среднее гармоническое:

$$F = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что F -мера достигает максимума при полноте и точности, равными единице, и близка к нулю, если один из аргументов близок к нулю. Таким образом, F -мера позволяет определить наилучший процесс классификации электронных писем с учетом одновременно полноты и точности, т. е. чем лучше выстроен процесс классификации, тем больше значение F -меры.

Результаты эксперимента на англоязычных и русскоязычных письмах округлены до сотых долей процента по правилам простого математического округления и представлены в таблице 1, а значения F -меры в виде гистограмм приведены на рисунках 1а и 1б, соответственно.

В связи с наличием повторяющихся пробелов в письмах информационной рассылки портала security.nnov.ru эксперимент был дополнен исследованиями с предварительным удалением повторений пробелов. Их результаты также приведены в таблице 1 и на рисунке 1с.

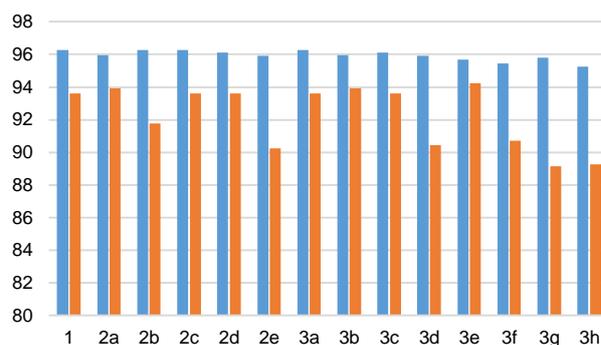
Как видно из таблицы (где в желтых клетках – примерно равно значению «без предобработки», в зеленых – превышение значения «без предобработки»), удаление повторений пробелов приводит к улучшению результатов обнаружения при использовании не всех способов предобработки. Однако основываясь на описании модели [11] и полученных результатах, можно предположить, что повторения символов пробелов, табуляции и переносов строк могут ухудшать результаты обнаружения, поскольку создают короткие («мусорные», с точки зрения модели) «гены».

Также повторения таких знаков могут быть созданы умышленно с целью возможного подстраивания спамовых писем под легальные (особенно, форматированные письма различных рассылок). Это дает основания утверждать целесообразность осуществлять предварительную очистку (предобработку) писем от повторений указанных символов (знаков) с целью обеспечения независимости процесса классификации с применением модели (1) от наборов писем (даже с учетом возможного небольшого снижения результатов обнаружения).

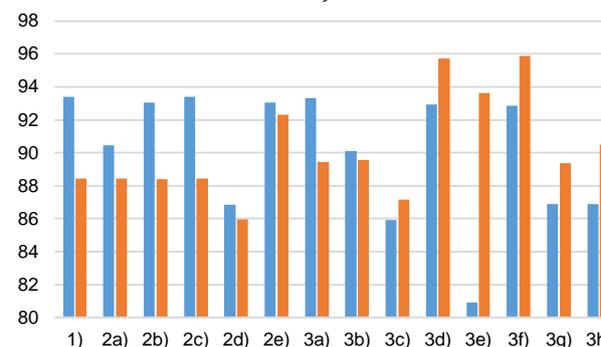
ТАБЛИЦА 1. Результаты эксперимента на наборе электронных писем, %

TABLE 1. Experimental Result on the Electronic Letters Set, %

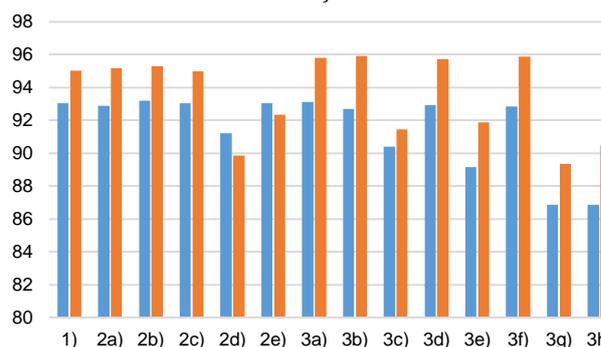
№ п.	R		P		F-мера	
	n = 1	n = 2	n = 1	n = 2	n = 1	n = 2
<i>англоязычных</i>						
1	95,92	90,94	96,63	96,44	96,27	93,61
2a	95,57	91,46	96,38	96,50	95,97	93,91
2b	95,89	87,44	96,66	96,56	96,28	91,77
2c	95,92	90,94	96,63	96,44	96,27	93,61
2d	95,78	91,08	96,48	96,31	96,13	93,62
2e	95,47	85,38	96,40	95,72	95,93	90,26
3a	95,92	90,94	96,63	96,44	96,27	93,61
3	95,57	91,46	96,38	96,50	95,97	93,91
3c	95,78	91,08	96,48	96,31	96,13	93,62
3d	95,47	85,38	96,40	96,18	95,93	90,46
3e	95,16	92,11	96,24	96,46	95,70	94,23
3f	94,97	86,04	95,94	95,93	95,45	90,71
3g	95,26	83,57	96,36	95,55	95,81	89,16
3h	94,68	84,07	95,80	95,16	95,24	89,28
<i>русскоязычных</i>						
1)	93,04	85,62	93,74	91,45	93,39	88,44
2a)	90,04	85,78	90,87	91,31	90,45	88,45
2b)	92,73	85,44	93,34	91,56	93,03	88,39
2c)	93,02	85,62	93,74	91,47	93,38	88,45
2d)	86,29	81,62	87,39	90,79	86,84	85,96
2e)	92,53	90,89	93,54	93,82	93,03	92,33
3a)	92,95	87,03	93,71	92,03	93,33	89,46
3b)	89,68	87,37	90,57	91,86	90,12	89,56
3c)	85,48	83,35	86,37	91,32	85,93	87,16
3d)	92,37	92,37	93,48	99,32	92,92	95,72
3e)	80,50	89,68	81,36	97,94	80,93	93,63
3f)	92,42	92,87	93,32	99,11	92,86	95,89
3g)	86,31	82,10	87,45	98,07	86,88	89,37
3h)	86,09	83,47	87,66	98,77	86,87	90,48
<i>с предварительным удалением повторений пробелов</i>						
1)	92,64	91,56	93,48	98,74	93,06	95,02
2a)	92,53	91,95	93,28	98,70	92,90	95,20
2b)	92,87	91,65	93,56	99,22	93,21	95,29
2c)	92,69	91,52	93,42	98,77	93,05	95,00
2d)	90,85	83,67	91,61	97,08	91,22	89,88
2e)	92,53	90,89	93,54	93,82	93,03	92,33
3a)	92,78	92,78	93,51	99,04	93,14	95,81
3b)	92,33	93,25	93,08	98,76	92,70	95,93
3c)	89,88	85,98	90,92	97,68	90,40	91,46
3d)	92,37	92,37	93,48	99,32	92,92	95,72
3e)	88,67	86,87	89,68	97,51	89,17	91,88
3f)	92,42	92,87	93,32	99,11	92,86	95,89
3g)	86,31	82,10	87,45	98,07	86,88	89,37
3h)	86,09	83,47	87,66	98,77	86,87	90,48



a)



b)



c)

Условные обозначения и сокращения:

■ – n = 1; ■ – n = 2; 1, 2a, ..., 3h – способы предобработки

Рис. 1. Значения F-меры на наборе электронных писем, %: а) англоязычных, б) русскоязычных и в) русскоязычных с предварительным удалением повторений пробелов

Fig. 1. F-Measure Values on the Electronic Letters Set, %: a) of the English-Language, b) of the Russian-Language & c) of the Russian-Language with Pre-Deleting Repetitions of Spaces

Обобщая полученные результаты эксперимента на англоязычных и русскоязычных письмах, авторы приходят к следующим выводам.

Во-первых, применение предобработок текстов англоязычных электронных писем в задаче обнаружения спама с применением модели (1) в целом не приводит к существенному изменению результатов обнаружения в сравнении с результатами без предобработок.

Во-вторых, применение «атомарных» способов 2a–3a предобработки текстов русскоязычных электронных писем в задаче обнаружения спама с применением модели (1) также в целом не приводит к

существенному изменению результатов обнаружения в сравнении с результатами без предобработок. Вместе с тем, следует отметить существенное улучшение точности обнаружения (более 99 %) при использовании способов предобработки 3d и 3f (совместное использование «атомарных»). Также точность обнаружения превышает 97 % практически при использовании любых предобработок при условии предварительного удаления повторов пробелов.

В-третьих, имеется зависимость результатов обнаружения от конкретных применяемых способов предобработки в совокупности со значениями ее параметров, что коррелирует с опубликованными в [19, 32, 37] выводами.

Также целесообразно отметить, что предложенная авторами модель электронных писем с использованием описанного решающего правила позволяют достичь неплохих результатов, в целом не сильно уступающих результатам, полученным в некоторых аналогичных исследованиях, а иногда и немного превосходящих их.

Так, в [15] результаты проведенных экспериментов с использованием Байесовского классификатора с различными параметрами на наборе писем [38] демонстрируют полноту обнаружения в среднем от около 93 % до 97 %. В [44] на наборе из 3196 писем (740 легальных и 2456 спамовых) эксперименты с разработанными алгоритмами выявили лучшую полноту обнаружения спама около 81 % при точности свыше 98 %. В [45] на наборе из 908 писем (424 легальных и 484 спамовых) эксперименты с разработанными алгоритмами продемонстрировали лучшую полноту обнаружения около 90 % при точности около 96 %. Также полученные результаты показывают лучшие значения полноты, точности и F -меры, чем некоторые из полученных в [5–7] результаты.

Таким образом, основываясь на полученных результатах генетическую модель электронных пи-

сем (1) целесообразно дополнить функцией предобработки электронных писем:

$$\Psi_{et} = \langle Prepr, gens, Gen_Code \rangle, \quad (6)$$

где

$$Prepr = \{ws_reps_del, tabs_reps_del, lb_reps_del, up_case\}, \quad (7)$$

где ws_reps_del – процедура удаления повторов пробелов; $tabs_reps_del$ – процедура удаления повторов символов табуляции; lb_reps_del – процедура удаления повторов переносов строк; up_case – процедура перевода всех букв в верхний регистр.

Заключение

Результаты проведенного эксперимента подтверждают сделанные в [30] выводы о корректности и применимости разработанной авторами и описанной в [11] модели электронных писем (1) для обнаружения спама также в условиях применения различных способов предобработки текстов. При этом результаты обнаружения напрямую зависят от выбора способов предобработки в совокупности со значениями параметров модели, что подтверждается опубликованными в [19, 32, 37] выводами.

С целью снижения зависимости процесса классификации с применением модели (1) от конкретных писем среди способов предобработки целесообразно рассматривать только предварительную очистку (предобработку) писем от повторов символов пробелов, табуляции и переносов строк и перевод всех букв в верхний (нижний) регистр. Применение каких-либо иных способов предобработки в модели (1) целесообразно только при условии их предварительной экспериментальной оценки и постоянной периодической корректировки с течением времени для адаптации процесса классификации применительно к индивидуальным особенностям написания электронных писем их автором.

Список используемых источников

1. Email Statistics Report, 2016–2020 // The Radicati Group. URL: <https://www.radicati.com/?p=13546> (дата обращения 25.11.2020)
2. Вергелис М., Щербакова Т., Сидорина Т. Спам и фишинг в 2018 году // Securelist. URL: <https://securelist.ru/spam-and-phishing-in-2018/93453> (дата обращения 17.09.2019)
3. Вергелис М., Щербакова Т., Сидорина Т., Куликова Т. Спам и фишинг в 2019 году // Securelist. URL: <https://securelist.ru/spam-report-2019/95727> (дата обращения 29.10.2020)
4. Barushka, A., Hajek, P. Spam Filtering Using Integrated Distribution-Based Balancing Approach and Regularized Deep Neural Networks // Applied Intelligence. 2018. Vol. 48. PP. 3538–3556. DOI:10.1007/s10489-018-1161-y
5. Bhattacharya P., Singh A. E-mail Spam Filtering using Genetic Algorithm based on Probabilistic Weights and Words Count // International Journal of Integrated Engineering. 2020. Vol. 12. No. 1. PP. 40–49. DOI:10.30880/ijie.2020.12.01.004
6. Bibi A., Latif R., Khalid S., Ahmed W., Shabir R.A., Ansari M., et al. Spam Mail Scanning Using Machine Learning Algorithm // Journal of Computers. 2020. Vol. 15. No. 2. PP. 73–84. DOI:10.17706/jcp.15.2.73-84
7. Abdulhamid Sh.M., Shuaib M., Osho O., Ismaila I., Alhassan J.K. Comparative Analysis of Classification Algorithms for Email Spam Detection // International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS). 2018. Vol. 10. No. 1. PP. 60–67. DOI:10.5815/ijcnis.2018.01.07
8. Radhakrishnan A., Vaidhehi V. Email Classification Using Machine Learning Algorithms // International Journal of Engineering and Technology (IJET). 2017. Vol. 9. No. 2. PP. 335–340. DOI:10.21817/ijet/2017/v9i1/170902310
9. Rusland N., Wahid N., Kasim Sh., Hafit H. Analysis of Naïve Bayes Algorithm for Email Spam Filtering across Multiple

Datasets // Proceedings of International Research and Innovation Summit (IRIS2017, Melaka, Malaysia, 6–7 May 2017). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2017. Vol. 226. DOI:10.1088/1757-899X/226/1/012091

10. Verma T., Gill N.S. Email Spams via Text Mining using Machine Learning Techniques // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2020. Vol. 9. No. 4. PP. 2535–2539. DOI:10.35940/ijitee.D1915.029420

11. Корелов С.В., Петров А.М., Ротков Л.Ю., Горбунов А.А. Модель электронных писем в задаче обнаружения спама // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 2(46). С. 44–54. DOI:10.25686/2306-2819.2020.2.44

12. Androutsopoulos I., Paliouras G., Michelakis E. Learning to Filter Unsolicited Commercial E-Mail // NCSR «Demokritos». Tech. Report number: 2004/2. 2004.

13. Sharaff A., Nagwani N., Dhadse A. Comparative Study of Classification Algorithms for Spam Email Detection // Shetty N., Prasad N., Nalini N. (eds) Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications. New Delhi: Springer, 2016. PP. 237–244. DOI:10.1007/978-81-322-2553-9_23

14. Androutsopoulos I., Koutsias J., Chandrinou K., Spyropoulos C. An Experimental Comparison of Naive Bayesian and Keyword-Based Anti-Spam Filtering with Personal E-Mail Messages // Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval (SIGIR'00, Athens, Greece, 24–28 July 2000). New York: Association for Computing Machinery, 2000. PP. 160–167. DOI:10.1145/345508.345569

15. Metsis V., Androutsopoulos I., Paliouras G. Spam Filtering with Naive Bayes – Which Naive Bayes? // Proceedings of the 3rd Conference on Email and Anti-Spam (CEAS 2006, Mountain View, USA, 27–28 July 2006). 2006. PP. 28–69.

16. Visani Ch., Jadeja N., Modi M. A Study on Different Machine Learning Techniques for Spam Review Detection // Proceedings of the International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS, Chennai, India, 1–2 August 2017). IEEE, 2017. PP. 676–679. DOI:10.1109/ICECDS.2017.8389522

17. Carreras X., Marquez L. Boosting Trees for Anti-Spam Email Filtering // Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing (RANLP, 5–7 September 2001). 2001. PP. 58–64.

18. Sheu J., Chen Y.K., Chu K.T., Tang J.H., Yang W.P. An Intelligent Three-Phase Spam Filtering Method Based on Decision Tree Data Mining // Security and Communication Networks. 2016. Vol. 9. No. 17. PP. 4013–4026. DOI:10.1002/sec.1584

19. Drucker H., Wu D., Vapnik V. Support Vector Machine for Spam Categorization // IEEE Transactions on Neural Networks. 1999. Vol. 10. No. 5. PP. 1048–1054. DOI:10.1109/72.788645

20. Jiang S., Pang G., Wu M., Kuang L. An Improved k-Nearest-Neighbor Algorithm for Text Categorization // Expert System with Applications. 2012. Vol. 39. No. 1. PP. 1503–1509. DOI:10.1016/j.eswa.2011.08.040

21. Yue X., Abraham A., Chi Z.X., Hao Y.Y., Mo H. Artificial Immune System Inspired Behavior-Based Anti-Spam Filter // Soft Computing. 2007. Vol. 11. PP. 729–740. DOI:10.1007/s00500-006-0116-0

22. Малыхина М.П., Частикова В.А., Биктимиров А.А. Методика обнаружения спама на основе искусственных иммунных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 3. С. 38–48. DOI:10.24143/2072-9502-2018-3-38-48

23. Clark J., Koprinska I., Poon J. A Neural Network Based Approach to Automated Email Classification // Proceedings of the IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence (WI 2003, Halifax, Canada, 13–17 October 2003). IEEE, 2003. PP. 702–705. DOI:10.1109/WI.2003.1241300

24. Катасёв А.С., Катасёва Д.В., Кирпичников А.П. Нейросетевая технология классификации электронных почтовых сообщений // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 5. С. 180–183.

25. Катасёв А.С., Катасёва Д.В., Кирпичников А.П., Семёнов Я.Е. Спам-фильтрация электронных почтовых сообщений на основе нейросетевой и нейронечеткой моделей // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 217–221.

26. Катасёв А.С., Катасёва Д.В. Разработка нейросетевой системы классификации электронных почтовых сообщений // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 1(25). С. 68–78.

27. Ларионова А.В., Хорев П.Б. Метод фильтрации спама на основе искусственной нейронной сети // Науковедение. 2016. Т. 8. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN316.pdf> (дата обращения 26.11.2020)

28. Ларионова А.В., Хорев П.Б. Оценка эффективности метода фильтрации спама на основе искусственной нейронной сети // Науковедение. 2016. Т. 8. № 2. DOI:10.15862/134TVN216

29. Hussain N., Turab Mirza H., Rasool G., Hussain I., Kaleem M. Spam Review Detection Techniques: A Systematic Literature Review // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 5. PP. 1–26. DOI:10.3390/app9050987

30. Корелов С.В., Петров А.М., Ротков Л.Ю., Горбунов А.А. К вопросу об определении численного значения параметра в модели электронных писем // Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной 75-летию радиофизического факультета (Нижний Новгород, Российская Федерация, 13–31 мая 2020). Нижний Новгород: ННГУ, 2020. С. 471–474. URL: <http://www.rf.unn.ru/wp-content/uploads/sites/21/2020/10/rf-conf-2020-book-1.pdf> (дата обращения 26.11.2020)

31. Климов Д.В. Предобработка текстовых сообщений для метрического классификатора // Символ науки. 2017. № 12. С. 25–32.

32. Haddi E., Liu X., Shi Y. The Role of Text Pre-processing in Sentiment Analysis // Procedia Computer Science. 2013. Vol. 17. PP. 26–32. DOI:10.1016/j.procs.2013.05.005

33. Devaraj S., Krishnakumar A. Effective Search Engine Spam Classification // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 8. No. 2S8. PP. 1541–1545. DOI:10.35940/ijrte.B1100.0882S819

34. HaCohen-Kerner Y., Miller D., Yigal Y. The influence of preprocessing on text classification using a bag-of-words representation // PLoS ONE. 2020. Vol. 15(5): e0232525. DOI:10.1371/journal.pone.0232525

35. Vijayarani S., Ilamathi J., Nithya M. Preprocessing Techniques for Text Mining – An Overview // International Journal of Computer Science & Communication Networks. 2015. Vol. 5. No. 1. PP. 7–16.

36. Weng J. NLP Text Preprocessing: A Practical Guide and Template. URL: <https://towardsdatascience.com/nlp-text-preprocessing-a-practical-guide-and-template-d80874676e79> (дата обращения 14.07.2020)
37. Uysal A., Gunal S. The Impact of Preprocessing on Text Classification // Information Processing & Management. 2014. Vol. 50. No. 1. PP. 104–112. DOI:10.1016/j.ipm.2013.08.006
38. Enron-Spam datasets. URL: <http://www2.aueb.gr/users/ion/data/enron-spam> (дата обращения 26.11.2020)
39. Sebastiani F. Machine Learning in Automated Text Categorization // ACM Computing Surveys. 2002. Vol. 34. No. 1. PP. 1–47. DOI:10.1145/505282.505283
40. Sebastiani F. Text Categorization // Zanasi A. (ed.). Text Mining and its Applications. Southampton: WIT Press, 2005. PP. 109–129.
41. Aas K., Eikvil L. Text Categorisation: A Survey // Norwegian Computing Center. Tech. Report number: 941, 1999.
42. Manning C., Raghavan P., Shütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI:10.1017/CBO9780511809071
43. Sokolova M., Lapalme G. A Systematic Analysis of Performance Measures for Classification Tasks // Information Processing & Management. 2009. Vol. 45. Iss. 4. PP. 427–437. DOI:10.1016/j.ipm.2009.03.002
44. Мироненко А.Н. Алгоритм контентной фильтрации спама на базе совмещения метода опорных векторов и нейронных сетей. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 18 с.
45. Чернопрудова Е.Н. Защита почтовых сервисов от несанкционированных рассылок на основе контентной фильтрации электронных сообщений. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2013. 16 с.

* * *

Preprocessing of the Emails in the Spam Detection Task

S. Korelov¹, A. Petrov¹, L. Rotkov², A. Gorbunov²

¹National Computer Incident Response & Coordination Center,
Moscow, 107031, Russian Federation

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-80-90

Received 31st August 2020

Accepted 23rd November 2020

For citation: Korelov S., Petrov A., Rotkov L., Gorbunov A. Preprocessing of the Emails in the Spam Detection Task. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):80–90. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-80-90

Abstract: *The functioning of almost any organization to one degree or another depends on how reliably its information resources are protected from various information security threats, one of which is spam. At the same time there have been many attempts to solve the problem of its detection once and for all. Research is ongoing in this subject area constantly. Based on its results, various approaches are proposed and implemented in practice. The authors previously proposed a model of e-mails that takes into account the content of e-mails, which often changes depending on the tasks performed by users and their changing information needs.*

This article discusses the issue of preprocessing e-mail texts in the problem of spam detection using a model of e-mails obtained on the basis of a genetic approach to the formation of mathematical models of texts, which has proven itself for solving various problems.

Keywords: *information security, spam, detection, electronic letter model, genetic approach, genetic model, email, e-mail messages, electronic letters, text preprocessing.*

References

1. The Radicati Group. *Email Statistics Report, 2016–2020*. Available from: <https://www.radicati.com/?p=13546> [Accessed 25th November 2020]
2. Vergelis M., Shcherbakova T., Sidorina T. *Spam and Phishing in 2018*. (in Russ) Available from: <https://securelist.ru/spam-and-phishing-in-2018/93453> [Accessed 17th September 2019]

3. Vergelis M., Shcherbakova T., Sidorina T., Kulikova T. *Spam and Phishing in 2019*. (in Russ) Available from: <https://securelist.ru/spam-report-2019/95727> [Accessed 29th October 2020]
4. Barushka, A., Hajek, P. Spam Filtering Using Integrated Distribution-Based Balancing Approach and Regularized Deep Neural Networks. *Applied Intelligence*. 2018;48:3538–3556. DOI:10.1007/s10489-018-1161-y
5. Bhattacharya P., Singh A. E-mail Spam Filtering using Genetic Algorithm based on Probabilistic Weights and Words Count. *International Journal of Integrated Engineering*. 2020;12(1): 40–49. DOI:10.30880/ijie.2020.12.01.004
6. Bibi A., Latif R., Khalid S., Ahmed W., Shabir R.A., Ansari M., et al. Spam Mail Scanning Using Machine Learning Algorithm. *Journal of Computers*. 2020;15(2):73–84. DOI:10.17706/jcp.15.2.73-84
7. Abdulhamid Sh.M., Shuaib M., Osho O., Ismaila I., Alhassan J.K. Comparative Analysis of Classification Algorithms for Email Spam Detection. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*. 2018;10(1):60–67. DOI:10.5815/ijcnis.2018.01.07
8. Radhakrishnan A., Vaidhehi V. Email Classification Using Machine Learning Algorithms. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*. 2017; 9(2):335–340. DOI:10.21817/ijet/2017/v9i1/170902310
9. Rusland N., Wahid N., Kasim Sh., Hafit H. Analysis of Naive Bayes Algorithm for Email Spam Filtering across Multiple Datasets. *Proceedings of International Research and Innovation Summit, IRIS2017, 6–7 May 2017, Melaka, Malaysia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing; 2017. vol.226. DOI:10.1088/1757-899X/226/1/012091
10. Verma T., Gill N.S. Email Spams via Text Mining using Machine Learning Techniques. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2020;9(4):2535–2539. DOI:10.35940/ijitee.D1915.029420
11. Korelov S., Petrov A., Rotkov L.Yu., Gorbunov A.A. Model of Email Messages in the Problem of Detecting Spam. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"*. 2020;2(46):44–54. DOI:10.25686/2306-2819.2020.2.44
12. Androutsopoulos I., Paliouras G., Michelakis E. *Learning to Filter Unsolicited Commercial E-Mail*. NCSR «Demokritos». Tech. Report number: 2004/2, 2004.
13. Sharaff A., Nagwani N., Dhadse A. Comparative Study of Classification Algorithms for Spam Email Detection. In: Shetty N., Prasad N., Nalini N. (eds) *Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications*. New Delhi: Springer; 2016. p.237–244. DOI:10.1007/978-81-322-2553-9_23
14. Androutsopoulos I., Koutsias J., Chandrinou K., Spyropoulos C. An Experimental Comparison of Naive Bayesian and Keyword-Based Anti-Spam Filtering with Personal E-Mail Messages. *Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval, SIGIR'00, 24–28 July 2000, Athens, Greece*. New York: Association for Computing Machinery; 2000. p.160–167. DOI:10.1145/345508.345569
15. Metsis V., Androutsopoulos I., Paliouras G. Spam Filtering with Naive Bayes – Which Naive Bayes? *Proceedings of the 3rd Conference on Email and Anti-Spam, CEAS 2006, 27–28 July 2006, Mountain View, USA*. 2006. p.28–69.
16. Visani Ch., Jadeja N., Modi M. A Study on Different Machine Learning Techniques for Spam Review Detection. *Proceedings of the International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS, 1–2 August 2017, Chennai, India*. IEEE; 2017. p.676–679. DOI:10.1109/ICECDS.2017.8389522
17. Carreras X., Marquez L. Boosting Trees for Anti-Spam Email Filtering. *Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing, RANLP, 5–7 September 2001*. 2001. p.58–64.
18. Sheu JJ., Chen YK., Chu KT., Tang JH., Yang WP. An Intelligent Three-Phase Spam Filtering Method Based on Decision Tree Data Mining. *Security and Communication Networks*. 2016;9(17):4013–4026. DOI:10.1002/sec.1584
19. Drucker H., Wu D., Vapnik V. Support Vector Machine for Spam Categorization. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1999;10(5):1048–1054. DOI:10.1109/72.788645
20. Jiang S., Pang G., Wu M., Kuang L. An Improved k-Nearest-Neighbor Algorithm for Text Categorization. *Expert System with Applications*. 2012;39(1):1503–1509. DOI:10.1016/j.eswa.2011.08.040
21. Yue X., Abraham A., Chi ZX., Hao YY., Mo H. Artificial Immune System Inspired Behavior-Based Anti-Spam Filter. *Soft Computing*. 2007;11:729–740. DOI:10.1007/s00500-006-0116-0
22. Malykhina M.P., Chastikova V.A., Biktimirov A.A. Method of Spam Detection Based on Artificial Immune Systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2018;3:38–48. (in Russ.) DOI:10.24143/2072-9502-2018-3-38-48
23. Clark J., Koprinska I., Poon J. A Neural Network Based Approach to Automated Email Classification. *Proceedings of the IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence, WI 2003, 13–17 October 2003, Halifax, Canada*. IEEE; 2003. p.702–705. DOI:10.1109/WI.2003.1241300
24. Katasev A.S., Kataseva D.V., Kirpichnikov A.P. Neural Network Technology for Classifying Electronic Mail Messages. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015;18(5):180–183. (in Russ.)
25. Katasev A.S., Kataseva D.V., Kirpichnikov A.P., Semenov J.E. Spam Filtering of E-Mail Messages Based on Neural Network and Neural Fuzzy Models. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015;18(15):217–221. (in Russ.)
26. Katasev A.S., Kataseva D.V. The Neural Network System Development for Classification of E-Mail Messages. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo yenergeticheskogo universiteta*. 2015;1(25):68–78. (in Russ.)
27. Larionova A.V., Khorev P.B. Spam Filtering Method Based on Artificial Neural Network. *Naukovedeniye*. 2016;8(3). (in Russ.) Available from: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN316.pdf> [Accessed 26 November 2020]
28. Larionova A.V., Khorev P.B. Efficiency Evaluating of Spam Filtering Method Based on Artificial Neural Network. *Naukovedeniye*. 2016;8(2). (in Russ.) DOI:10.15862/134TVN216
29. Hussain N., Turab Mirza H., Rasool G., Hussain I., Kaleem M. Spam Review Detection Techniques: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*. 2019;9(5):1–26. DOI:10.3390/app9050987
30. Korelov S.V., Petrov A.M., Rotkov L.Yu., Gorbunov A.A. On the Question of Determining the Numerical Value of a Parameter in the Email Model. *Proceedings of the XXIV Scientific Conference on Radiophysics devoted to the 75th anniversary of the Radiophysics Faculty, 13–31 May 2020, Nizhny Novgorod, Russian Federation*. Nizhny Novgorod: National Research Lobachevsky

- State University of Nizhny Novgorod Publ.; 2020. p.471–474. (in Russ.) Available from: <http://www.rf.unn.ru/wp-content/uploads/sites/21/2020/10/rf-conf-2020-book-1.pdf> [Accessed 26 November 2020]
31. Klimov D.V. Preprocessing Text Messages for Metric Classifier. *Simvol nauki*. 2017;12:25–32. (in Russ.)
32. Haddi E., Liu X., Shi Y. The Role of Text Pre-processing in Sentiment Analysis. *Procedia Computer Science*. 2013;17:26–32. DOI:10.1016/j.procs.2013.05.005
33. Devaraj S., Krishnakumar A. Effective Search Engine Spam Classification. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019;8(2S8):1541–1545. DOI:10.35940/ijrte.B1100.0882S819
34. HaCohen-Kerner Y., Miller D., Yigal Y. The influence of preprocessing on text classification using a bag-of-words representation. *PLoS ONE*. 2020;15(5):e0232525. DOI:10.1371/journal.pone.0232525
35. Vijayarani S., Ilamathi J., Nithya M. Preprocessing Techniques for Text Mining – An Overview. *International Journal of Computer Science & Communication Networks*. 2015;5(1):7–16.
36. Weng J. NLP Text Preprocessing: A Practical Guide and Template. Available from: <https://towardsdatascience.com/nlp-text-preprocessing-a-practical-guide-and-template-d80874676e79> [Accessed 14th July 2020]
37. Uysal A., Gunal S. The Impact of Preprocessing on Text Classification. *Information Processing & Management*. 2014;50(1):104–112. DOI:10.1016/j.ipm.2013.08.006
38. *Enron-Spam datasets*. Available from: <http://www2.aueb.gr/users/ion/data/enron-spam> [Accessed 26th November 2020]
39. Sebastiani F. Machine Learning in Automated Text Categorization. *ACM Computing Surveys*. 2002;34(1):1–47. DOI:10.1145/505282.505283
40. Sebastiani F. Text Categorization. In: Zanasi A. (ed.). *Text Mining and its Applications*. Southampton: WIT Press; 2005. p.109–129.
41. Aas K., Eikvil L. *Text Categorisation: A Survey*. Norwegian Computing Center. Tech. Report number: 941, 1999.
42. Manning C., Raghavan P., Shütze H. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge: Cambridge University Press; 2008. DOI:10.1017/CBO9780511809071
43. Sokolova M., Lapalme G. A Systematic Analysis of Performance Measures for Classification Tasks. *Information Processing & Management*. 2009;45(4):427–437. DOI:10.1016/j.ipm.2009.03.002
44. Mironenko A.N. *Algorithm for Content Filtering of Spam Based on Combining Support Vector Machines and Neural Networks*. PHD Thesis. St. Petersburg; 2012. 18 p. (in Russ.)
45. Chernoprudova E.N. *Protection of Mail Services from Unauthorized Mailings Based on Content Filtering of Electronic Messages*. PHD Thesis. Ufa; 2013. 16 p. (in Russ.)

Сведения об авторах:

КОРЕЛОВ Сергей Викторович	сотрудник Национального координационного центра по компьютерным инцидентам (г. Москва), korelovsv@cert.gov.ru
ПЕТРОВ Артем Михайлович	сотрудник Национального координационного центра по компьютерным инцидентам (г. Москва), pam@cert.gov.ru
РОТКОВ Леонид Юрьевич	кандидат технических наук, доцент, начальник Управления информационной безопасности, заведующий кафедрой «Безопасность информационных систем» Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, rtv@rf.unn.ru
ГОРБУНОВ Александр Александрович	преподаватель кафедры «Безопасность информационных систем» Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, aagor@rf.unn.ru

Когнитивное моделирование деструктивных злоумышленных воздействий на объектах критической информационной инфраструктуры

Е.А. Максимова^{1*} 

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, 119454, Российская Федерация
*Адрес для переписки: maksimova@mirea.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.09.2020

Принята к публикации 20.10.2020

Ссылка для цитирования: Максимова Е.А. Когнитивное моделирование деструктивных злоумышленных воздействий на объектах критической информационной инфраструктуры // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 91–103. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-91-103

Аннотация: *Безопасность субъекта критической информационной инфраструктуры (КИИ) – один из ключевых вопросов его жизнеобеспечения. Существующий в настоящее время подход (нормативно-правовой) регламентирует решения данного вопроса без учета фактора влияния нарушителя, способного деструктивно воздействовать на субъекта КИИ. Это приводит к значительным погрешностям при анализе информационной безопасности субъекта КИИ, следовательно, снижает эффективность декларированных для объектов КИИ средств защиты информации. Целью данной работы является разработка модели нарушителя информационной безопасности (ИБ), представленной в формализованном виде с использованием параметра «потенциал нарушителя» в пространстве реализаций им деструктивных воздействий на объектах КИИ. Предложенная модель оценки возможностей нарушителя по реализации деструктивных воздействий на субъекте КИИ как совокупности объектов реализована в разработанной когнитивной карте «Оценка ИБ субъекта КИИ» для динамического изменения параметров вершины «Злоумышленные действия на объекте КИИ».*

Ключевые слова: *нарушитель, субъект, критическая информационная инфраструктура, категория, деструктивные воздействия, модель, когнитивная модель, информационная безопасность.*

Введение

Особое место в социальной инфраструктуре любого государства занимают объекты критической информационной инфраструктуры (КИИ). Нарушение функционирования таких объектов может иметь разрушающий характер, сопровождаться человеческими жертвами. Поэтому меры по противодействию злоумышленным воздействиям на них должны в полной мере перекрывать угрозы и уязвимости информационной безопасности (ИБ). Прогнозирование злоумышленных воздействий при этом должно быть комплексным и всеобъемлющим по отношению к конкретному объекту.

Одним из ключевых вопросов в процессе прогнозирования злоумышленных воздействий является формирование модели потенциального злоумышленника, способного нанести значительный урон, привести к деструктивным (разрушающим) последствиям. Деструктивные злоумышленные воздействия (ДЗВ) инфраструктурного характера не декларированы, что приводит к погрешности в оценке ИБ объектов КИИ.

Постановка задачи

В процессе моделирования действий злоумышленника, в качестве основы, например, рассматриваются описательные модели сетей и злоумышленников [1], структурированное описание на базе деревьев [2], объектно-ориентированное дискретное событийное моделирование [3], регулятивное моделирование [4] и др.

Однако, при построении системы защиты субъекта критической информационной инфраструктуры (КИИ) используется алгоритм действий, прописанный в Федеральном законе Российской Федерации от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» и не учитывающий «силу» деструктивных воздействий как одного из значимых показателей потенциального нарушителя. Таким образом, целью исследования является построение модели оценки возможностей нарушителей по реализации деструктивных воздействий на объектах КИИ как элемента комплексной, регулятивной мо-

дели оценки информационной безопасности субъекта КИИ. Субъект КИИ при этом в рамках данного исследования рассматривается как совокупность объектов КИИ, являющихся его структурными составляющими

Анализ методов анализа и оценки деструктивного воздействия на объектах КИИ

Первое упоминание о модели нарушителя (злоумышленника) в Российской Федерации относится к Руководящему документу Гостехкомиссии России 1992 г. [5]. В нем нормативно устанавливался термин и его пояснение, как «абстрактное описание». На тот момент понятие «действий злоумышленника» рассматривалось в большей степени как какие-либо физические методы воздействия без упоминания технических или программных возможностей. В дальнейшем определение закреплялось и уточнялось в государственных стандартах.

В начале XXI столетия с развитием компьютерных технологий потребовалась корректировка понятия «злоумышленник» и подходов к оценке его возможностей. Серьезным шагом в нормативном закреплении модели злоумышленника стал выход методического документа ФСТЭК России «Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах» от 14 февраля 2008 г., и утвержденных в 2015 г. методических рекомендаций ФСБ России «по разработке нормативных правовых актов, определяющих угрозы безопасности персональных данных, актуальные при обработке персональных данных в информационных системах (ИС) персональных данных, эксплуатируемых при осуществлении соответствующих видов деятельности» [6]. В этих документах регуляторы обозначили последовательные алгоритмы действий при разработке модели злоумышленника.

В силу различий в «зонах ответственности» (ФСБ России – область защиты криптографическими средствами, ФСТЭК России – техническая защита информации), подходы и методы регуляторов отличаются. ФСБ России при описании злоумышленника берет в расчет в основном его воздействие на криптографические средства и среду их функционирования. ФСТЭК России делает упор на атаки на систему в целом.

ФСТЭК России в своей методике разделяет нарушителей на три вида по их потенциалу. Он (потенциал) может быть низким, средним и высоким. Каждый определен своими возможностями и осведомленностью о системе. Например, низкий потенциал показывает, что получение информации и реализация злоумышленных действий может идти только по общедоступным каналам. Средний – имеет доступ к коду используемых программ, может искать уязвимости и пользоваться ими. Высокий – способен самостоятельно вносить НДВ в прикладные программы и использовать спецсредства. У злоумышленников с

высоким потенциалом практически неограниченные возможности.

ФСБ России выделяет шесть групп злоумышленников, в зависимости от специфических возможностей к проведению атак. Атаки могут производиться внутри или вне контролируемой зоны. Также к возможностям относится наличие или отсутствие физического доступа к помещениям, в которых находится совокупность программных и технических элементов систем обработки данных, способных функционировать самостоятельно или в составе других систем средств вычислительной техники и возможность найма и привлечения квалифицированных специалистов.

Не смотря на различие в количестве групп злоумышленников в методиках, это деление взаимосвязано и может быть условно соотнесено.

Альтернативные методики и подходы к вопросу, связанному с разработкой модели нарушителя предлагаются рядом ученых. Так, в 2007 г. Бояринцев А.В., Ничиков А.В., Редькин В.Б. при рассмотрении общего подхода к разработке моделей нарушителей [7] описали методологию, предполагающую четыре подхода к данному вопросу. Первым описанным подходом был метод, который назвали «позицией пессимизма», т. е. предполагающей, что злоумышленник максимально подготовлен для реализации угрозы. Второй подход – «позиция оптимизма», согласно которому предположения выдвигаются на основании лучшего из возможных вариантов событий. Третий – «позиция реализма», где эксперты выдвигают наиболее вероятную модель. Четвертый – «позиция оправданного пессимизма», отличающаяся тем, что характеристики злоумышленника не абсолютируются, но и не занижаются.

В 2010 г. Спивак А.И. при описании методики оценки эффективности злоумышленника [8] предложил дополнительный инструмент для описательной части модели нарушителя. В методике было введено понятие величины деструктивного воздействия. Эта величина математически представляла собой приращение вероятности реализации угрозы после воздействия злоумышленника. Введение величины деструктивного воздействия рассматривало новую сторону в вопросе разработки модели злоумышленника. Однако данная величина была актуальна только при условии ограниченности знания или полной неосведомленности о деятельности нарушителя. Это не позволяло применять методику на практике в ряде случаев взаимодействия в реальном времени.

В 2012 г. Жуков В.Г., Жукова М.Н. и Стефаров А.П. при описании модели нарушителя прав доступа в автоматизированных системах [9] предложили методику построения модели злоумышленника, совмещившую основные на тот момент сетевые модели OSI/ISO и TCP/IP. Она была основана на классификации уровней воздействия нарушителя. К

этим уровням относились: уровень технических каналов, прикладной уровень стека протоколов TCP/IP, транспортный уровень стека протоколов TCP/IP, сетевой уровень стека протоколов TCP/IP, канальный уровень стека протоколов TCP/IP, физический уровень стека протоколов TCP/IP, уровень вредоносного воздействия, уровень закладных устройств, уровень системы защиты информации. На основании этих уровней предложено семь категорий злоумышленников. На основании уровней воздействия и категорий злоумышленников составлялась таблица актуальных угроз безопасности. Одним из главных плюсов этого подхода является то, что модель учитывала показатель осведомленности нарушителя и его технические средства. Однако представленная модель, в силу жесткого соотношения категория-уровень, не рассматривала возможной взаимосвязи категорий и их совместное действие. Модель позволяла не привлекать специалистов по защите информации на этапе предпроектного обследования, что могло привести к потере из вида специфических угроз.

В 2013 г. Ищейнов В.Я., Чудинов С.М. при оценке риска воздействия на объект информатизации [7] рассматривали математический подход к обоснованию модели злоумышленника с точки зрения аппарата нечетких множеств. Используемая функциональная модель угроз, состоящая из функции источника угроз и функций самих угроз по времени, позволяла в конечном итоге составить поле распределения рисковых показателей, где каждая строка соответствовала конкретной модели, а максимальное значение в строке являлось максимальным риском при действиях конкретного нарушителя. Несомненным плюсом такого подхода являлось прямое вычисление рисков для модели и наглядность за счет представления итоговых значений в виде таблицы. Тем не менее, оценка на основании нечетких множеств (интервалов) крайне зависела от предварительной оценки экспертной группы, которая при определенных условиях могла быть неточной.

В 2017 г. Савченко С.О. и Капчук Н.В., описывая алгоритм построения модели нарушителя [10] использовали методы и понятия теории игр. Описание нарушителя безопасности было представлено как одноходовая матричная игра с нулевой суммой. В этой модели существует два игрока – нарушитель и защитник. Они знают все о действиях соперника, но не могут скооперироваться. Модель дополняется элементами теории вероятностей и теории графов. Модель практически в полной мере описывает поведение «игроков» и позволяет довольно точно оценивать защищенность системы. Но условие о полном знании действий оппонента, как и противоположное условие в методике Спивака А.И. в 2010 г., не позволяет рассматривать ситуации, противоречащие этому условию, например, ситуацию скрытного воздействия на систему [7].

В 2018 г. Гафизов Р.М. и Ахматзода Ш.А. при разработке модели нарушителя беспроводной сети [11] вводят в рассмотрение мотивы злоумышленника и классифицируют нарушителей. В зависимости от мотивации ими выделено четыре группы нарушителей:

- идейные хакеры, т. е. те, кто совершает атаки на конкретные системы, имея своими мотивами месть, вымещение обиды и пр.;
- искатели приключений: таких нарушителей не интересует содержание системы, в основном они хотят проверить свои способности;
- хакеры-профессионалы, т. е. злоумышленники с широким спектром умений, совершающие попытки НСД в систему по заказу;
- ненадежные сотрудники, т. е. внутренние нарушители по умыслу или без него вредящие системе.

Введение понятия мотивации в алгоритм рассмотрения модели злоумышленника приводит к более точному выдвижению гипотез относительно возможных действий нарушителя. Тем не менее модель не рассматривает возможные уровни доступа злоумышленника в систему, а именно – градацию возможных ненадежных сотрудников или нарушителей по техническому или логическому доступу. Это не позволяет в должной мере оценить его (злоумышленника) возможности.

Рассмотренные подходы к разработке модели и оценке деструктивных злоумышленных воздействий, не смотря на свою определенную значимость, не описывают в полной мере модель поведения и действий нарушителя каким-либо простым и понятным показателем, удобным для дальнейшего применения в оценке или разработке комплекса защитных мер. Предложенная ниже методика использует сильные стороны существующих алгоритмов, заполняет пробелы и убирает ряд допущений, ограничивающих функциональность при разработке, а также вводит обоснованную количественную величину, характеризующую уровень деструктивного воздействия нарушителя на систему.

Методика и дискуссия

Субъект КИИ – сложная, многокомпонентная система [12–14]. Рассматривать ее можно с точки зрения разных подходов. Например, при проведении комплексной оценки ИБ субъекта КИИ учитывается оценка защищенности ИС – объектов КИИ, которые, в свою очередь, можно рассматривать как экономические системы [15].

Еще один показатель при анализе функционирования субъекта КИИ – надежность. В [16] предлагается математическое обеспечение анализа надежности сетевых ИС. Данный аппарат также возможно использовать при исследовании объектов КИИ. В качестве модели сетевой ИС используется графовое

представление, основанное на формализации описания графа скобочными проекциями. На основе результирующей комбинации проекций, полученной в результате реализации алгоритма разрезания, строится вероятностная функция надежности.

Комплексное обеспечение информационной безопасности субъекта КИИ также является примером социотехнической системы, так как здесь важнейшие управляющие решения принимает человек [17]. Важно отметить, что данная система функционирует в условиях неопределенности, характеризующейся недостатком информации, необходимой для формализации процессов, протекающих в таких системах. С одной стороны, неопределенность обусловлена недостаточностью или полным отсутствием методов и средств измерения координат объекта управления в фазовом пространстве, а с другой – незнанием закономерностей протекания процессов ввиду их сложности и малой изученности. Обозначенные в [17] факторы затрудняют аналитическое описание и построение формальных моделей, учитывающих специфику социотехнических систем. Таким образом, с учетом особенностей слабоформализуемых процессов, происходящих в социотехнических системах, в частности в системе оценки информационной безопасности субъекта КИИ решено использовать методы когнитивного моделирования.

При рассмотрении вопросов, связанных с применением когнитивного моделирования ДЗВ на субъект КИИ, опора сделана на взгляды Н.П. Садовниковой, Н.П. Жидковой [18], отмечающих важность определения оптимальных требований к показателям, характеризующим качество принимаемых решений и необходимость учета сложного характера их взаимосвязей на основе существующих требований регуляторов. Для получения прогноза развития ситуации использован метод импульсных процессов [19], относящийся к категории динамических методов.

Основным понятием теории когнитивных карт является концепт k . Концептом называется базовый (неделимый) элемент рассматриваемой системы. Направленность связи концептов означает, что концепт-источник влияет на концепт-приемник, т. е. изменение значений (состояний) концепта-источника приводит к изменению значений (состояний) концепта приемника.

Когнитивная карта представляет собой ориентированный граф $G = (a, b)$, где a – множество вершин графа (концепты); b – множество ребер. Оптимизация когнитивной карты заключается в том, что она строится не на n входных данных, а на k , где $k < n$; n – величина компонента.

Когнитивная карта может быть преобразована в формализованную модель.

Процесс построения когнитивной модели состоит из ряда процедур:

1) выделение и обоснование системы факторов рисков безопасности функционирования субъекта КИИ, в наибольшей степени влияющих на стабильность функционирования и развития объектов, с целью включения таких факторов в разрабатываемую модель в качестве вершин (V_i);

2) установление экспертным путем наличия причинно-следственных связей (дуг e_{ij}) между выделенными факторами рисков и оценкой характера их влияния (положительного, отрицательного либо нулевого) друг на друга по отношению к задаче эффективного управления;

3) построение ориентированного графа, отражающего взаимовлияние факторов с учетом установленных экспертами весов дуг w_{ij} из интервала от -10 до $+10$.

Основные источники факторов рисков в деятельности субъектов КИИ для построения когнитивной модели представлены в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 8 февраля 2018 г. № 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений» (с изменениями от 13.04.2019). Кроме того, в когнитивную модель введена целевая вершина V_{13} «Информационная безопасность субъекта КИИ», по результатам работы в которой будет оцениваться влияние ДЗВ на информационную безопасность субъекта КИИ.

В ходе моделирования строится когнитивная карта оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях (рисунок 1). Для более глубокого анализа модели в виде взвешенного орграфа выстраивается алгоритм влияния изменения значений одной вершины на величины других вершин.

В основу данного алгоритма положена идея импульсного процесса, предложенную Робертсом Ф.С. Суть ее заключается в том, что в некоторую вершину анализируемого графа вносится внешнее возмущение.

Алгоритм развития импульсного процесса можно представить следующей матричной формулой:

$$V_{(t)} = V_{(исх)} + P_0 * (I + A + A^2 + \dots + A^t),$$

где $V_{(исх)}$ – вектор начальных состояний; P_0 – начальный импульс; A – матрица смежности; I – единичная матрица размером $n \times n$.

В результате работы данного алгоритма получается количественная оценка информационной безопасности субъекта КИИ. Для перевода ее в качественную предлагается использовать шкалу качественной оценки уровня информационной безопасности субъекта КИИ (таблица 1).

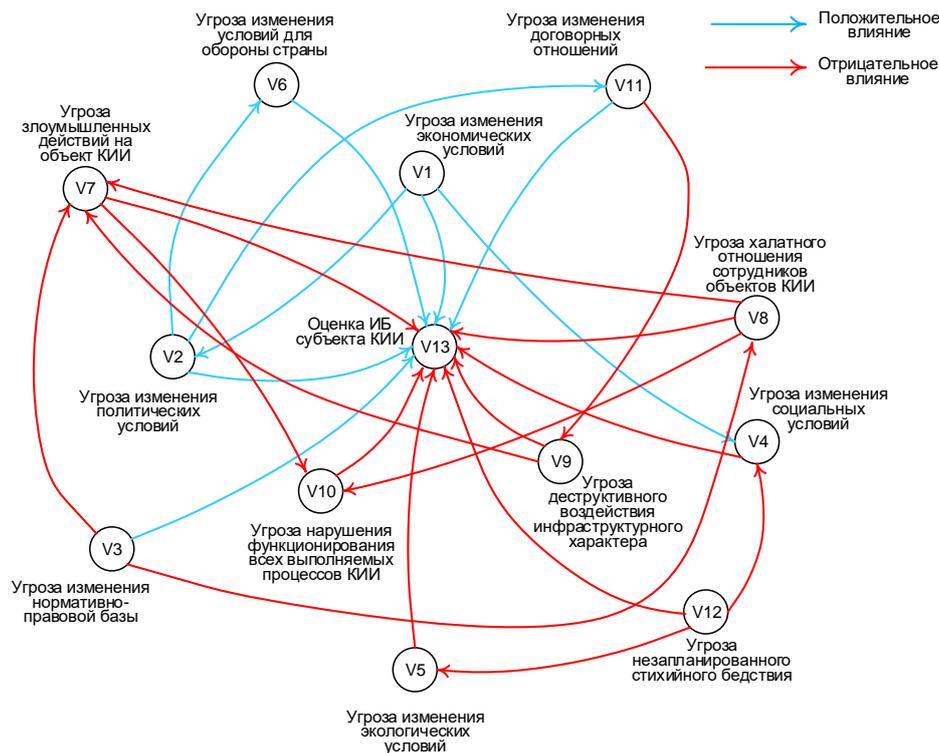


Рис. 1. Когнитивная карта оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях

Fig. 1. Cognitive Map of the Assessment of the Subject's IS CII in Case of Destructive Influences

Оценка ДЗВ реализуется в модуле категорирования злоумышленника в модели когнитивной оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях (рисунок 2). Для реализации данной оценки предлагается методика (см. далее).

ТАБЛИЦА 1. Шкала качественной оценки уровня ИБ субъекта КИИ

TABLE 1. Scale of Qualitative Assessment of the IS Level of the Subject of the CII

Значение количественной оценки	Качественная оценка уровня ИБ субъекта КИИ
При положительном влиянии	
[0;0,33]	Низкая
[0,33;0,66]	Средняя
[0,66;1]	Высокая
При отрицательном влиянии (уровень снижения ИБ относительно исходного)	
[0;-0,33]	Незначительный
[-0,33;-0,66]	Значительный
[-0,66;-1]	Критичный

Под деструктивным воздействием будем понимать результат реализации угрозы, приводящий к неблагоприятным и разрушительным последствиям для субъекта КИИ. Субъективным источником деструктивных воздействий является нарушитель ИБ. В качестве нарушителей информационной безопасности субъекта КИИ могут выступать лица, осуществляющие преднамеренные действия с целью доступа к информации, содержащейся на объектах КИИ. Исходя из особенностей структуры воздействия, целью воздействия в том числе может быть – нарушение функционирования объектов КИИ или обслуживающей ее инфраструктуры, имеющей доступ к объектам КИИ (преднамеренные угрозы безопасности информации), в соответствии с федеральным законом Российской Федерации № 187. При этом, достижимость нарушителем результата будет зависеть от ряда показателей. Совокупность этих показателей обеспечивает категорию нарушителя информационной безопасности.

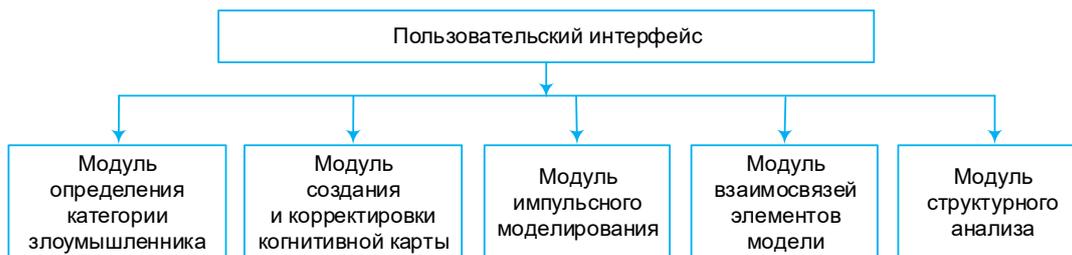


Рис. 2. Архитектура модели оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях

Fig. 2. Architecture of the IS Subject's is Assessment Model under Destructive Influences

Таким образом, при моделировании действий нарушителя ИБ выстраивается формализованная модель, учитывающая параметры (потенциал) нарушителя в пространстве реализаций им деструктивных воздействий на объектах КИИ. Результатом моделирования здесь является пятиуровневая модель доступа нарушителя ИБ к информации и (или) к компонентам объектов КИИ на уровне физического доступа (PhL), логического доступа (LogL), компетенций (C) нарушителя, оснащенности (A) нарушителя, мотивации (M) нарушителя. Уровни доступа определяем согласно ПП РФ № 127 (с изменениями от 13.04.2019).

Возможности нарушителя на обозначенных уровнях доступа к информации и (или) к компонентам объектов КИИ определяют базовый потенциал (Pt_{BASE}), которым обладает нарушитель ИБ на субъекте КИИ. Базовый потенциал используется для построения модели угроз ИБ в части оценки вероятностей их реализации. Оценка предварительного базового потенциала нарушителя производится на основе числовых значений уровней компетенции и оснащенности.

На основании вышеизложенного представим пятиуровневую модель доступа нарушителя ИБ к информации и (или) к компонентам объектов КИИ как:

$$PhL:[x]/LogL:[x]/C:[x]/A:[x]/M:[x],$$

где $[x]$ – значение соответствующего параметра.

Предлагаемая методика основывается на оценке величины коэффициента ДЗВ, которая проводится в два этапа. На первом этапе определяется категория злоумышленника путем построения модели. На втором - выполняется оценка коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ. Модель злоумышленника на объекте КИИ представляет собой формальное описание потенциального нарушителя по пяти признакам, представленным выше. В общем виде модель категорирования нарушителя ИБ на объекте КИИ представима в нотации IDEF0 (рисунок 3).

Совокупность признаков определяет базовый потенциал злоумышленника при воздействии на объект КИИ. Для его оценки необходимо, во-первых, на основании числовых значений и уровня компетенции злоумышленника определить предварительный базовый потенциал с помощью таблицы 2.

ТАБЛИЦА 2. Определение предварительного базового потенциала злоумышленника

TABLE 2. Determining the Preliminary Basic Potential of an Attacker

Показатель	Оценка $[x]$	
	Качественная ($qual_ [x]$)	Количественная ($quan_ [x]$)
Компетенции нарушителя		
C: $[x]$	Низкий (LOW)	0
	Средний (AVERAGE)	0,2
	Высокий (HIGH)	0,5
Оснащенность нарушителя (оборудования)		
A: $[x]$	Отсутствует (ABSENT)	0
	Стандартное	0,1
	Специализированное	0,3
	Заказное	0,5

Предварительный базовый потенциал злоумышленника ($PREL_Pt_{BASE}$) рассчитывается как:

$$quan_ [PREL_Pt_{BASE}] = quan_C: [x] + quan_A: [x].$$

В результате имеем:

$$(quan_ [PREL_Pt_{BASE}] \geq 8) \Rightarrow (qual_ [PREL_Pt_{BASE}] := HIGH),$$

$$(quan_ [PREL_Pt_{BASE}] \geq 5) \vee (quan_ [PREL_Pt_{BASE}] < 8) \Rightarrow (qual_ [PREL_Pt_{BASE}] := AVERAGE),$$

$$(quan_ [PREL_Pt_{BASE}] \geq 3) \vee (quan_ [PREL_Pt_{BASE}] < 5) \Rightarrow (qual_ [PREL_Pt_{BASE}] := LOW),$$

$$(quan_ [PREL_Pt_{BASE}] < 3) \Rightarrow (qual_ [PREL_Pt_{BASE}] := ABSENT).$$

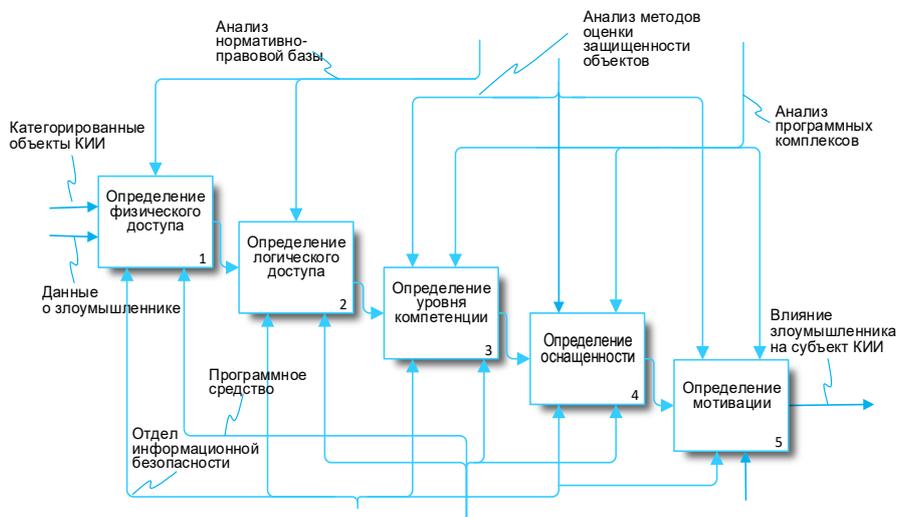


Рис. 3. Модель категорирования нарушителя ИБ на объекте КИИ в нотации IDEF0

Fig. 3. Model for Categorizing an is Violator on a CII Object in IDEF0 Notation

Последующая корректировка $PREL_Pt_{BASE}$ производится в соответствии с таблицей 3.

ТАБЛИЦА 3. Корректирующая матрица качественной оценки предварительного базового потенциала злоумышленника

TABLE 3. Corrective Matrix of Qualitative Assessment of the Preliminary Basic Potential of the Attacker

quan_ [x]/LogL	qual_PREL_Pt _{BASE}			
	ABSENT	LOW	AVERAGE	HIGH
0	ABSENT	LOW	AVERAGE	HIGH
1	ABSENT	LOW	AVERAGE	HIGH
2	LOW	AVERAGE	HIGH	HIGH
3	LOW	AVERAGE	HIGH	HIGH

Конечная корректировка $qual_PREL_Pt_{BASE}$ производится по следующим правилам:

$$(qual_M: [x] := AVERAGE) \Rightarrow (qual_Pt_{BASE} := +qual_PREL_Pt_{BASE}),$$

$$(qual_M: [x] := ABSENT) \Rightarrow (qual_Pt_{BASE} := -qual_PREL_Pt_{BASE}),$$

$$(qual_M: [x] := HIGH) \Rightarrow (qual_Pt_{BASE} := qual_PREL_Pt_{BASE}),$$

где знак «+» – переход на следующий уровень (переход от низкого или среднего на шаг выше); знак «-» означает переход на следующий уровень (переход от среднего или высокого на шаг ниже).

Для оценки коэффициента ДЗВ будем рассматривать три типа объектов КИИ (см. федеральный закон № 187):

- информационная система;
- информационно-телекоммуникационная система (ИТС);
- автоматизированная система управления (АСУ).

Для каждого объекта определим 3 возможных категории опасности при ДЗВ, где:

- 1 – наиболее опасный уровень нарушения функционирования;
- 3 – наименее опасный уровень нарушения функционирования.

Для каждого типа объектов расчет коэффициента ДЗВ производится в соответствии с таблицами 4–6.

В случае одновременного воздействия на объект КИИ нескольких злоумышленников (вариант воздействия «многие к одному» или «многие ко многим») возможны следующие ситуации:

- 1) выполняется согласованное деструктивное воздействие на 1 объект КИИ группой, состоящей из n злоумышленников;
- 2) выполняется не согласованное деструктивное воздействие на 1 объект КИИ группой, состоящей из n злоумышленников;
- 3) выполняется согласованное деструктивное воздействие на 1 объект КИИ группой, состоящей из n злоумышленников и не согласованное деструктивное воздействие на 1 объект КИИ группой, состоящей из m злоумышленников;

4) выполняется согласованное деструктивное воздействие на k объектов КИИ группой, состоящей из n злоумышленников;

5) выполняется не согласованное деструктивное воздействие на k объектов КИИ группой, состоящей из n злоумышленников;

6) выполняется согласованное деструктивное воздействие на k объектов КИИ группой, состоящей из n злоумышленников и не согласованное деструктивное воздействие на 1 объект КИИ группой, состоящей из m злоумышленников.

Для описания правил, по которым выполняется оценка коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ введем обозначения:

N_CII – N объектов КИИ, подвергающиеся ДЗВ;

M_SV – M злоумышленников воздействуют на субъект КИИ;

$V[a]$ – вид взаимодействия между злоумышленниками, где a соответствует выражению:

$$a = \begin{cases} 1, & \text{если ДЗВ субъектно согласованны} \\ 0, & \text{если ДЗВ субъектно не согласованны} \end{cases}$$

ТАБЛИЦА 4. Определение коэффициента деструктивного злоумышленного воздействия для ИС

TABLE 4. Determining the Coefficient of Destructive Malicious Influence for IS

qual_Pt _{BASE}	Категория объекта		
	3	2	1
ABSENT	0,1	0,1	0,1
LOW	0,2	2	0,3
AVERAGE	0,4	0,5	0,6
HIGH	0,7	0,8	0,9

ТАБЛИЦА 5. Определение коэффициента деструктивного злоумышленного воздействия для ИТС

TABLE 5. Determining the Coefficient of Destructive Malicious Influence for ITS

qual_Pt _{BASE}	Категория объекта		
	3	2	1
ABSENT	0,1	0,1	0,1
LOW	0,1	0,1	0,2
AVERAGE	0,3	0,4	0,5
HIGH	0,6	0,7	0,8

ТАБЛИЦА 6. Определение коэффициента деструктивного злоумышленного воздействия для АСУ

TABLE 6. Determining the Coefficient of Destructive Malicious Influence for the ASM

qual_Pt _{BASE}	Категория объекта		
	3	2	1
ABSENT	0,1	0,1	0,2
LOW	0,3	0,3	0,4
AVERAGE	0,5	0,6	0,7
HIGH	0,8	0,9	1

Так, правила оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ для работы в каждой из обозначенных ситуаций, можно представить в следующем виде.

Для ситуации 1 характерно $[1]_{CII}, [n]_{SV}, V_{[1]}$. Следовательно, имеем правило 1 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}}[1,1] | ((([1]_{CII}) \wedge ([n]_{SV}) \wedge (V_{[1]}))) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}} := \prod_{i=1,n} quan_{Pt_{BASE}}[i]. \quad (1)$$

Для ситуации 2 характерно $[1]_{CII}, [n]_{SV}, V_{[0]}$. Следовательно, имеем правило 2 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}}[1,0] | ((([1]_{CII}) \wedge ([n]_{SV}) \wedge (V_{[0]}))) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}} := quan_{Pt_{BASE}}[\max_weight[i]], \quad (2)$$

где $quan_{Pt_{BASE}}[\max_weight[i]]$ – количественная оценка потенциала злоумышленника, имеющего максимальную количественную оценку по показателю с максимальным весовым коэффициентом.

Для ситуации 3 характерно $[1]_{CII}, [n]_{SV}$ и $V_{[1]}$, и $[m]_{SV}$ и $V_{[0]}$. Следовательно, имеем правило 3 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}} | ((([1]_{CII}) \wedge ([n]_{SV}) \wedge (V_{[1]})) \wedge (([m]_{SV}) \wedge (V_{[0]}))) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}} := \max(\prod_{i=1,n} quan_{Pt_{BASE}}[i], \quad (3)$$

$$quan_{Pt_{BASE}}[\max_weight[i]].$$

Для ситуации 4 характерно $[k]_{CII}, [n]_{SV}, V_{[1]}$. Следовательно, имеем правило 4 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}}[k,1] | V_j^k | (([j,k]_{CII}) \wedge ([j,s]_{SV}) \wedge (V_{[1]}))) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}} := \prod_{i=1,n} quan_{Pt_{BASE}}[j,i], \quad (4)$$

где j – номер объекта КИИ; s – количество злоумышленников, воздействующих на j -ый объект КИИ.

В формуле (4) $quan_{Pt_{BASE}}[j,i]$ рассчитывается по правилу 1 для ДЗВ по каждому объекту КИИ.

Для ситуации 5 характерно $[k]_{CII}, [n]_{SV}, V_{[0]}$. Следовательно, имеем правило 5 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}}[l,0] | V_j^k | (([j,k]_{CII}) \wedge ([j,s]_{SV}) \wedge (V_{[0]}))) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}}[j] := \max_{i=1,n} quan_{Pt_{BASE}}[j,i]. \quad (5)$$

Здесь $quan_{Pt_{BASE}}[j,i]$ рассчитывается по правилу 1 для ДЗВ по каждому объекту КИИ.

Для ситуации 6 характерно $[k]_{CII}, [n]_{SV}$ и $V_{[1]}$, и $[m]_{SV}$ и $V_{[0]}$. Следовательно, имеем правило 6 для оценки коэффициента ДЗВ на субъекте КИИ:

$$(quan_{Pt_{BASE}}[k,l] | V_j^k | (([j,k]_{CII}) \wedge ([j,n]_{SV}) \wedge (V_{[1]})) \wedge V_j^l | (([j,l]_{CII}) \wedge ([j,m]_{SV}) \wedge (V_{[0]})) \Rightarrow (quan_{Pt_{BASE}} := quan_{Pt_{BASE}}[k,1] * quan_{Pt_{BASE}}[l,0]. \quad (6)$$

Здесь $quan_{Pt_{BASE}}[k,1]$ рассчитывается по правилу 4, $quan_{Pt_{BASE}}[l,0]$ – по правилу 5.

Использование представленных правил при построении когнитивной модели позволит спрогнозировать множество потенциально возможных ситуаций при построении модели ДЗВ и дать количественную оценку каждой ситуации в виде коэффициента ДЗВ на объект КИИ.

Эксперимент

Исследование работоспособности когнитивной модели оценки ИБ субъекта КИИ при ДЗВ проводилось по результатам исследования изменений ИБ субъекта КИИ при различных видах деструктивных воздействий на объектах КИИ (таблица 7), что соответствует исследованию поведения вершины V9 в когнитивной модели. Если по результатам исследования ИБ субъекта КИИ будет находиться на низком уровне, то необходимо выбрать рекомендации к повышению уровня ИБ.

ТАБЛИЦА 7. Планируемые эксперименты

TABLE 7. Planned Experiments

№ эксперимента	Вершина – источник	Вершина – получатель – V7		Отслеживаемая вершина	Потенциал нарушителя	Категория значимости объекта
		Объект	Категория			
1	V9	ИС	3	V13	LOW	1
2		ИС	2		ABSENT	3
		АСУ	1		HIGH	2
3		ИТС	3			1
		ИСТ	2			2
		АСУ	1			3

Таким образом, исследование работоспособности предложенной модели выполнялось в ходе решения следующих задач:

- эксперимент № 1 «Исследование влияния деструктивных воздействий нарушителя с низким потенциалом на оценку ИБ субъекта КИИ, состоящего из объекта – ИС с 1 категорией значимости»;
- эксперимент № 2 «Исследование влияния деструктивных воздействий нарушителя без потенциала и с высоким потенциалом на оценку ИБ субъекта КИИ, состоящего из объекта – ИС с 3 категорией значимости и АСУ – 2 категории значимости при деструктивных воздействиях инфраструктурного характера»;
- эксперимент № 3 «Исследование влияния деструктивных воздействий нарушителей с высоким, средним и низким потенциалами на оценку ИБ субъекта КИИ, состоящего из объектов: ИС 2 категории значимости, ИТС – 1 категории и АСУ – 3 категории значимости при деструктивных воздействиях инфраструктурного характера».

В ходе экспериментального исследования построена когнитивная карта (рисунок 4).

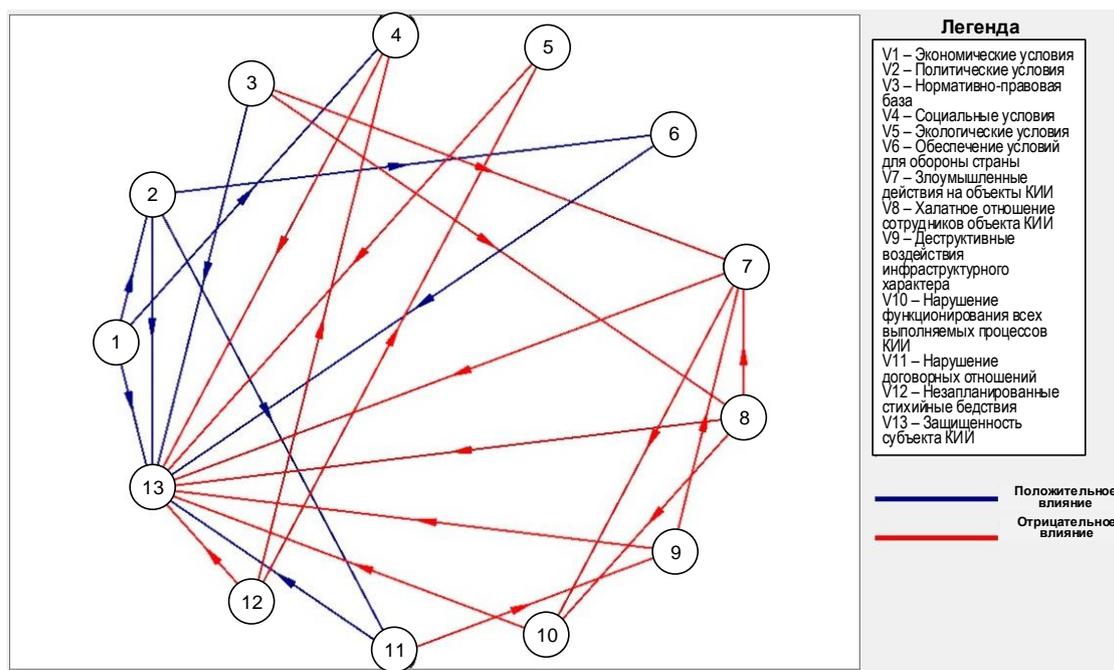


Рис. 4. Построенная когнитивная карта оценки ИБ субъекта КИИ (экранная копия)

Fig. 4. Constructed Cognitive Map of the Subject's IS Assessment CII (Screen Copy)

Результаты работы программного комплекса по решаемым задачам представлены на рисунке 5.

Методика работы с программным комплексом по оценке ИБ субъекта КИИ предполагает выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Запуск программного средства выполняется из директории:

Ваш_диск:\Программа\kii\bin\Debug\kii.exe.

Шаг 2. Выбор категории злоумышленника из шаблона или задание значений проектировщиком.

Шаг 3. Оценка категории злоумышленника.

Шаг 4. Задание количества объектов и их категории.

Шаг 5. Корректировка работы по выбору объектов.

Шаг 6. В окне «Потенциал» выбор вида злоумышленника и установление для него сравнительного значения из окна «Категория».

Шаг 7. Оценка злоумышленных действий.

Шаг 8. Переход на вкладку «Построение когнитивной карты».

Шаг 9. Построение когнитивной карты.

Шаг 10. Визуализация когнитивной карты с легендой.

Шаг 11. Если построенная когнитивная карта не удовлетворяет пользователя – изменение положения вершин.

Шаг 12. Переход на вкладку «Построение когнитивной карты».

Шаг 13. Ввод значения вершин.

Шаг 14. Ввод количества шагов моделирования.

Шаг 15. Выбор вершины получателя.

Шаг 16. Выбор вершин для графической визуализации.

Шаг 17. Построение графика из выбранных вершин.

Шаг 18. Визуализация построенного графика по заданным вершинам.

Результаты экспериментов представлены в таблице 8.

ТАБЛИЦА 8. Результаты экспериментального исследования работоспособности модели оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях

TABLE 8. Results of an Experimental Study of the Performance of the IS SCII Assessment Model under Destructive Influences

№ эксперимента	Вершина – источник	Вершина получатель – V7		Отслеживаемая вершина	Результат эксперимента	Оценка ИБ субъекта КИИ	Результат повторного эксперимента с учетом рекомендаций	Оценка ИБ субъекта после примененных рекомендаций
		Объект/ категория объекта	Категория					
1	HIGH	ИС-1	LOW	V13	-0,45	Значительный уровень снижения ИБ субъекта КИИ относительно исходного	0,55	Средний уровень ИБ
2		ИС-3	ABSENT		-0,39		0,71	Средний уровень ИБ
		АСУ-2	AVERAGE					
3		ИТС-1	AVERAGE		-0,40		0,8	Высокий уровень ИБ
		ИС-2	AVERAGE					
	АСУ-3	ABSENT						

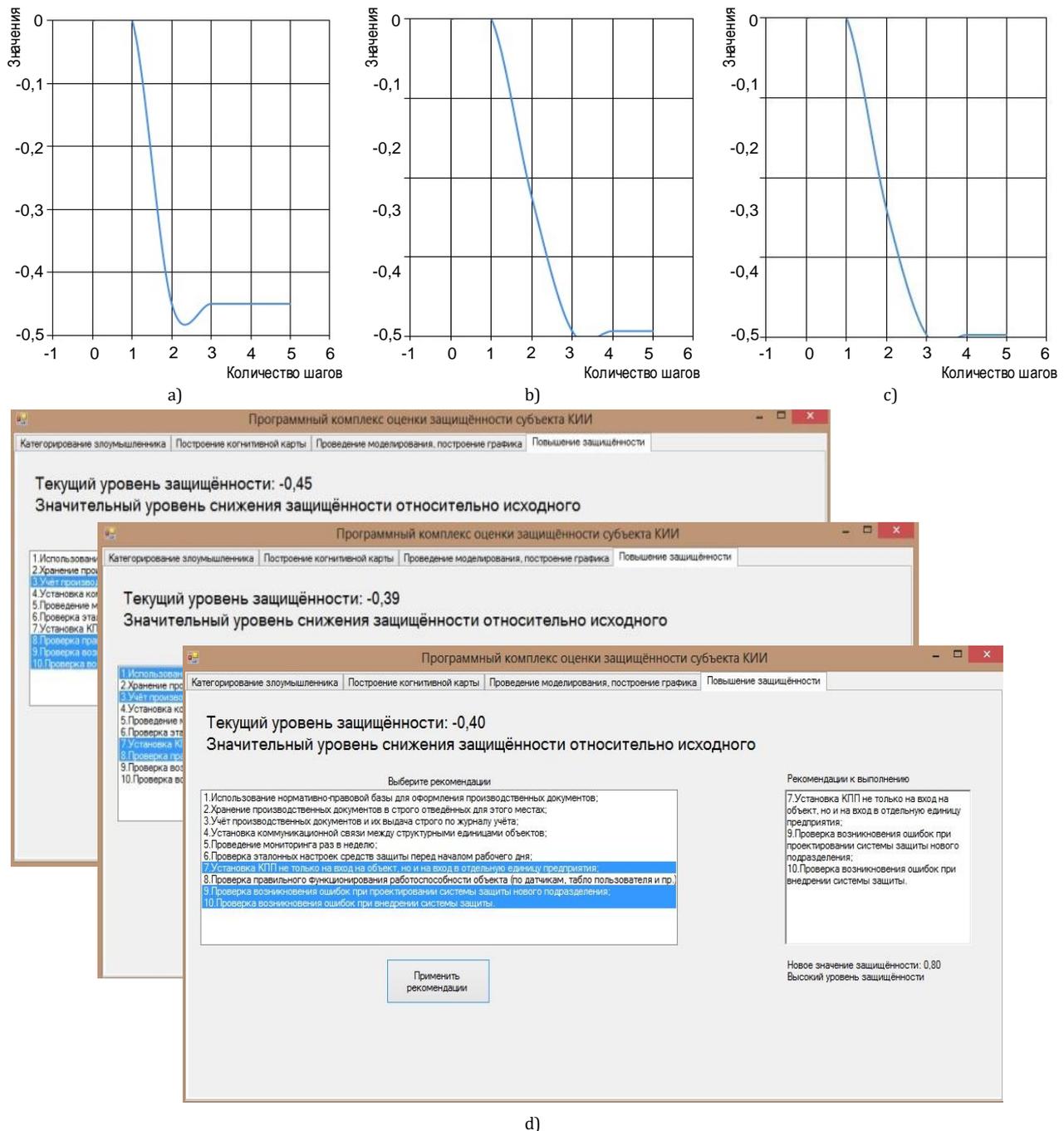


Рис. 5. Результат эксперимента № 1 (а), эксперимента № 2 (б), эксперимента № 3 (с) и экранные копии окон выдачи рекомендаций и оценки уровня ИБ субъекта КИИ (д)

Fig. 5. Results of Experiment № 1 (a), Experiment № 2 (b), Experiment № 3 (c) and Screen Copies the Windows for Issuing Recommendations and Evaluating the Level of IBS (d)

Диаграмма размещения вершин относительно импульсных процессов (рисунок 6) выстроена по результатам экспериментального исследования в формате SWOT-анализа. Использование данного формата эффективно при выполнении начальной оценки текущей ситуации в сфере ИБ на субъекте КИИ. Однако он не может заменить выработку стратегии или качественный анализ в динамике. Здесь возможно исследование ситуации, относительно которой нужно принять решение. При этом, полученные выводы могут иметь описательный

характер без рекомендаций и определения целевых функций в стратегии.

Важно отметить, что предлагаемая когнитивная модель оценки деструктивных злоумышленных воздействий на объектах КИИ позволит снизить погрешность в оценки ИБ субъекта КИИ, следовательно, повысит эффективность системы защиты информации. Последнее, в свою очередь, будет достигаться за счет корректировки состава системы защиты, путем введения в нее механизмов предотвращения ДЗВ инфраструктурного характера.

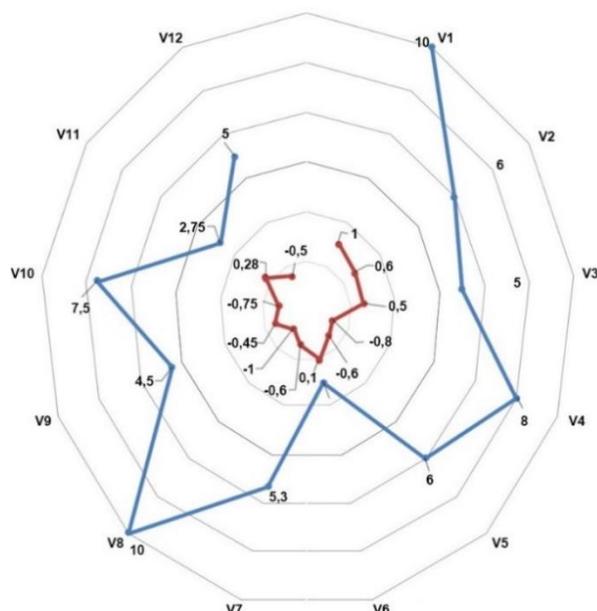


Рис. 6. Диаграмма размещения вершин относительно импульсных процессов

Fig. 6. Diagram of Vertex Placement Relative to Pulse Processes

Выводы

Таким образом, в ходе исследования проведена серия экспериментов, направленных на моделирование угроз, совершенных различными категориями злоумышленников на объекты КИИ. В результате работы, использование разработанной модели, позволило оценить ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях. Разработанный программный комплекс позволил провести категорирование злоумышленника, построить когнитивную карту оценки ИБ субъекта КИИ, смоделировать ДЗВ через различные вершины-источники, построить экспериментальные графики и представить рекомендации по повышению уровня ИБ субъекта КИИ. Предложенная модель и ее программная реализация могут стать активными помощниками для собственников объектов КИИ в процессе решения практических задач на всех этапах жизненного цикла субъекта КИИ. Для регуляторов – предлагаемый подход к оценке ИБ субъекта КИИ, позволит повысить достоверность предоставляемых собственниками объектов КИИ данных на этапе категорирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 3/2020).

Список используемых источников

1. Yuill J., Wu F., Settle J., Gong F., Huang M. Intrusion-detection for incident-response, using a military battlefield-intelligence process // Computer Networks. 2000. Vol. 34. Iss. 4. PP. 671–697. DOI:10.1016/S1389-1286(00)00142-0
2. Jha S., Sheyner O., Wing J.M. Minimization and Reliability Analyses of Attack Graphs // CMU-CS-02-109. Pittsburgh: School of Computer Science Carnegie Mellon University, 2002.
3. Chi S.-D., Park J.S., Jung K.-C., Lee J.-S. Network Security Modeling and Cyber Attack Simulation Methodology // Proceedings of the 6th Australasian Conference on Information Security and Privacy on Information Security and Privacy (Sydney, Australia, 11–13 July 2001). Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. Vol. 2119. DOI:10.1007/3-540-47719-5_26
4. Базовая модель угроз персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. Москва, 2008. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/289> (дата обращения 29.10.2020)
5. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения. М.: Военное издательство, 1992.
6. Методические рекомендации по разработке нормативных правовых актов, определяющих угрозы безопасности персональных данных, актуальные при обработке персональных данных в информационных системах персональных данных, эксплуатируемых при осуществлении соответствующих видов деятельности. № 149/7/2/6-432 от 31.03.2015.
7. Бояринцев А.В., Ничиков А.В., Редькин В.Б. Общий подход к разработке моделей нарушителей // Системы безопасности. 2007. № 4. С. 50–53.
8. Спивак А.И. Оценка эффективности атак злоумышленника в процессе построения его модели // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 2(66). С. 108–112.
9. Жуков В.Г., Жукова М.Н., Стефаров А.П. Модель нарушителя прав доступа в автоматизированной системе // Программные продукты и системы. 2012. № 2(98). С. 75–78.
10. Савченко С.О., Капчук Н.В. Алгоритм построения модели нарушителя в системе информационной безопасности с применением теории игр // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 4. С. 84–89. DOI:10.25206/2310-9793-2017-5-4-84-89
11. Гафизов Р.М., Ахматзода Ш.А. Разработка модели нарушителя беспроводной сети // Инновации в науке. 2018. № 12(88). С. 10–12.
12. Максимова Е.А. Исследование алгоритмов безопасной передачи данных между объектами критической информационной инфраструктуры // XXIII пленум ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации» (Ставрополь, Россия, 1–5 октября 2019). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. С. 157–163.
13. Шихвердиева А.Ш., Максимова Е.А. Управление эксплуатацией объектов критической информационной инфраструктуры // XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Тамбов, Россия, 10–13 сентября 2019). Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. С. 392–397.

14. Баранов В.В., Максимова Е.А., Лаута О.С. Анализ модели информационного обеспечения процессов и систем при реализации многоагентного интеллектуального взаимодействия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 4. С. 32–41.
15. Тищенко Е.Н. Анализ защищенности экономических информационных систем: монография. Ростов н/Д: М-во образования Рос. Федерации. Рост. гос. экон. ун-т, 2003. 191 с.
16. Громов Ю.Ю., Елисеев А.И., Минин Ю.В., Сумин В.И. Анализ надежности в сетевых информационных системах // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2018. № 1. С. 33–41
17. Ажмухамедов И.М. Управление слабоформализуемыми социотехническими системами на основе нечеткого когнитивного моделирования (на примере систем комплексного обеспечения информационной безопасности). Дис. ... докт. техн. наук. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2014.
18. Садовникова Н.П., Жидкова Н.П. Выбор стратегий территориального развития на основе когнитивного анализа и сценарного моделирования // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 7(21).
19. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / пер. с англ. М.: Наука, 1986. 496 с.
20. Дроботун Е.Б., Цветков О.В. Построение модели угроз безопасности информации в автоматизированной системе управления критически важными объектами на основе сценариев действий нарушителя // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 42–50. DOI:10.15827/0236-235X.115.042-050

* * *

Cognitive Modeling of Destructive Malicious Impacts on Critical Information Infrastructure Objects

E. Maksimova¹ 

¹MIREA – Russian Technological University,
Moscow, 119454, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-91-103

Received 21st September 2020

Accepted 20th October 2020

For citation: Maximova E. Cognitive Modeling of Destructive Malicious Impacts on Critical Information Infrastructure Objects. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):91–103. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-91-103

Abstract: *The security of a subject of critical information infrastructure (CII) is one of the key issues of its life support. The current approach (legal and regulatory) regulates solutions of this issue without taking into account the influence of the violator, which can have a destructive effect on the SCII. This, in our opinion, leads to significant errors in the analysis of the information security of the CII, therefore, reduces the effectiveness of the information protection means declared information security tools for CII objects. The purpose of this work is to develop a model of an information security (IS) intruder, presented in a formalized form using the "violator's potential" parameter in the space of their implementation of destructive effects on the objects of the CII. The proposed model for assessing the capabilities of the offender to implement destructive influences on the CII subject as a set of objects is implemented in the developed cognitive map "Assessment of the IB of the CII Subject" for dynamic changes in the parameters of the "Malicious actions on the CII object" vertex.*

Keywords: *violator, subject, critical information infrastructure, category, destructive effects, model, cognitive model.*

References

1. Yuill J., Wu F., Settle J., Gong F., Huang M. Intrusion-detection for incident-response, using a military battlefield-intelligence process. *Computer Networks*. 2000;34(4):671–697. DOI:10.1016/S1389-1286(00)00142-0
2. Jha S., Sheyner O., Wing J.M. *Minimization and Reliability Analyses of Attack Graphs. CMU-CS-02-109*. Pittsburgh: School of Computer Science Carnegie Mellon University; 2002.
3. Chi S.-D., Park J.S., Jung K.-C., Lee J.-S. Network Security Modeling and Cyber Attack Simulation Methodology. *Proceedings of the 6th Australasian Conference on Information Security and Privacy on Information Security and Privacy, 11–13 July 2001, Sydney, Australia. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2001. vol.2119. DOI:10.1007/3-540-47719-5_26

4. *Basic model of threats to personal data during their processing in personal data information systems*. Moscow; 2008. (in Russ.) Available from: <https://fstec.ru/component/attachments/download/289> [Accessed 29th October 2020]
5. State Technical Commission of Russia. *Guidance document. Protection against Unauthorized Access to Information. Terms and Definitions*. Moscow: Voennoe izdatelstvo Publ.; 1992. (in Russ.)
6. *Methodological Recommendations for the Development of Regulatory Legal Acts that Determine Threats to the Security of Personal Data, Relevant When Processing Personal Data in Personal Data Information Systems Used in the Implementation of Relevant Activities*. Approved by the Leadership of the 8th Center of the Federal Security Service of Russia. No. 149/7/2/6-43, 31st March 2015. (in Russ.)
7. Boyarintsev A.V., Nichikov A.V., Redkin V. B. General Approach to the Development of Models of Violators. *Security and Safety*. 2007;4:50–53. (in Russ.)
8. Spivak A. The Efficiency Estimation of the Intruder Attacks in the Process of His Model Creation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics of ITMO University*. 2010;2(66):108–112. (in Russ.)
9. Zhukov V.G., Zhukova M.N., Stepanov A.P. Model of Access Rights Violator in an Automated System. *Software & Systems*. 2012;2(98):75–78 (in Russ.)
10. Savchenko S.O., Kapchuk N.V. Algorithm for Constructing the Intruder Model in the Information Security System Using Game Theory. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2017;5(4):84–89. (in Russ.) DOI:10.25206/2310-9793-2017-5-4-84-89
11. Khafizov R.M., Ahmadzade S.A. Development of a Model of a Wireless Network. *Innovatsii v nauke*. 2018;12(88):10–12. (in Russ.)
12. Maksimova E.A. Study of Algorithms for Secure Transmission of data between the objects of Critical Information Infrastructure. *Proceedings of the XXIII Plenum of the Fundamental Problems of Information Security in the Context of Digital Transformation and the All-Russian Scientific Conference, 1–5 October 2019, Stavropol, Russia*. Stavropol: North Caucasus Federal University Publ.; 2019. p.157–163. (in Russ.)
13. Shahverdiev A.S., Maksimova E.A. Management of Operation of Critical Information Infrastructure's Objects. *Proceedings of the XVI All-Russian School-Conference of Young Scientists on Management of Large Systems, 10–13 September 2019, Tambov, Russia*. Tambov: Tambov State Technical University Publ.; 2019. p.392–397. (in Russ.)
14. Baranov V.V., Maximova E.A., Laut O.S. Analysis of the Model of Information Support of Processes and Systems in the Implementation of Multi-Agent Intellectual Interaction. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2019;4:32–41. (in Russ.)
15. Tishchenko E.N. *Analysis of Security of Economic Information Systems*. Rostov on Don: Ministry of Education of the Russian Federation. Rostov State Economic University Publ.; 2003. 191 p. (in Russ.)
16. Gromov Yu.Yu., Eliseev A.I., Minin Yu.V., Sumin, V.I. Analysis of Reliability in Network Information Systems. *Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*. 2018;1:33–41. (in Russ.)
17. Azhmukhamedov I.M. *Management of Weakly Formalized Sociotechnical Systems Based on Fuzzy Cognitive Modeling (on the Example of Integrated Information Security Systems)*. D.Sc. Thesis. Astrakhan: Astrakhan State Technical University Publ.; 2014. (in Russ.)
18. Sadovnikova N.P., Zhidkova N.P. Selection of Territorial Development Strategies Based on cognitive analysis and Scenario Modeling. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2012;7(21) (in Russ.)
19. Roberts F.S. *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological and Environmental Problems*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. 496 p. (in Russ.)
20. Drobotun E.B., Tsvetkov O.V. Modeling Information Security Threats in the Automated Control System for Crucial Objects on the Basis of Attack Scenarios. *Software & Systems*. 2016;3:42–50. (in Russ.) DOI:10.15827/0236-235X.115.042-050

Сведения об авторе:

МАКСИМОВА
Елена Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» (КБ-2) института Комплексной безопасности и специального приборостроения МИРЭА – Российского технологического университета,
maksimova@mirea.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8788-4256>

Создание и использование информационных резервов при сопровождении больших технических систем

А.В. Шестаков¹, К.З. Билятдинов^{2*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

*Адрес для переписки: k74b@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.10.2020

Принята к публикации 18.11.2020.

Ссылка для цитирования: Шестаков А.В., Билятдинов К.З. Создание и использование информационных резервов при сопровождении больших технических систем // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 104–110. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-104-110

Аннотация: Внедрение и использование для поддержки принятия решений современных методов проактивного управления на основе сбора, обработки разнородных данных о системе и формируемых прецедентов событий и корректирующих действий требует поиска новых системотехнических решений сбора, хранения и предварительного анализа данных с учетом условий управления и их структурно-функционального построения. Особенностью сложных или больших технических систем объектов промышленности, информатизации и связи, транспорта и т. д., является совмещение этапов совершенствования (модернизации компонент) и развития (внедрения принципиально новых системотехнических решений) в ходе их штатной эксплуатации. В связи с этим достаточно актуальным является исследование модели сопровождения структурно-функциональных изменений и способов формирования баз данных на основе информационных резервов поддержки принятия решений проактивного управления. Впервые представлены системотехнические решения по реализации оригинальных модели и способа на основе комплекса компьютерных программ и результаты экспериментальных испытаний.

Ключевые слова: большие технические системы, информационные резервы, модель, способ формирования информационных резервов.

Введение

Важность эффективного функционирования больших технических систем (далее – Систем) предопределяет необходимость совершенствования организационно-технических мер в области сопровождения Систем на этапе эксплуатации, включая оценку их качества.

Исследования предметной области выявили ряд нерешенных задач в части рациональной организации работ по совершенствованию и развитию Систем на основе современных апробированных методик оценки качества с использованием больших объемов разнообразной информации из различных источников [1–2]. В обобщенном виде сведения о подмножествах наборов данных характеристик сложных систем, существующих методологических подходов к оценке качества, можно представить следующим образом:

– для продукции в [3] рекомендована модель качества (Мк), а для технических средств – в [4];

– для программных средств в [5] представлена модель качества внутренних (Мквн) и модель качества внешняя (Мквнеш);

– для автоматизированных систем и программных средств в [6] описана Мк, модель качества при использовании (Мки) и модель качества данных (Мкд).

Каждый из наборов данных формируется подсистемой мониторинга Системы: технологически и визуальными данными (от источников (компонент Систем), как правило, территориально-разнесенных) о функционировании компонент Систем; текстовыми и графическими данными (от внешних систем); данными о прецедентах событиях (ситуациях) и предупреждающих (корректирующих) действиях (от подсистемы предварительной обработки данных Системы) [7–8].

Для хранения данных о прецедентах и действиях необходимо создать информационные резервы для оценки качества и разработать процедуры работы с ними, так как большинство управленческих решений в эксплуатации и техническом обеспечении принимаются после сбора и обработки требуемой информации на основе результатов оценки эффективности и качества Систем [7].

Постановка задачи

Наиболее рациональным подходом решения комплекса задач при эксплуатации и техническом обеспечении Систем является разработка и применение модели сопровождения структурно-функциональных изменений и способа формирования информационных резервов для оценки качества и рациональной работы с информационными ресурсами для реализации проактивного управления.

Разработка модели и способа должна обеспечить:

- существенное сокращение продолжительности времени сбора, обработки данных, оценки эффективности и качества Системы и трудозатрат персонала;
- увеличение объема обрабатываемой информации при незначительном расходе ресурсов и временных затратах;
- своевременное, наглядное и информативное представление сведений лицу, принимающему решение (далее – ЛПР).

Решение комплекса задач требуется реализовать программными средствами.

Модель сопровождения Систем на этапе эксплуатации

Анализ уровня развития методологических подходов организационно-технических мер в области сопровождения Систем на этапе эксплуатации, включая оценку их качества, указывает на достаточно глубокие исследования частных аспектов и необходимость разработки комплексного решения. Модель и метод по агрегированию разнородных потоков данных от двух источников (технологических датчиков и средств) посредством их слияния на основе технологий Apache Kafka и Spark Streaming можно отнести к предпроцессной обработке данных [9]. Подсистема безопасности критически важных инфраструктур – одна из значимых в Системе, для организации управления которой предложено использовать данные мониторинга событий безопасности, была рассмотрена в [10]. Возможность применения и сопровождения универсальных механизмов уникальных обращения пользователей к "озеру данных" территориально-распределенных хранилищ данных в соответствии с реальными условиями эксплуатации Систем была исследована в [11]. Различные метрики и оригинальные подходы к группированию (кластеризации) характеристик существенных свойств компь-

ютерных систем дали основание проанализировать преимущества и недостатки различных методов оценки качества программных средств [12].

Модель сопровождения Систем на этапе эксплуатации (далее – Модель), предлагаемая к рассмотрению, представляет собой инфологическое описание процесса сопровождения больших технических объектов при эксплуатации с учетом управляющих воздействий по поддержанию функционирования с заданными требованиями и процедурами по ее совершенствованию и развитию (рисунок 1). Модель универсальна, учитывает специфику, условия эксплуатации и применима для большинства современных Систем. Модель предназначена для определения роли, места, содержания информационных ресурсов, математического и программного обеспечения оценки качества Системы. Процедуры способа формирования и использования информационных резервов Системы в соответствии с Моделью представлены на рисунке 2.

По результатам оценки качества ЛПР принимает одно из четырех типов управленческих решений:

- результаты оценки качества удовлетворяют требованиям (решение не вмешиваться в функционирование систем);
- управленческие решения организационно-технического характера по повышению (обеспечению) эффективности функционирования системы непосредственно в процессе эксплуатации объекта: по вопросам совершенствования эксплуатации и технического обеспечения, а также подготовки персонала для достижения этих целей; требует незначительного расхода ресурсов и времени;
- решения по модернизации существующих систем принимаются в случае, если определено, что второй тип решений не позволит достичь требуемого результата при заданных условиях, а создание новых Систем не рационально; продолжительность реализации решения составляет 3–5 лет;
- решения по созданию новых Систем принимаются в случае, если другие типы решений не позволяют достичь требуемого результата; реализация требует значительной длительности (как правило, 5–10 лет) и капиталоемкости.

Решения принимаются на основе результатов оценки качества, после сбора и обработки данных из различных источников [13].

Источниками информации в Модели (см. рисунок 2) для информационных резервов Системы выступают: должностные лица, эксперты, внутренние (статистические отчеты, техническая документация объекта, измерительные приборы, датчики контроля состояния технических средств в различных режимах эксплуатации) и внешние источники (информационные ресурсы сети Интернет), результаты оценок качества Системы и т. д. [14].

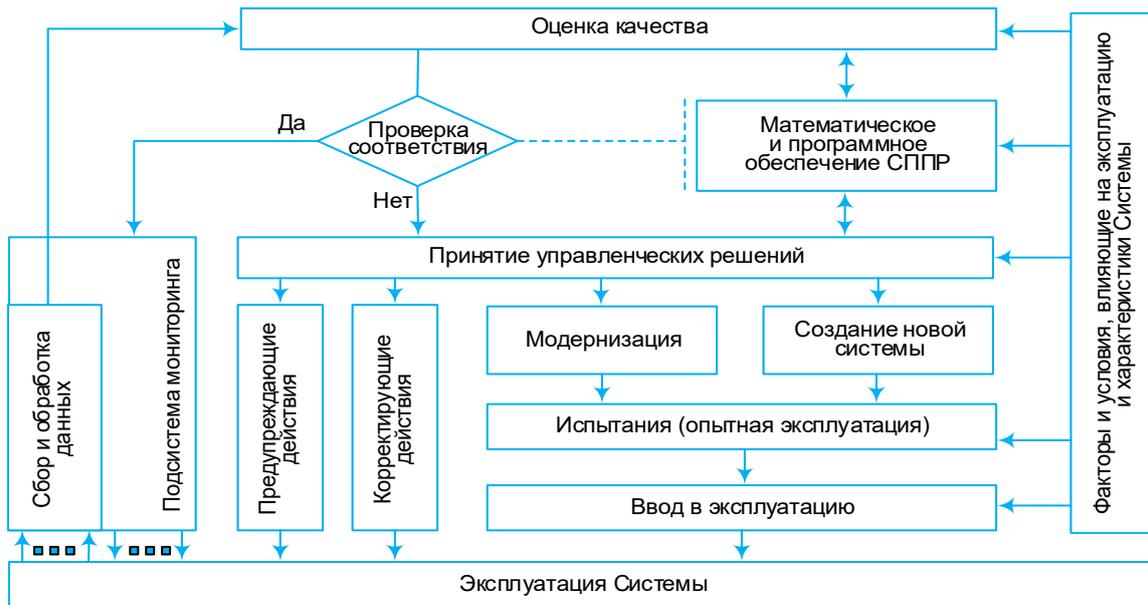


Рис. 1. Модель сопровождения систем на этапе эксплуатации
 Fig. 1. Model of System Maintenance at the Operational Stage

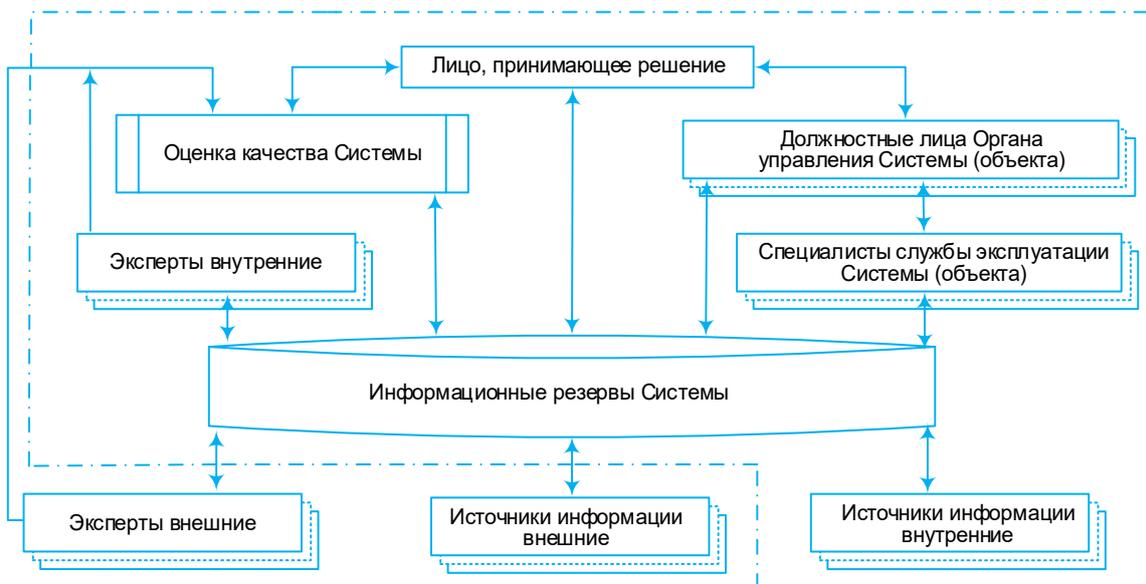


Рис. 2. Процедуры способа формирования и использования информационных резервов Системы
 Fig. 2. Procedures for Forming and Using the System's Information Reserves

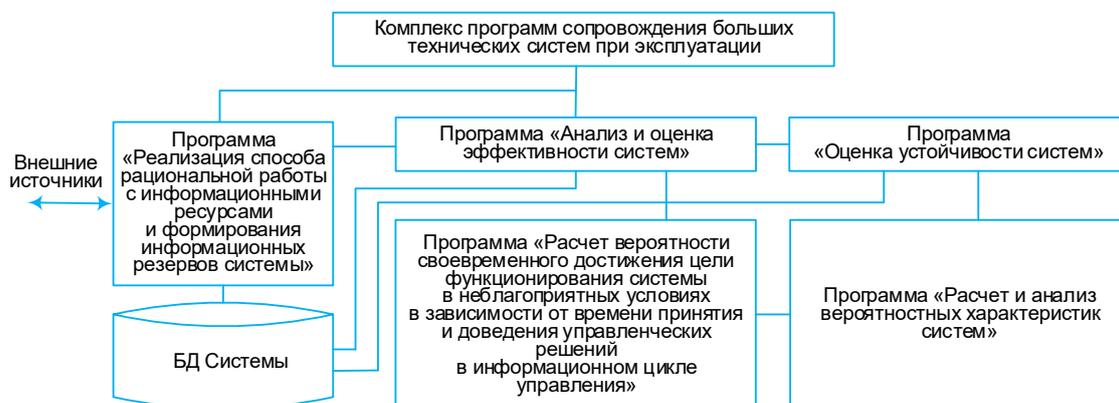


Рис. 3. Структура разработанного комплекса программ
 Fig. 3. Structure of the Developed Software Package

Информационные резервы состоят из Базы данных основных сведений о системе, эксплуатации и техническом обеспечении, Архива, а также нормативно-правовых актов, нормативно-технических документов, необходимых для обеспечения функционирования, методического (в составе методик анализа и оценки) и математического обеспечения.

База данных основных сведений о Системе содержит наиболее часто запрашиваемые сведения в виде текстовых документов с краткой информацией по запросу. Документы могут быть в виде отчетов, докладов, выводов по результатам оценки эффективности и качества, сведений об устойчивости, выписок, справок и др. Документы в БД основных сведений о Системе могут содержать ссылки на информацию в Архиве.

База данных основных сведений эксплуатации и технического обеспечения содержит данные о техническом состоянии основных, вспомогательных и общеобъектовых технических средствах, ЗИП и ремонтных комплектах, систем электропитания, заземления и т. д.

Архив содержит сведения о системе, ситуациях и прецедентах решений в виде текстовых документов, шаблонов оформления рабочих документов, таблиц, графиков, рисунков, фотографий, аудио- и видеофайлов и др. Файлы в Архиве могут содержать ссылки на источники получения информации.

Объектами учета в БД являются структурированные и неструктурированные данные внутренних ($I_{вн}$) и внешних ($I_{внеш}$) источников информации, внутренних ($\mathcal{E}_{вн}$) и внешних ($\mathcal{E}_{внеш}$) экспертов и ряд других объектов, которые можно описать через множество параметров и представить в виде:

а) совокупности множеств источников (I) и экспертов (\mathcal{E}) в виде:

$$I = \{I_{внk}, I_{внешl}, k = 1, K; l = 1, L\},$$

$$\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{вни}, \mathcal{E}_{внешi}, i = 1, I; j = 1, J\},$$

где $I_{внk}$, $I_{внешl}$ – множество шаблонов данных по источникам; $\mathcal{E}_{вни}$, $\mathcal{E}_{внешi}$ – множество шаблонов данных по экспертам; k, l, i, j – количество шаблонных форм по предметным областям (техническим системам, изделиям) компонент и Системы в целом;

б) шаблонных форм следующей структуры:

$$I_{вн} = \langle \text{Пи}_{вн1}, \text{Пи}_{вн2}, \text{Пи}_{вн3}, \text{Пи}_{вн4}, \text{Пи}_{вн5}, \text{Пи}_{вн6} \rangle,$$

$$I_{внеш} = \langle \text{Пи}_{внеш1}, \text{Пи}_{внеш2}, \text{Пи}_{внеш3}, \text{Пи}_{внеш4}, \text{Пи}_{внеш5}, \text{Пи}_{внеш6}, \text{Пи}_{внеш7} \rangle,$$

$$\mathcal{E}_{вн} = \langle \text{ПЭ}_{вн1}, \text{ПЭ}_{вн2}, \text{ПЭ}_{вн3}, \text{ПЭ}_{вн4}, \text{ПЭ}_{вн5}, \text{ПЭ}_{вн6}, \text{ПЭ}_{вн7}, \text{ПЭ}_{вн8} \rangle,$$

$$\mathcal{E}_{внеш} = \langle \text{ПЭ}_{внеш1}, \text{ПЭ}_{внеш2}, \text{ПЭ}_{внеш3}, \text{ПЭ}_{внеш4}, \text{ПЭ}_{внеш5}, \text{ПЭ}_{внеш6}, \text{ПЭ}_{внеш7}, \text{ПЭ}_{внеш8} \rangle,$$

где $\text{Пи}_{вн1}$, $\text{Пи}_{внеш1}$ – название источника (файл, ключевое слово); $\text{Пи}_{вн2}$ – место в базе данных основных сведений; $\text{Пи}_{вн3}$ – место в Архиве; $\text{Пи}_{вн4}$, $\text{Пи}_{внеш4}$ – история обращений; $\text{Пи}_{вн5}$, $\text{Пи}_{внеш5}$, $\text{ПЭ}_{вн6}$, $\text{ПЭ}_{внеш6}$ – ко-

личество обращений; $\text{Пи}_{вн6}$, $\text{Пи}_{внеш6}$, $\text{ПЭ}_{вн7}$, $\text{ПЭ}_{внеш7}$ – оценка полезности; $\text{Пи}_{внеш2}$ – Интернет-адрес; $\text{Пи}_{внеш3}$ – другие источники; $\text{Пи}_{внеш7}$ – правила доступа; $\text{ПЭ}_{вн1}$, $\text{ПЭ}_{внеш1}$ – место в рейтинге; $\text{ПЭ}_{вн2}$, $\text{ПЭ}_{внеш2}$ – должность; $\text{ПЭ}_{вн3}$, $\text{ПЭ}_{внеш3}$ – фамилия, имя, отчество; $\text{ПЭ}_{вн4}$, $\text{ПЭ}_{внеш4}$ – образование, достижения в работе; $\text{ПЭ}_{вн5}$, $\text{ПЭ}_{внеш5}$ – стаж работы; $\text{ПЭ}_{вн8}$ – способы связи; $\text{ПЭ}_{внеш8}$ – ссылки на источники, выражающие мнение эксперта.

Системотехнические решения и результаты

Решение рассмотренного комплекса задач предлагается реализовать специально разработанными и зарегистрированными программными средствами [15–19]. Программные средства входят в состав комплекса, структура которого представлена на рисунке 3.

Программа «Оценка устойчивости систем» выполняет расчеты значений показателей качества, влияющих на устойчивость организационно-технических систем: время устойчивого функционирования, ресурсы, количество элементов, количество персонала, трудозатраты, неисправности, возможности системы по восстановлению и результаты восстановления. Отчеты формируются в виде таблиц, графиков и диаграмм в формате документов Word. Результаты отображаются в режиме реального времени.

Программа «Расчет вероятности своевременного достижения цели функционирования системы в неблагоприятных условиях в зависимости от времени принятия и доведения управленческих решений в информационном цикле управления» позволяет провести расчеты на основе использования экспериментально полученных данных.

Программа «Расчет и анализ вероятностных характеристик системы» позволяет проводить расчет вероятности отказов (неисправностей) задаваемого числа элементов и кумулятивной вероятности в зависимости от общего количества отказов элементов; построение и сравнение графиков и таблиц, а также их сохранение и экспорт в Word и (или) в Excel.

Программа «Анализ и оценка эффективности системы» позволяет сравнивать объекты (периоды времени) по результату и (или) показателю функционирования, а также по соотношению израсходованных ресурсов и результата. Предусмотрена возможность формирования отчетов в формате документов в формате Word, а также визуализации полученных результатов в режиме реального времени.

Программа «Реализация способа рациональной работы с информационными ресурсами и формирования информационных резервов системы» обеспечивает поиск информации, а также формирование информационных резервов системы по требуемой предметной области, состоящей из базы

данных, в которой хранится наиболее часто востребованная информация и архива (куда помещается более подробная информация по заданной предметной области).

Комплексное применение моделей, методик, способа и программ для ЭВМ позволило существенно уменьшить время оценки качества систем и, как следствие, уменьшилось время принятия обоснованных управленческих решений, а также время эксплуатации автоматизированных рабочих мест.

Для оценки возможностей оригинальных системотехнических решений были сформировано две группы автоматизированных рабочих мест и пользователей: контрольная группа, которая не использовала разработанный комплекс программ, и экспериментальная группа, которая использовала автоматизированные рабочие места, оснащенные новым комплексом программ. Результаты применения оригинальных системотехнических решений приведены на рисунке 4.

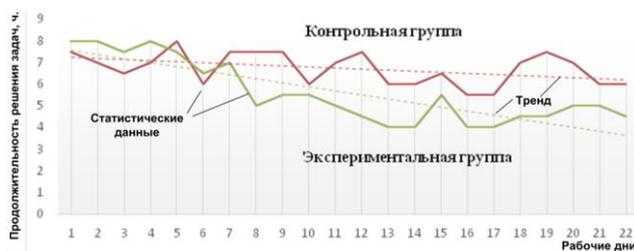


Рис. 4. Результаты применения оригинальных системотехнических решений

Fig. 4. Results of Application of Original System Engineering Solutions

Группы решали однотипные задачи в одинаковых условиях. Выигрыш по времени в экспериментальной группе составил 16,8 % по сравнению с контрольной. При этом продолжительность эксплуатации одного рабочего места экспериментальной группы за 8-часовой рабочий день снизилась в среднем на 1 час. Отмечено, что через 10 рабочих дней после внедрения новых системотехнических решений объем информации в ПЭВМ и серверах увеличился в 1,74 раза. В дальнейшем это увеличение происходило незначительно. Это объясняется характером процесса формирования основных ин-

Список используемых источников

1. Шестаков А.В. Введение в методологию обработки геопространственных данных генотипа телекоммуникаций. СПб.: ГУАП, 2016. 325 с.
2. Билятинов К.З., Шлянцев И.В., Меняйло В.В. Применение структурно-функциональной модели в методе и методике оценки качества систем // Вестник воздушно-космической обороны. 2020. № 3(27). С. 5–13.
3. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2009.
4. ГОСТ Р 58777-2019. Воздушный транспорт. Аэропорты. Технические средства досмотра. Методика определения показателей качества распознавания незаконных вложений по теневым рентгеновским изображениям. М.: Стандартинформ, 2019.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 Информационная технология (ИТ). Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. М.: Стандартинформ, 2004.
6. ISO/IEC 25000:2014 Systems and software engineering. Systems and software. Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Guide to SQuaRE. 2014-03.
7. Filz M., Herrmann C., Thiede S. Simulation-based Assessment of Quality Inspection Strategies on Manufacturing Systems // Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. PP. 777–782. DOI:10.1016/j.procir.2020.04.069

формационных резервов Системы. По этой же причине в первые 5 рабочих дней увеличилась продолжительность выполнения задач сбора и обработки информации. В течении 15–20 рабочих дней после начала внедрения способа наблюдалось сокращение продолжительности доступа к сети Интернет в среднем на 46 %, а в последующем – не изменялась и составила в среднем 39 минут с одного рабочего места за 8-часовой рабочий день. В результате внедрения нового методического обеспечения и комплекса программ существенно изменилось распределение обращений к информационным ресурсам для ответов на запросы и решения задач сбора и обработки информации (рисунок 5).

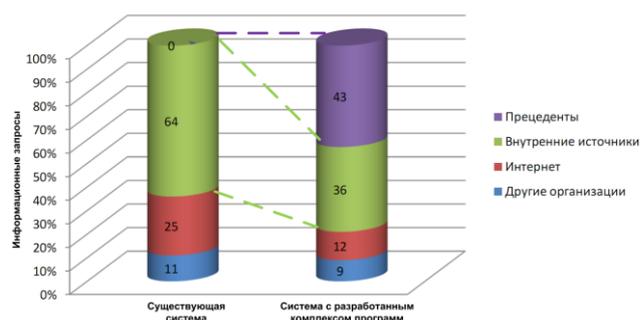


Рис. 5. Распределение обращений к информационным ресурсам

Fig. 5. Distribution of Requests to Information Resources

Анализ диаграмм показывает увеличение количества обращений к внутренним информационным ресурсам (информационным резервам) при уменьшении количества обращений к внешним источникам информации на 15 % в общем объеме запросов.

Заключение

Модель сопровождения Систем при их эксплуатации рекомендуется в качестве основы для рациональной организации оценки качества Систем. Разработанный комплекс программ позволяет реализовать новую организацию взаимодействия в процессе оценки качества, которая обеспечивает снижение времени оценки в условиях увеличения объемов использованной информации.

8. Hund L., Schroeder B., Rumsey K., Huerta G. Distinguishing between model- and data-driven inferences for high reliability statistical predictions // *Reliability Engineering and System Safety*. 2018. Vol. 180. PP. 201–210. DOI:10.1016/j.ress.2018.07.017
9. Tran V.P., Shcherbakov M., Nguyen T.A. Yet another method for heterogeneous data fusion and preprocessing in proactive decision support systems: distributed architecture approach // *Proceedings of the 20th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks (DCCN, Moscow, Russia, 25–29 September 2017)*. Springer International Publishing AG, 2017. PP. 319–330. DOI:10.1007/978-3-319-66836-9_27
10. Ерохин С.Д., Петухов А.Н., Пилюгин П.Л. Событийно-ориентированная политика безопасности и формальная модель механизма защиты критических информационных инфраструктур // *Труды учебных заведений связи*. 2019. Т. 5. № 4. С. 99–105. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-99-105
11. Кучерова К.Н. Прогнозирование ресурсов облачных сервисов на основе мониторинговой системы с открытым кодом // *Труды учебных заведений связи*. 2020. Т. 6. № 3. С. 100–106. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-3-100-106
12. Shreelekhya G., Yazhini, Senthilkumaran U., Manikandan N. Methods for evaluating software architecture-A survey // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Iss. 4. PP. 25720–25733.
13. Lumpkin D.R., Horton W.T., Sinfield J.V. Holistic synergy analysis for building subsystem performance and innovation opportunities // *Building and Environment*. 2020. Vol. 178. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.106908
14. Билятдинов К.З., Красов А.В., Меняйло В.В. Исследование систем и анализ результатов испытаний. СПб.: Астерион, 2019. 362 с.
15. Билятдинов К.З. Анализ и оценка эффективности систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2020610389 от 20.12.2019. Оpubл. 14.01.2020.
16. Билятдинов К.З. Расчет и анализ вероятностных характеристик системы. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2020610203 от 20.12.2019. Оpubл. 10.01.2020
17. Билятдинов К.З. Расчет вероятности своевременного достижения цели функционирования системы в неблагоприятных условиях в зависимости от времени принятия и доведения управленческих решений в информационном цикле управления. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2019661734 от 22.07.2019. Оpubл. 06.09.2019.
18. Билятдинов К.З. Оценка устойчивости систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020615328 от 25.03.2020. Оpubл. 21.05.2020.
19. Билятдинов К.З. Реализация способа рациональной работы с информационными ресурсами и формирования информационных резервов системы. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2020610335 от 20.12.2019. Оpubл. 13.01.2020.

* * *

Creation and Implementation of Information Reserves in Big Technical Systems Maintenance

A. Shestakov¹, K. Biliatdinov²

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²ITMO University,
St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-104-110

Received 2nd October 2020

Accepted 18st November 2020

For citation: Shestakov A., Biliatdinov K. Creation and Implementation of Information Reserves in Big Technical Systems Maintenance. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):104–110. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-104-110

Abstract: *The introduction and use of modern methods of proactive management of complex systems in decision support systems based on the collection and processing of heterogeneous data about the system and the generated precedents of events and corrective actions requires the search for new system-technical solutions for the data collection, storage and preliminary analysis, taking into account the control conditions and the characteristics of complex systems. A special feature of complex systems, such as large technical systems of industrial facilities, informatization and communication, transport, etc., is the combination of improvement stages (modernization of components) and development of systems (introduction of fundamentally new system engineering solutions) during their regular operation. In this regard, it is quite relevant to study the model for maintaining large technical systems and ways to create databases based on information reserves for decision support of proactive management. For the first time, system engineering solutions for the implementation of the original model and method based on a set of computer programs and the results of experimental tests are presented.*

Keywords: *large technical systems, information reserves, model, method of forming information reserves.*

References

1. Shestakov A.V. *Introduction to the Methodology for Processing Geospatial Data of the Telecommunications Genotype*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2016. 325 p. (in Russ.)
2. Biliatdinov K.Z., Shlyantsev I.A., Meniailo V.V. Application of a Structural-Functional Model Within the System Quality Assessment Method and Methodology. *Aerospace Defense Herald*. 2020;3(27):5–13. (in Russ.)
3. National Standard of the Russian Federation 15467-79. *Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions*. Moscow: Standardinform Publ.; 2008. (in Russ.)
4. National Standard of the Russian Federation R 58777-2019. *Air transport. Airports. Technical means of inspection. Methodology for determination of quality indicators of recognition of illegal attachments by shadow X-ray images*. Moscow: Standardinform Publ.; 2019. (in Russ.)
5. National Standard of the Russian Federation R ISO/IEC 9126-93. *Information technology. Software product evaluation. Quality characteristics and guidelines for their use*. Moscow: Standardinform Publ.; 2004. (in Russ.)
6. ISO/IEC 25000:2014. *Systems and software engineering. Systems and software. Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Guide to SQuaRE*. 2014-03.
7. Filz M., Herrmann C., Thiede S. Simulation-based Assessment of Quality Inspection Strategies on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*. 2020;93:777–782. DOI:10.1016/j.procir.2020.04.069
8. Hund L., Schroeder B., Rumsey K., Huerta G. Distinguishing between model- and data-driven inferences for high reliability statistical predictions. *Reliability Engineering and System Safety*. 2018;180:201–210. DOI:10.1016/j.res.2018.07.017
9. Tran V.P., Shcherbakov M., Nguyen T.A. Yet another method for heterogeneous data fusion and preprocessing in proactive decision support systems: distributed architecture approach. *Proceedings of the 20th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN, 25–29 September 2017, Moscow, Russia*. Springer International Publishing AG; 2017. p.319–330. DOI:10.1007/978-3-319-66836-9_27
10. Erokhin S., Petukhov A., Pilyugin P. Event-based Security Policy and Formal Model of Critical Information Infrastructures Protecting Mechanism. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(4):99–105. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-99-105
11. Kucherova K. Prediction of Cloud Computing Resources Based on the Open Source Monitoring System. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(3):100–106. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-3-100-106
12. Shreelekhya G., Yazhini, Senthilkumaran U., Manikandan N. Methods for evaluating software architecture-A survey. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016;8(4):25720–25733.
13. Lumpkin D.R., Horton W.T., Sinfield J.V. Holistic synergy analysis for building subsystem performance and innovation opportunities. *Building and Environment*. 2020;178. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.106908
14. Bilyatdinov K.Z., Krasov A.V., Menyailo V.V. *Systems Research and Analysis of Test Results*. St. Petersburg.: Asterion Publ.; 2019. 362 p. (in Russ.)
15. Bilyatdinov K.Z. *Analysis and Evaluation of the Effectiveness of Systems*. Patent RF, no. 2020610389, 20.12.2019. (in Russ.)
16. Bilyatdinov K.Z. *Calculation and Analysis of the Probabilistic Characteristics of the System*. Patent RF, no. 2020610203, 20.12.2019. (in Russ.)
17. Bilyatdinov K.Z. *Calculation of the Probability of Timely Achievement of the Goal of the System Functioning in Unfavorable Conditions, Depending on the Time of Making and Communicating Managerial Decisions in the Information Management Cycle*. Patent RF, no. 2019661734, 22.07.2019. (in Russ.)
18. Bilyatdinov K.Z. *Assessment of systems stability*. Patent RF, no. 2020615328, 21.05.2020. (in Russ.)
19. Bilyatdinov K.Z. *Implementation of the Method of Rational Work with Information Resources and the Formation of Information Reserves of the System*. Patent RF, no 2020610335, 20.12.2019. (in Russ.)

Сведения об авторах:

**ШЕСТАКОВ
Александр Викторович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, vicerecator.sc@sut.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8462-6515>

**БИЛЯТДИНОВ
Камиль Закирович**

кандидат военных наук, доцент, доцент факультета инфокоммуникационных технологий Национального исследовательского университета ИТМО, k74b@mail.ru

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

*Основой всей научной работы служит убеждение,
что мир представляет собой упорядоченную
и познаваемую сущность...*

Альберт Эйнштейн

05.11.07

05.11.18

05.12.04

05.12.07

05.12.13

05.12.14

05.13.01

05.13.18

05.13.19

Модель функционирования двухдиапазонного радиолокационного комплекса, осуществляющего классификацию целей в условиях воздействия помех и шумов

В.В. Макаренков^{1*} 

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

*Адрес для переписки: makar8722@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.04.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Ссылка для цитирования: Макаренков В.В. Модель функционирования двухдиапазонного радиолокационного комплекса, осуществляющего классификацию целей в условиях воздействия помех и шумов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 112–119. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-112-119

Аннотация: Рассматривается модель сигнала, принимаемого от сложной цели, образованной совокупностью быстро флуктуирующих точечных отражателей. Прием сигнала осуществляется на фоне узкополосных активных шумовых помех и белого гауссовского шума. Предлагается модель функционирования двухдиапазонного радиолокационного комплекса, в которой решается задача классификации быстро флуктуирующих точечных отражателей в составе сложной цели на фоне помех и шумов. Исследуется вопрос оценки качества работы данной модели, а также выполнений требований по обеспечению заданного значения вероятности правильной классификации целей.

Ключевые слова: двухдиапазонный радиолокационный комплекс, сложная цель, узко-широкополосная активная шумовая помеха, задача классификации целей, оценка вероятности правильной классификации целей.

Введение

Существует множество подходов к синтезу систем обработки радиолокационной информации, различающихся как конечными целями (обнаружение, сопровождение целей и т. д.), так и физической интерпретацией процесса обработки и применяемым математическим аппаратом [1]. Для рассматриваемых многоканальных радиолокационных станций (РЛС) наиболее важны разрешение сигналов по соответствующим параметрам дальности, частоте, угловым координатам и классификация целей, как установление их принадлежности к определенным типам.

По мере совершенствования современной техники и расширения ее функциональных возможностей потребность в решении задач классификации целей постоянно возрастает [2, 3]. В настоящее время одним из подходов к повышению информативности РЛС является использование многочастотных систем, в которых происходит одновременное излучение сигналов на нескольких частотах [4, 5]. При этом многочастотные системы можно рассматривать как результат объединения нескольких уз-

кополосных РЛС, формирующих ортогональные сигналы, помехи и шумы [6, 7].

Одним из примеров многочастотных РЛС является двухдиапазонный радиолокационный комплекс (ДРЛК), представляющий собой результат объединения двух бистатических систем, одна из которых работает в дециметровом, а другая – в метровом диапазоне электромагнитных волн. В ДРЛК имеется возможность применения всех методов обработки информации, которые используются в теории многочастотной радиолокации при сравнительно недорогой стоимости изготовления таких комплексов. При этом все результаты, полученные в ДРЛК при создании необходимой теоретической и практической базы, могут быть обобщены и на многодиапазонный случай [8].

Постановка и решение задачи классификации целей на фоне шумов в однодиапазонных РЛС подробно рассмотрена в [1]. Цель работы заключается в создании модели функционирования радиолокационной системы, осуществляющей классификацию целей на фоне помех и шумов применительно к ДРЛК с фазированной антенной решеткой (ФАР).

Математическая модель сигнала, принимаемого от сложной цели, на фоне узко-широкополосных активных шумовых помех и белого гауссовского шума в ДРЛК с ФАР

Целями для ДРЛК являются быстро флуктуирующие точечные отражатели. Совокупность таких точечных отражателей образует сложную цель. В процессе радиолокационного наблюдения сложной цели принимаемый сигнал является результатом интерференции нескольких сигналов, отраженных от отдельных быстро флуктуирующих точечных отражателей.

Предполагается, что амплитуда принимаемого сигнала является случайной величиной (СВ) или случайным процессом (СП), подчиняющимся закону распределения Рэлея, а фаза – равномерно распределенной СВ. Совместное распределение амплитуды и фазы подчиняется гауссовскому закону распределения вероятностей [5, 7]. Считается, что прием сигнала осуществляется на фоне активных шумовых помех (АШП), работающих в режиме попеременного излучения узкополосной и широкополосной по частоте помехи. На входы ФАР сигнал и помехи поступают вместе с белым гауссовским шумом (БГШ).

Будем считать, что ФАР состоит из подрешеток, каждая из которых предназначена для излучения и приема сигналов на частоте $f_l, l = \overline{1, 2}$. Число элементов на каждой из частот f_l определяется величиной N_l . Для прямоугольной решетки $N_l = N_{l\alpha} \times N_{l\beta}$. Общее число элементов решетки будет составлять $N = \sum_{l=1}^2 N_l$ элементов.

Случайный процесс, принимаемый ДРЛК с ФАР, можно записать в виде блочного $1 \times N$ вектора $\xi^T = (\xi_1^T, \xi_2^T)$, состоящего из суммы векторов сигнала $\vec{s}^T = (\vec{s}_1^T, \vec{s}_2^T)$, помех $\vec{n}^T = (\vec{n}_1^T, \vec{n}_2^T)$ и БГШ $\vec{w}^T = (\vec{w}_1^T, \vec{w}_2^T)$, где T – операция транспонирования. Таким образом, $\xi = \vec{s} + \vec{n} + \vec{w} = \vec{s} + \vec{\eta}$.

Сигнал в виде пачек, содержащих по r импульсов на каждой из частот f_l , отраженных от сложной цели, образованной совокупностью k быстро флуктуирующих точечных отражателей, определяется следующим выражением:

$$\vec{s}_l(t, \vec{\gamma}_l) = \sum_{i=1}^k \vec{s}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) = \sum_{i=1}^k \vec{d}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) \cdot z_{li}(t) = \mathbf{d}_l(t, \vec{\gamma}_l) \cdot \vec{z}_l(t), \quad (1)$$

где $\vec{\gamma}_l^T = (\vec{\gamma}_{l1}^T, \vec{\gamma}_{l2}^T, \dots, \vec{\gamma}_{lk}^T)$ – блочный вектор параметров сложной цели, i -ая компонента которого равна $\vec{\gamma}_{li}^T = (\tau_{3li}, \omega_{dli}, \alpha_{li}, \beta_{li})$; τ_{3li} – время задержки i -го точечного отражателя относительно зондирующего импульса; ω_{dli} – доплеровский сдвиг частоты i -го точечного отражателя; α_{li} – значение азимута i -го точечного отражателя; β_{li} – значение угла места i -го точечного отражателя; $\vec{z}_l(t) =$

$(z_{l1}(t), z_{l2}(t), \dots, z_{lk}(t))$ – вектор размера $k \times 1$; $z_{li}(t)$ – комплексная гауссовская СВ, характеризующая закон флуктуаций i -го точечного отражателя; $\mathbf{d}_l^T(t, \vec{\gamma}_l) = (\vec{d}_{l1}^T(t, \vec{\gamma}_{l1}), \vec{d}_{l2}^T(t, \vec{\gamma}_{l2}), \dots, \vec{d}_{lk}^T(t, \vec{\gamma}_{lk}))$ – матрица размера $k \times N_l$; $\vec{d}_{li}^T(t, \vec{\gamma}_{li})$ – неслучайный вектор-столбец принимаемого сигнала от i -го точечного отражателя размера $1 \times N_l$.

Предполагается, что $M[z_{li}(t)] = 0, M[z_{li}(t_1) \times z_{li}^*(t_2)] = K_{z_{li}}(t_1, t_2)$, где $M[\cdot]$ – вычисление математического ожидания от выражения, стоящего в квадратных скобках; $*$ – эрмитова сопряженность вектора или матрицы (транспонирование и комплексная сопряженность элементов); $K_{z_{li}}(t_1, t_2)$ – комплексная ковариационная функция СП i -го точечного отражателя двух скалярных переменных $t_1, t_2 \in t$.

Величина $\vec{d}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li})$ определяется формулой (2):

$$\vec{d}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) = \sqrt{B_l} \cdot [\vec{g}_l(\alpha_{li}(t)) \otimes \vec{g}_l(\beta_{li}(t))] \times \vec{u}_{sli}^T(t) \cdot \vec{1}_r \cdot \exp\{j\omega_{dli}(t - \tau_{3li})\}, \quad (2)$$

где B_l – энергия импульса на частоте f_l ; $\vec{g}_l(\alpha_{li}(t))$ – вектор волнового фронта электромагнитной волны, принимаемой от i -го точечного отражателя в азимутальной плоскости размера $N_{l\alpha} \times 1$; $\vec{g}_l(\beta_{li}(t))$ – вектор волнового фронта электромагнитной волны, принимаемой от i -го точечного отражателя в угломестной плоскости размера $N_{l\beta} \times 1$; \otimes – прямое произведение векторов; $\vec{u}_{sli}^T(t - T_{nj})$, $j = \overline{1, r}$ – комплексная огибающая j -го импульса в пачке, состоящей из r импульсов; $\vec{u}_{sli}^T(t) = (\vec{u}_{sli1}^T(t - T_{n1} - \tau_{3li}), \vec{u}_{sli2}^T(t - T_{n2} - \tau_{3li}), \dots, \vec{u}_{sli r}^T(t - T_{nr} - \tau_{3li}))$ – вектор размера $1 \times r$; T_{nj} – период повторения импульсов в пачке; $\vec{1}_r^T = (1, 1, \dots, 1)$ – единичный вектор размера $1 \times r$.

Поскольку предполагается, что $\forall M[z_{li}(t)] = 0$, в случае гауссовского распределения СВ основной числовой характеристикой сигнала $\vec{s}_l(t, \vec{\gamma}_l)$ является его ковариационная матрица:

$$\mathbf{K}_{s_l}(t_1, t_2) = M[\vec{s}_l(t_1, \vec{\gamma}_l) \cdot \vec{s}_l^*(t_2, \vec{\gamma}_l)] = \mathbf{d}_l(t_1, \vec{\gamma}_l) \cdot M[\vec{z}_l(t_1) \cdot \vec{z}_l^*(t_2)] \cdot \mathbf{d}_l^T(t_2, \vec{\gamma}_l) = \mathbf{d}_l(t_1, \vec{\gamma}_l) \cdot \mathbf{K}_{z_l}(t_1, t_2) \cdot \mathbf{d}_l^T(t_2, \vec{\gamma}_l). \quad (3)$$

Случайный процесс $\vec{\eta}_l(t)$, создаваемый узко-широкополосными АШП и шумами на каждой из частот f_l , определяется следующим выражением:

$$\vec{\eta}_l(t) = \sum_{i=1}^{x_l} \vec{f}_i(\theta_i(t), \phi_i(t)) \cdot e_{li}(t) + \vec{w}_l(t) = \mathbf{F}_l(t) \cdot \vec{e}_l(t) + \vec{w}_l(t), \quad (4)$$

где x_l – число источников узко-широкополосных АШП; $\mathbf{F}_l(t) = (\vec{f}_{l1}^T(t), \vec{f}_{l2}^T(t), \dots, \vec{f}_{lx_l}^T(t))$ – матрица коэффициентов направленного действия (КНД) антенны в направлении прихода сигналов от узко-широкополосных АШП размера $x_l \times N_l$; $\vec{f}_{li}^T(t) =$

$= \vec{f}_{li}^T(\theta_i(t), \phi_i(t))$ – вектор-столбец КНД антенны в направлении i -го источника размера $1 \times N_i$; $\vec{e}_l(t) = (e_{l1}(t), e_{l2}(t), \dots, e_{lx_l}(t))$ – вектор напряженности поля источников узко-широкополосных АШП размера $x_l \times 1$; $e_{li}(t)$ – напряженность поля i -го источника.

Величина $e_{li}(t)$ определяется формулой (5):

$$e_{li}(t) = e_{zli}(t) \cdot s_{\text{пн}}(t) + (e_{\text{пр}li}(t) \cdot (\chi - s_{\text{пн}}(t))), \quad (5)$$

где $e_{zli}(t)$ – напряженность поля i -го источника широкополосной АШП; $e_{\text{пр}li}(t)$ – напряженность поля i -го источника узкополосной АШП; $s_{\text{пн}}(t)$ – последовательность прямоугольных радиоимпульсов с амплитудой равной χ и длительностью $\tau_{\text{пн}}$, удовлетворяющая следующим условиям:

$$s_{\text{пн}}(t) = \begin{cases} s_{\text{пн}}(t + T_{\text{пн}}), & \\ \chi & \text{при } 0 + \varepsilon \cdot T_{\text{пн}} \leq t \leq \tau_{\text{пн}} + \varepsilon \cdot T_{\text{пн}}, \\ 0 & \text{при } 0 + \varepsilon \cdot T_{\text{пн}} > t > \tau_{\text{пн}} + \varepsilon \cdot T_{\text{пн}}, \end{cases}$$

$\varepsilon = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа; $T_{\text{пн}}$ – период последовательности прямоугольных радиоимпульсов.

В качестве модели шума $\vec{w}_l(t)$ используется модель БГШ с ковариационной матрицей:

$$\mathbf{K}_{w_l}(t_1, t_2) = \Xi_{w_l} \cdot \delta(t_1, t_2), \quad (6)$$

где $\delta(t_1, t_2)$ – дельта-функция Дирака; $\Xi_{w_l} = \mathbf{I} \cdot 0,5 \cdot \Xi_{l0}$ – диагональная матрица размера $N_l \times N_l$; \mathbf{I} – единичная матрица размера $N_l \times N_l$; $0,5 \cdot \Xi_{l0}$ – спектральная плотность мощности шума.

Ковариационная матрица помех и шумов $\mathbf{K}_{\eta_l}(t_1, t_2)$ определяется следующим выражением:

$$\mathbf{K}_{\eta_l}(t_1, t_2) = \mathbf{F}_l(t_1)M[\vec{e}_l(t_1)\vec{e}_l^T(t_2)]\mathbf{F}_l^T(t_2) + \mathbf{K}_{w_l}(t_1, t_2) = \mathbf{F}_l(t_1)\mathbf{K}_{e_l}(t_1, t_2)\mathbf{F}_l^T(t_2) + \mathbf{K}_{w_l}(t_1, t_2), \quad (7)$$

где $\mathbf{K}_{e_l}(t_1, t_2) = \text{diag}(\sigma_{eli}^2(t_1, t_2))_{i=1}^{x_l}$ – диагональная матрица размера $x_l \times x_l$; $\sigma_{eli}^2(t_1, t_2) = M[e_{li}(t_1)e_{li}^T(t_2)]$.

Ковариационная матрица случайного процесса $\vec{\xi}_l$ имеет вид:

$$\mathbf{K}_{\xi_l}(t_1, t_2) = \mathbf{K}_{s_l}(t_1, t_2) + \mathbf{K}_{\eta_l}(t_1, t_2). \quad (8)$$

Модель функционирования ДРЛК, осуществляющего классификацию быстро флуктуирующих точечных отражателей в составе сложной цели в условиях воздействия узко-широкополосных АШП и БГШ

Поскольку обработка радиолокационной информации в ДРЛК выполняется в цифровой форме, рассмотрим подход к классификации целей, основанный на представлении сигналов, помех и шумов в ортонормированном базисе. С этой целью разложим в ряд Фурье по системе тригонометрических функций $\Phi_{ln}(t)$ сигнал $\vec{s}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li})$, принимаемый от i -го быстро флуктуирующего точечного отражателя в составе сложной цели. Предполагается, что сигнал $\vec{s}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li})$ имеет конечную протя-

женность во времени и конечную эффективную полосу частот спектра Ω . Исходя из этого, значения вектора коэффициентов ряда Фурье $s_{lin}(\vec{\gamma}_{li})$ будут приближенно равны нулю вне этого интервала Ω . Это позволяет ограничить число слагаемых ряда конечным числом $p + 1$:

$$\vec{s}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) \approx \sum_{n=-p/2}^{p/2} s_{lin}(\vec{\gamma}_{li}) \cdot \Phi_{ln}(t). \quad (9)$$

Значения $s_{lin}(\vec{\gamma}_{li})$ определяются выражением:

$$s_{lin}(\vec{\gamma}_{li}) = \int_{T_1}^{T_2} \vec{s}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) \cdot \Phi_{ln}^*(t) dt, \quad (10)$$

где $[T_1, T_2] \in t$ – интервал времени, на котором производится решение задачи классификации целей.

В виде аналогичного ряда выразим $\vec{\xi}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li})$ и $\vec{d}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li})$:

$$\vec{\xi}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) \approx \sum_{n=-p/2}^{p/2} \xi_{lin}(\vec{\gamma}_{li}) \cdot \Phi_{ln}(t), \quad (11)$$

$$\vec{d}_{li}(t, \vec{\gamma}_{li}) \approx \sum_{n=-p/2}^{p/2} d_{lin}(\vec{\gamma}_{li}) \cdot \Phi_{ln}(t). \quad (12)$$

Задачу классификации быстро флуктуирующих точечных отражателей в составе сложной цели в условиях воздействия узко-широкополосных АШП и БГШ представим, как двухэтапную процедуру обработки радиолокационной информации. На первом этапе необходимо в каждом диапазоне длин волн решить задачу полного разрешения сложной цели, включающую в себя ее обнаружение, оценку числа точечных отражателей k , из которых она состоит (подзадача обнаружения-разрешения), оценку параметров $z_{li}, \tau_{zli}, \omega_{dli}, \alpha_{li}, \beta_{li}$ сигналов, принимаемых от k отражателей (подзадача разрешения-оценивания). Второй этап состоит в комплексировании информации полученной от двух диапазонов, а затем в принятии решения о принадлежности точечных отражателей к определенным типам целей.

Для решения поставленных задач необходимо разбить зону обзора в каждом диапазоне длин волн на $h_l, l = \overline{1, 2}$ областей. Предполагается, что параметры k точечных отражателей в составе сложной цели могут принимать только дискретные значения из области их определения.

Рассмотрим задачу полного разрешения быстро флуктуирующих точечных отражателей в составе сложной цели, когда имеется априорная информация об их числе k . Для оптимизации системы полного разрешения сложной цели применим критерий минимума среднего риска, а также зададимся условным математическим ожиданием функции потерь в следующем виде [1, 5]:

$$M\{\Pi[\hat{\mathbf{z}}_l, \hat{\gamma}_l, \hat{\mathbf{z}}_l, \hat{\gamma}_l / \vec{\xi}_l]\} = M[\vec{s}_l(\vec{\gamma}_l) \cdot \vec{s}_l^*(\vec{\gamma}_l) / \vec{\xi}_l] - |\hat{\mathbf{z}}_l|^2 \cdot \mathbf{d}_l^T(\hat{\gamma}_l) \cdot \mathbf{d}_l(\hat{\gamma}_l), \quad (13)$$

где $\hat{\gamma}_l^T = (\hat{\gamma}_{l1}^T, \hat{\gamma}_{l2}^T, \dots, \hat{\gamma}_{lk}^T)$ – вектор оцениваемых параметров; $\mathbf{d}_l^T(\hat{\gamma}_l) = (\mathbf{d}_{l1}^T(\hat{\gamma}_{l1}), \mathbf{d}_{l2}^T(\hat{\gamma}_{l2}), \dots, \mathbf{d}_{lk}^T(\hat{\gamma}_{lk}))$ – матрица размера $k \times N_l(p+1)$; $\mathbf{d}_{li}^T(\hat{\gamma}_{li}) = (\mathbf{d}_{li(-p/2)}, \mathbf{d}_{li(-p/2+1)}, \dots, \mathbf{d}_{li(p/2)})$ – блочный вектор-столбец размера $1 \times N_l(p+1)$; $\hat{\mathbf{z}}_l$ – оценка вектора \mathbf{z}_l , определяемая формулой (14):

$$\hat{\mathbf{z}}_l = (\mathbf{d}_l^T(\hat{\gamma}_l) \cdot \mathbf{d}_l(\hat{\gamma}_l))^{-1} \cdot \mathbf{d}_l^T(\hat{\gamma}_l) \cdot \hat{\mathbf{s}}_l(\hat{\gamma}_l), \quad (14)$$

$\hat{\mathbf{s}}_l(\hat{\gamma}_l)$ – вектор линейной оценки суммарного сигнала $\hat{\mathbf{s}}_l(\hat{\gamma}_l)$ размера $N_l(p+1) \times k$ по критерию минимума среднего квадрата ошибки.

Импульсная характеристика линейного фильтра \mathbf{H}_{s_l} , осуществляющего оценку сигнала $\hat{\mathbf{s}}_l(\hat{\gamma}_l)$ по критерию минимума среднего квадрата ошибки, имеет вид:

$$\mathbf{H}_{s_l} = \mathbf{K}_{\xi_l} \cdot \mathbf{K}_{s_l}^{-1}, \quad (15)$$

где $\mathbf{K}_{\xi_l}^{-1}$ – обратная ковариационная матрица случайного процесса ξ_l .

Минимум среднего риска в системе полного разрешения сложной цели будет достигаться тогда, когда второе слагаемое в выражении (13), обозначенное как $\mathbf{J}_{\hat{\gamma}_l}$, будет достигать максимума:

$$\mathbf{J}_{\hat{\gamma}_l} = |\hat{\mathbf{z}}_l|^2 \cdot \mathbf{d}_l^T(\hat{\gamma}_l) \cdot \mathbf{d}_l(\hat{\gamma}_l). \quad (16)$$

Рассмотрим реализацию представленной оптимальной обработки суммарного сигнала $\hat{\mathbf{s}}_l(t, \vec{\gamma}_l)$ в варианте многоканальной системы, где каждый канал настроен на фиксированные значения параметров быстро флуктуирующего точечного отражателя в составе сложной цели. В этом случае выражение для достаточной статистики $L_{s_{li}}$, позволяющей осуществить оценку сигнала $\hat{\mathbf{s}}_l(\vec{\gamma}_{li})$ по критерию минимума среднего квадрата ошибки в i -ом приемном канале ДРЛК, определяется формулой:

$$L_{s_{li}} = 2 \cdot \xi_{li}^*(\vec{\gamma}_{li}) \cdot \hat{\mathbf{s}}_{li}(\hat{\gamma}_{li}) - \hat{\mathbf{s}}_{li}^*(\hat{\gamma}_{li}) \cdot \hat{\mathbf{s}}_{li}(\hat{\gamma}_{li}), \quad i = \overline{1, h_l}, \quad (17)$$

где h_l – количество приемных каналов в соответствующем диапазоне длин волн.

Выражение для достаточной статистики $L_{\gamma_{li}}$, определяющей оценку параметров точечных отражателей в составе сложной цели $\tau_{z_{li}}, \omega_{d_{li}}, \alpha_{li}, \beta_{li}$ в i -ом приемном канале ДРЛК, имеет вид [9, 10]:

$$L_{\gamma_{li}} = \xi_{li}^*(\vec{\gamma}_{li}) \cdot \mathbf{H}_{\eta_l} \cdot \mathbf{d}_{li}(\hat{\gamma}_{li}) \cdot \hat{\mathbf{z}}_{li}, \quad (18)$$

где $\mathbf{H}_{\eta_l} = \mathbf{K}_{\eta_l}^{-1}$ – импульсная характеристика фильтра, осуществляющего оценку помех и шумов и их вычитание из случайного вектора $\xi_{li}^*(\vec{\gamma}_{li})$; $\mathbf{K}_{\eta_l}^{-1}$ – обратная ковариационная матрица случайного процесса $\eta_l(t)$.

Вариант построения схемы полного разрешения, выполняющей обработку в соответствии с (14–18) в i -ом приемном канале ДРЛК, приведен на рисунке 1.

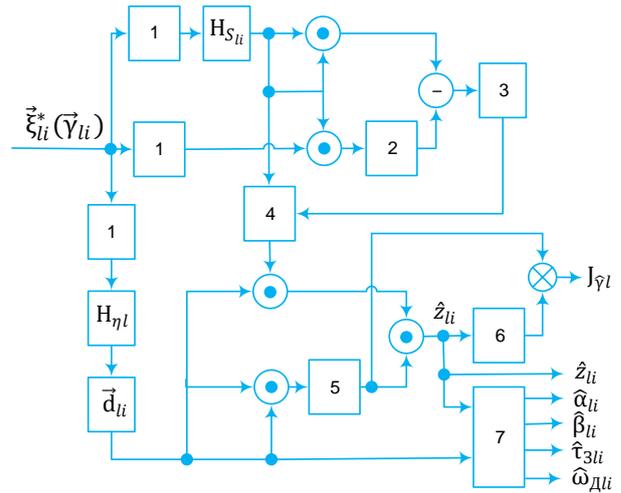


Рис. 1. Схема полного разрешения сигналов, принимаемых от сложной цели (в виде совокупности k быстро флуктуирующих точечных отражателей в i -ом приемном канале ДРЛК)

Fig. 1. The Scheme of Full Resolution of Signals Received from a Complex Target (in the form of a set of k Rapidly Fluctuating Point Reflectors in the i -th Receiving Channel of the DBRS)

Цифрами на схеме обозначены: 1 – устройство, выполняющее фильтрацию с помощью набора фильтров $\Phi_{ln}(t)$ (рисунок 2); 2 – умножитель на 2; 3 – пороговое устройство; 4 – ключ, управляемый сигналами порогового устройства; 5 – устройство обращения матрицы; 6 – схема возведения в квадрат; 7 – устройство формирующее оценки $\hat{\tau}_{z_{li}}, \hat{\omega}_{d_{li}}, \hat{\alpha}_{li}, \hat{\beta}_{li}$, в соответствии с оценками максимума функции $\mathbf{J}_{\hat{\gamma}_l}$. Переход от N_l приемных каналов к одному осуществляется с помощью умножения выходных значений фильтра \mathbf{H}_{η_l} на вектор $\mathbf{d}_{li}(\hat{\gamma}_{li})$.

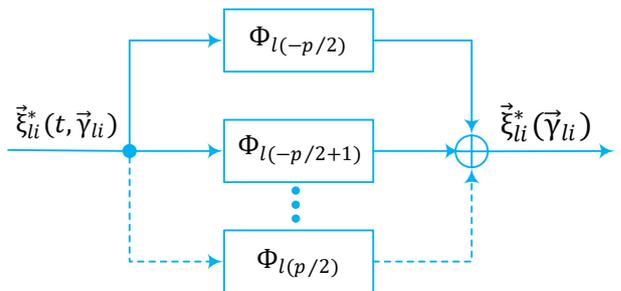


Рис. 2. Устройство выполняющее фильтрацию $\xi_{ii}^*(\vec{\gamma}_{ii})$ с помощью набора фильтров $\Phi_{ln}(t)$

Fig. 2. The Device That Filters $\xi_{ii}^*(\vec{\gamma}_{ii})$ Using a Set of Filters $\Phi_{ln}(t)$

Сущность комплексирования состоит в том, чтобы использовать информацию об одних и тех же параметрах, полученных от различных измерителей (в дециметровом и метровом диапазоне длин волн), для повышения точности оценки параметров целей. Рассмотрим схему, осуществляющую компенсацию ошибок оценок параметров целей в ДРЛК за счет их взаимной компенсации и фильтрации (рисунок 3).

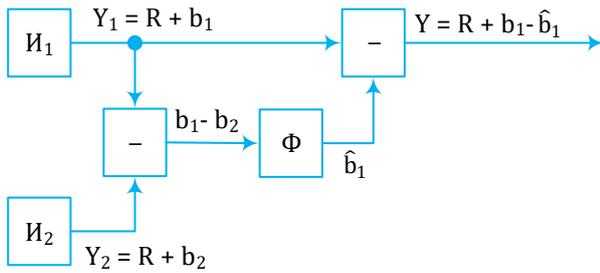


Рис. 3. Схема компенсации ошибок оценок параметров целей в ДРЛК

Fig. 3. The Compensation Scheme for Parameter Estimates Errors Targets in DBRS

При выполнении задачи полного разрешения сложной цели в ДРЛК, измеритель I_1 в метровом, а измеритель I_2 в дециметровом диапазоне длин волн осуществляют оценку одного и того же параметра R i -го точечного отражателя в составе сложной цели с ошибками b_1 и b_2 , соответственно. Точность оценки параметра i -го точечного отражателя измерителя I_2 выше точности оценки измерителя I_1 . На выходе измерителей сигналы представляют в виде:

$$Y_1 = R + b_1, \quad Y_2 = R + b_2, \quad (19)$$

где $R = [R_0, R_1, \dots, R_{M-1}]$ – M -точечная последовательность оцениваемого параметра R ; $b_i = [b_{i0}, b_{i1}, \dots, b_{i(M-1)}]$ – M -точечная последовательность ошибки $b_i, i = \overline{1, 2}$.

После первого вычитающего устройства стоит фильтр Φ , который, используя априорную информацию о статистических характеристиках ошибок b_1 и b_2 , формирует оценку первой из них \hat{b}_1 . Во втором вычитающем устройстве происходит компенсация ошибок, в результате чего окончательная погрешность $b = b_1 - \hat{b}_1$ оказывается меньше исходной погрешности b_1 измерителя I_1 [8, 11].

Дисперсия результирующей ошибки σ_{bn}^2 n -го компонента M -точечной последовательности $b = [b_0, b_1, \dots, b_{(M-1)}]$ определяется следующим выражением:

$$\sigma_{bn}^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} B_{1k} \cdot |1 - K(\exp(jw))|^2 \cdot W^{-kn} + \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} B_{2k} \cdot |K(\exp(jw))|^2 \cdot W^{-kn}, \quad (20)$$

где $B_{ik} = \sum_{n=0}^{M-1} b_{in} \cdot W^{-kn}$ – спектры ошибок b_{in} ; $K(\exp(jw))$ – частотная характеристика фильтра, осуществляющего оценку ошибок первого измерителя; $W = \exp(-j2\pi/M)$.

Классификация целей вне атмосферы в ДРЛК происходит в плоскости радиус перигея-большая полуось $(r_n - A)$. Для нахождения значений r_{n1}, A_i i -го точечного отражателя используют данные вектора $\hat{y}_{ii}^T = (\hat{\tau}_{3li}, \hat{\omega}_{dli}, \hat{\alpha}_{li}, \hat{\beta}_{li})$. Формулы расчета r_{n1}, A_i подробно рассмотрены в [12]. Основным параметром разделения типов целей, таких как бал-

листическая цель (БЦ) и космический объект (КО), является заданное значение радиуса перигея r_{n1} (рисунок 4).

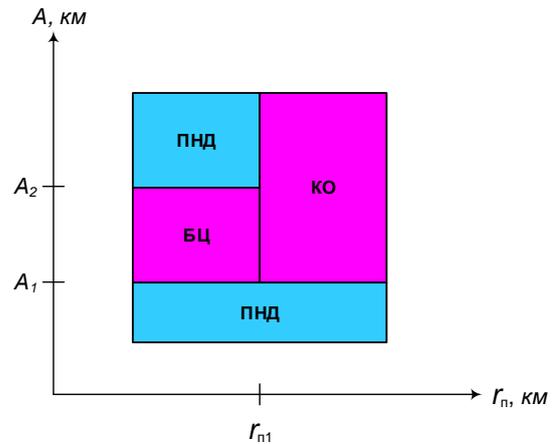


Рис. 4. Области классификации целей типа БЦ, КО

Fig. 4. The Target Classification Areas Such as Ballistic Target (BT), Space Object (SO)

Для БЦ радиус перигея не должен превышать значения r_{n1} , а значение большой полуоси должно принадлежать заданному интервалу $A \in [A_1, A_2]$. Если значение большой полуоси для БЦ превышает границы интервала $[A_1, A_2]$, то цель классифицируется типом БЦ с признаком недостоверности (ПНД). Дополнительно цели проверяются на допустимые значения максимальной и минимальной полной скорости.

Для оценки качества работы модели ДРЛК рассчитывается значения оценки вероятности правильной классификации целей \hat{P}_D . Так, при известном решающем правиле, неизвестных априорных вероятностях классифицируемых целей и использовании для классификации случайной выборки из k сигналов число правильных ответов v_n является дискретной случайной величиной, подчиняющейся биномиальному распределению [1]:

$$P(v_n/P_D) = \frac{k!}{(k - v_n)!v_n!} P_D^{v_n} (1 - P_D)^{k-v_n}. \quad (21)$$

Оценка максимального правдоподобия вероятности правильной классификации целей определяется из решения уравнения правдоподобия:

$$\left. \frac{\partial \ln P(v_n/P_D)}{\partial P_D} \right|_{P_D=\hat{P}_D} = \left(\frac{v_n}{P_D} - \frac{k - v_n}{1 - P_D} \right) \Big|_{P_D=\hat{P}_D} = 0, \quad (22)$$

и равна частоте правильных ответов $\hat{P}_D = v_n/k$.

Проверка выполнений требований по обеспечению заданного значения вероятности правильной классификации целей P_D осуществляется методом доверительных интервалов (интервального оценивания) в условиях получения оценок по ограниченной выборке. Для оценки \hat{P}_D рассчитывается двусторонний доверительный интервал при вероятности нахождения в нем $P_j = 0,9$ [13, 14]:

$$J(P_{v_n}^H, P_{v_n}^B) = \frac{k}{k + \lambda^2} \times \left(\hat{P}_D + \frac{\lambda^2}{2k} \pm \lambda \sqrt{\frac{\hat{P}_D(1 - \hat{P}_D)}{k} + \left(\frac{\lambda}{2k}\right)^2} \right), \quad (23)$$

где $P_{v_n}^H, P_{v_n}^B$ – нижняя и верхняя граница доверительного интервала; λ – квантиль из таблицы Стьюдента.

Критерием выполнения требований является покрытие доверительным интервалом заданного значения P_D :

$$P_{v_n}^H \leq \hat{P}_D \leq P_{v_n}^B \quad \text{при} \quad P_{v_n}^H \geq P_D. \quad (24)$$

Так как АШП работают в режиме попеременного излучения узкополосной и широкополосной помехи, импульсные характеристики фильтров $\mathbf{H}_{s_l}, \mathbf{H}_{\eta_l}$ непостоянны во времени и имеют периодический характер. В реальных условиях точной информации о матрице \mathbf{K}_{η_l} нет, поэтому стремятся построить адаптивные фильтры, которые автоматически формируют оптимальные $\mathbf{H}_{s_l}, \mathbf{H}_{\eta_l}$ (по минимуму среднего квадрата ошибки). Переменный характер излучения АШП приводит к увеличению времени адаптации фильтров, уменьшению их скорости сходимости [10, 15]. Поэтому при недостаточной скорости сходимости к моменту, когда необходимо осуществлять вынесения решения о принадлежности цели к определенному типу, фильтры с импульсными характеристиками $\mathbf{H}_{s_l}, \mathbf{H}_{\eta_l}$ не успевают настроиться. Величины отношений сигнал-шум на их выходе оказываются меньше требуемых. Это влечет за собой увеличение ошибок оценок параметров точечных отражателей в составе сложной цели, тем самым снижая значение \hat{P}_D (21–24).

На рисунке 5 представлены результаты моделирования процесса классификации 100 БЦ ДРЛК на фоне узко-широкополосных АШП.

В рамках проводимого моделирования значение вероятности P_D принималось равным 0,9. Для полученной оценки $\hat{P}_D = v_n/k = 0,87$ были рассчитаны границы двухстороннего доверительного интервала $P_{v_n}^H = 0,85$ и $P_{v_n}^B = 0,91$.

Список используемых источников

1. Давыдов В.С., Лукошкин А.П., Шаталов А.А., Ястребков А.Б. Радиолокация сложных целей. Разрешение и распознавание. СПб.: Янис, 1993. 280 с.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar. Vol. 1. Basic Principles. Raleigh: SciTech Publishing, 2010. 924 p. DOI:10.1049/SBRA021E
3. Richards M.A., Scheer J.A., Melvin W.L., Scheer J.A. Principles of Modern Radar. Vol. 2. Advanced Techniques. IET, 2012. 874 p. DOI:10.1049/SBRA020E
4. Васильев А.В., Воробьев Н.В., Грязнов В.А., Силкин А.Т. Сверхширокополосные РЛС на основе многочастотных антенных решеток // VI общероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (Омск, Россия, 19–20 апреля 2016 г.). Омск: Омский государственный технический университет, 2016. С. 75–85.
5. Макаренко В.В., Семенов А.А. Постановка и решение задачи полного разрешения сложной цели в виде совокупности медленно флуктуирующих точечных отражателей в двухдиапазонном радиолокационном комплексе //

Анализ результатов моделирования показал, что воздействие узко-широкополосных АШП может привести к ситуациям, когда требование (24) в ДРЛК не выполняется ($P_{v_n}^H = 0,85$) < ($P_D = 0,9$).

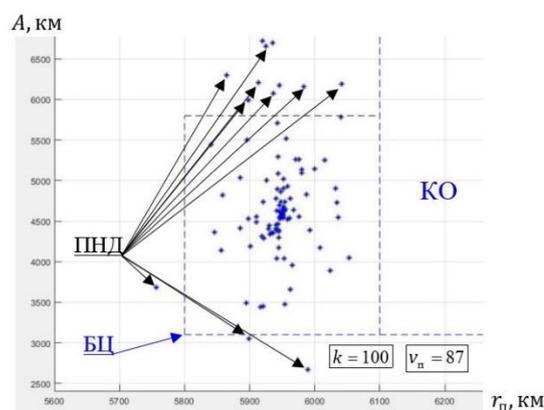


Рис. 5. Классификация целей ДРЛК на фоне узко-широкополосных АШП

Fig. 5. The Classification of Targets by the DBRS Against the Background of Narrowband-Wideband ANI

Заключение

Задача классификации быстро флуктуирующих точечных отражателей в составе сложной цели в ДРЛК предполагает решение следующих подзадач: полного разрешения сложной цели, комплексирования информации и принятия решения о принадлежности точечных отражателей к определенным типам целей.

В разработанной модели, в отличие от известных, используются модели сигналов от узко-широкополосных АШП, что позволяет оценивать степень влияния попеременного характера излучения сигналов от данного вида помех, на достоверность принимаемых решений в ДРЛК на основе расчета оценки вероятности правильной классификации целей и границ двухстороннего доверительного интервала.

Устранение негативного влияния узко-широкополосных АШП, обусловленного снижением значения \hat{P}_D , возможно за счет использования методов ускорения сходимости адаптивных фильтров, обсуждение которых подробно рассмотрено в [15, 16].

СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. № 1(75). СПб: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2020. С. 39–40.

6. Jankiraman M. Design of Multi-Frequency CW Radars. Raleigh: SciTech Publishing, 2007. 351 p.

7. Лабец В.В., Шаталов А.А., Шаталова В.А. Модели сигналов, одновременно излучаемых и принимаемых многочастотными РЛС с ФАР // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 2(22). С. 44–51.

8. Кузнецов М.Ю., Макаренко В.В. Модель функционирования двухдиапазонного мультиточечного радиолокационного комплекса // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 60–68. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-60-68

9. Бачевский А.С., Коновалов Д.Ю., Лабец В.В., Шаталов А.А., Шаталова В.А. Адаптивный алгоритм распознавания сигналов, принимаемых от быстро флуктуирующих целей и целей с доплеровским рассеянием при наличии помех // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. № 656. С. 25–34.

10. Лукошкин А.П., Каринский С.С., Шаталов А.А. и др. Обработка сигналов в многоканальных РЛС. М.: Радио и связь, 1983. 328 с.

11. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 704 с.

12. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. М.: Радио и связь, 1985. 216 с.

13. Майструк А.В. Анализ достоверности определения доверительных границ при аппроксимации биномиального распределения в задачах интервального оценивания показателей надежности и безопасности сложных систем // Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С. 613–627.

14. Krishnamoorthy K., Peng J. Some Properties of the Exact and Score Methods for Binomial Proportion and Sample Size Calculation // Communications in Statistics – Simulation and Computation. 2007. Vol. 36. Iss. 6. PP. 1171–1186. DOI:10.1080/03610910701569218

15. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.

16. Diniz P.S.R. Adaptive Filtering. Algorithms and Practical Implementation. New York: Springer Science + Business Media Publishing, 2008. 627 p. DOI:10.1007/978-0-387-68606-6

* * *

A Functioning Model of a Dual-Band Radar System That Classifies Targets under the Influence of Interference and Noise

V. Makarenkov¹ 

¹The Mozhaisky Military Space Academy,
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-112-119

Received 22nd April 2020

Accepted 26th October 2020

For citation: Makarenkov V. A Functioning Model of a Dual-Band Radar System That Classifies Targets under the Influence of Interference and Noise. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):112–119. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-112-119

Abstract: *There is proposed a model of a signal received from a complex target formed by a set of rapidly fluctuating point reflectors. Signal reception is carried out against the background of narrow-broadband active noise interference and white Gaussian noise. A functioning model of a dual-band radar system is proposed, in which the problem of classifying rapidly fluctuating point reflectors as a part of complex target against the background of interference and noise is solved. The article examines the issue of assessing the quality of this model, as well as meeting the requirements for ensuring a given value of the probability of correct classification of goals.*

Keywords: *dual-band radar system, complex target, narrowband-wideband active noise interference, task of classification targets, assessment of the probability of a correct classification of targets.*

References

1. Davydov V.S., Lukoshkin A.P., Shatalov A.A., Yastrebkov A.B. *Radar Complex Targets. Resolution and Recognition*. St. Petersburg: Yanis Publ.; 1993. 280 p. (in Russ.)
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. *Principles of Modern Radar. Vol. 1. Basic Principles*. Raleigh: SciTech Publishing, 2010; 924 p. DOI:10.1049/SBRA021E
3. Richards M.A., Scheer J.A., Melvin W.L., Scheer J.A. *Principles of Modern Radar. Vol. 2. Advanced Techniques*. IET; 2012. 874 p. DOI:10.1049/SBRA020E
4. Vasilyev A.V., Vorobiev N.V., Gryaznov V.A., Silkin A.T. Ultra-Wideband Radar Based on Multifrequency Antenna Arrays. *Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference on Exchange of Experience in the Field of Creating Ultra-Wideband Radio Electronic Systems, 19–20 April 2016, Omsk, Russia*. Omsk: Omsk State Technical University Publ.; 2016. p.75–85. (in Russ.)
5. Makarenkov V.V., Semenov A.A. Formulation and Solution of Full Resolution of a Complex Target in the Form of a Set of Slowly Fluctuating Point Reflectors in a Dual-Band Radar Complex. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference "SPbNTORES"*. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; 2020. vol.1(75). p.39–40. (in Russ.)
6. Jankiraman M. *Design of Multi-Frequency CW Radars*. Raleigh: SciTech Publishing; 2007. 351 p.
7. Labets V.V. Shatalov A.A. Shatalova V.A. Models of Signals, Simultaneously Emitted and Received by Multi-Frequency Radar with Phased Arrays. *Aerospace Defense Herald*. 2019;2(22):44–51. (in Russ.)
8. Kuznetsov M., Makarenkov V. A Two-Band Multitasks Radar Complex Functioning Model. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):60–68. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-60-68
9. Bachevsky A.S., Kononov D.Yu., Labets V.V., Shatalov A.A., Shatalova V.A. Adaptive Algorithm for Recognizing Signals Received from Rapidly Fluctuating Targets and Targets with Doppler Scattering in the Presence of Interference. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2017;656:25–34. (in Russ.)
10. Lukoshkin A.P., Karinskiy S.S., Shatalov A.A., et al. *Signal Processing in Multichannel Radars*. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 1983. 328 p. (in Russ.)
11. Volosyuk V.K., Kravchenko V.F. *Statistical Theory of Radio Engineering Systems for Remote Sensing and Radar*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2008. 704 p. (in Russ.)
12. Savrasov Yu.S. *Algorithms and Programs in Radar*. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 1985. 216 p. (in Russ.)
13. Maystruk, A.V. Analysis of the Reliability of Determination of Trusting Limits in the Approximation of Binominal Distribution in the Tasks of Interval Evaluation Of Indicators Of Reliability And Safety of Complex Systems. *Scientific works of the Kuban State Technological University*. 2019;3:613–627. (in Russ.)
14. Krishnamoorthy K, Peng J. Some Properties of the Exact and Score Methods for Binomial Proportion and Sample Size Calculation. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*. 2007;36(6):1171–1186. DOI:10.1080/03610910701569218
15. Dzhigan V.I. *Adaptive signal filtering: theory and algorithms*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2013. 528 p. (in Russ.)
16. Diniz P.S.R. *Adaptive Filtering. Algorithms and Practical Implementation*. New York: Springer Science + Business Media Publishing; 2008. 627 p. DOI:10.1007/978-0-387-68606-6

Сведения об авторе:

МАКАРЕНКОВ
Владислав Викторович

адъюнкт кафедры средств противоракетной обороны Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, makar8722@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0221-1915>

Адаптация структуры диагностической искусственной нейронной сети при появлении новых обучающих примеров

А.В. Маликов^{1*} 

¹Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация
*Адрес для переписки: mkv.vas@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.09.2020

Принята к публикации 25.10.2020.

Ссылка для цитирования: Маликов А.В. Адаптация структуры диагностической искусственной нейронной сети при появлении новых обучающих примеров // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 120–126. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-120-126

Аннотация: По отчетам специалистов информационной безопасности, сохраняется тренд увеличения количества компьютерных инцидентов на объектах информационной инфраструктуры различных секторов экономики. Выявленные компьютерные инциденты подлежат диагностированию, в ходе которого выясняются характеристики нарушения безопасности информации (цель, причины, последствия и др.). Для решения задачи диагностирования компьютерных инцидентов наиболее перспективным путем является применение методов автоматизации сбора и обработки событий, происходящих вследствие реализации сценариев нарушений безопасности информации. Ввиду сильной вариативности данных сценариев, а также из-за совершенствования технологий реализации компьютерных атак, составить диагностические наборы событий на каждый компьютерный инцидент проблематично. Для решения классификационной задачи по отнесению диагностического набора данных (информационного образа компьютерного инцидента) к одному из возможных значений характеристики нарушения могут применяться искусственные нейронные сети. При этом успех решаемой задачи классификации зависит от выбора структуры сети, от количества и качества обучающих примеров. Целью работы является адаптация структуры искусственной нейронной сети, позволяющей при появлении новых обучающих примеров осуществлять достоверное диагностирование компьютерных инцидентов.

Ключевые слова: диагностирование, компьютерный инцидент, многослойный перцептрон, автоэнкодер, характеристика нарушения безопасности.

Введение

Диагностирование компьютерных инцидентов (КИ) является одной из основных задач системы управления системой защиты информации инфокоммуникационной системы. Задача диагностирования должна решаться по каждому КИ, обнаруживаемому в защищаемой системе. Под диагностированием КИ понимается процесс сбора и анализа данных о нарушении безопасности информации с целью идентификации характеристик данного нарушения, таких как тип, цель, причины, последствия и других, для принятия обоснованного решения по реагированию. В настоящее время задача диагностирования КИ решается, как правило, путем визуального поиска и сопоставления предварительно отобранных данных, представляющих собой записи журналов событий операционных систем, средств защиты информации,

сведений из других источников (например, от систем контроля доступа в помещение). Имеющиеся средства защиты информации содержат общие характеристики нарушения безопасности информации (время обнаружения, идентификаторы, наименование нарушения), но не отвечают на вопросы касаемые целей, причин, последствий.

Для проведения диагностирования КИ требуется собрать данные практически из всех основных элементов инфокоммуникационной системы и охарактеризовать произошедшее нарушение. Следует отметить, что, несмотря на необходимость охвата максимального количества источников информации, диагностирование требуется проводить в минимально короткие сроки.

Перспективным путем снижения продолжительности диагностирования КИ при сохранении полноты охвата источников информации является

автоматизация рутинных операций. Процедура сбора данных для диагностирования автоматизирована достаточно давно и представлена различными программными продуктами [1]. Процедура анализа собранных данных вызывает затруднения, связанные с высокой динамикой фиксируемых действий пользователей и событий информационной системы, неопределенностью связей между рядом событий. При этом анализ осуществляется на достаточно сильно выраженном зашумленном фоне, образованном событиями, не имеющими отношения к нарушению безопасности.

Для анализа данных в подобных условиях широкое применение получили методы машинного обучения [2–6]. Обучение осуществляется путем нахождения закономерностей для имеющихся наборов исходных данных и соответствующих им правильных ответов, полученных в ходе проведенного диагностирования. Но для искусственных нейронных сетей (а именно – многослойных сетей прямого распространения) существует особенность, заключающаяся в том, что качество результата классификации в основном зависит от структуры искусственной нейронной сети и от количества доступных обучающих примеров. При этом размерности входного и выходного слоев задаются условиями решаемой задачи, а выбор размерности скрытого слоя осуществляется с учетом максимизации показателя качества искусственной нейронной сети Q . Следовательно, выбор оптимальной структуры искусственной нейронной сети для диагностирования КИ является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена адаптации структуры искусственной нейронной сети, обеспечивающей сохранение достигнутого значения показателя качества при добавлении новых обучающих примеров в условиях ограничений на продолжительность времени обучения, а также описывает экспериментальную проверку полученных результатов.

Постановка задачи

В процессе функционирования системы защиты информации инфокоммуникационной системы, по результатам диагностирования, появляются новые обучающие примеры. С целью их дальнейшего использования необходимо оперативно, т. е. за минимально возможное время, провести дообучение нейронной сети. Возникает задача минимизации времени T_l , отводимого на обучение. Вместе с тем необходимо обеспечить сохранение ранее достигнутого показателя качества искусственной нейронной сети Q_f . Целевая функция задачи адаптации структуры искусственной нейронной сети для диагностирования КИ может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} T_l \rightarrow \min \\ Q_n \geq Q_f \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_n – значение показателя качества искусственной нейронной сети после каждого последующего обучения; Q_f – значение показателя качества искусственной нейронной сети, полученное при первоначальном обучении.

С целью определения параметров структуры нейронной сети необходимо провести вычислительный эксперимент.

Структура диагностической искусственной нейронной сети

Обнаружив компьютерный инцидент, система защиты информации осуществляет сбор данных от различных источников, к числу которых относятся журналы событий средств защиты информации, серверов и рабочих станций. Из всего объема этих данных интерес представляют только те, которые потенциально могут иметь отношение к нарушению безопасности информации. Остальные считаются информационным шумом. Иными словами, осуществляется преобразование из исходного множества зарегистрированных в инфокоммуникационной системе событий X в множество информативных диагностических признаков X' , $F: X \rightarrow X'$, где $X = \{x_{tsob}^{ist}\}$; $ist = \overline{1, N_s}$; $tsob = \overline{1, N_{ts}}$; N_s – количество источников информации; N_{ts} – количество типов событий; $X' = \{x'_{tpr}\}$; $tpr = \overline{1, N_{tp}}$; N_{tp} – количество типов диагностических признаков.

Далее необходимо по имеющемуся набору диагностических признаков определить значения характеристик нарушения безопасности $hn_j^{zn} \in HN$, $j = \overline{1, N_{ch}}$, $zn = \overline{1, N_{zn}}$, где N_{ch} – количество характеристик нарушения безопасности, значения которых требуется определить в ходе диагностирования; N_{zn} – количество возможных значений j -ой характеристики нарушения безопасности. Таким образом, решение задачи диагностирования заключается в нахождении отображения множества информативных диагностических признаков X' на множество значений характеристик нарушения безопасности HN , $F: X' \rightarrow HN$. Множество характеристик нарушения безопасности HN фактически представляет собой детальное описание нарушения безопасности информации. Перечень основных характеристик нарушения безопасности приведен в таблице 1.

Характеристики нарушения безопасности (см. таблицу 1) делятся по способу определения значений на два типа: первичные и вторичные. Значения первичных характеристик определяются путем прямого измерения или расчета (например, идентификаторы пользователей, время и другие). В свою очередь, для определения значений вторичных характеристик требуется построить функциональные зависимости от значений диагностических признаков.

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики нарушения безопасности информации

TABLE 1. Main Characteristics of an Information Security Breach

Наименование	Значения	Тип
Объект воздействия	Автоматизированное рабочее место Серверное оборудование Сетевое оборудование	Первичная
Тип уязвимости	Уязвимости средств защиты информации Уязвимости операционных систем Уязвимости прикладного программного обеспечения	Первичная
Результаты реализации	Изменение Удаление Создание Блокировка и др.	Первичная
Время обнаружения	Момент времени обнаружения нарушения средствами защиты информации	Первичная
Идентификатор атаки (компьютерного инцидента)	Наименование атаки, полученное от средств защиты информации	Первичная
Идентификатор пользователя	ID, предъявленный при входе в систему ID, полученный в результате анализа	Первичная
Адрес источника атаки	Сетевой адрес и порт источника атаки	Первичная
Адрес объекта атаки	Сетевой адрес, порт объекта атаки	Первичная
Цель реализации угрозы	Нарушение конфиденциальности информации Нарушение целостности информации Нарушение доступности информации	Вторичная
Источник нарушения	Внешний Внутренний	Вторичная
Стадия реализации	Разведка Проникновение Реализация Скрытие следов	Вторичная
Характер нарушения	Преднамеренное Непреднамеренное	Вторичная
Последствия	Значительный ущерб Незначительный ущерб	Вторичная
Повторяемость	Впервые обнаруженное нарушение Повторно обнаруженное нарушение	Вторичная
Тип атаки	DoS-атака Сканирование Компьютерный вирус Программная закладка и др.	Вторичная
Уровень риска	Критический Высокий Средний Низкий	Вторичная

Рассматривая задачу идентификации значения j -ой характеристики нарушения безопасности hn_j как частный случай задачи классификации, целесообразно использовать многослойный перцептрон [7]. Процесс формирования структуры многослойного перцептрона для решения задачи классификации подразумевает задание количества нейронов входного N_x , скрытого N_{skr} и выходного N_y слоев.

Количество нейронов входного слоя N_x устанавливается, исходя из количества типов диагностических признаков N_{tp} , используемых для диагностирования КИ, а также от соотношения d общего Δt и единичного $\Delta t'$ временных интервалов сбора признаков ($\Delta t = d \cdot \Delta t'$) $N_x = N_{tp} \cdot d$.

Количество нейронов выходного слоя N_y многослойного перцептрона определяется в зависимости от количества возможных значений j -ой характеристики нарушения безопасности. Так, для идентификации бинарной характеристики нарушения безопасности используются два нейрона выходного слоя.

Количество нейронов скрытого слоя N_{skr} оценивается, исходя из количества весов нейронных связей, определяемых зависимостью, полученной Р. Хехт-Нильсеном для перцептрона с одним скрытым слоем [8]:

$$N_{skr} = \frac{N_{wsv}}{N_x + N_y}, \quad (2)$$

$$\frac{N_y N_{exm}}{1 + \log_2(N_{exm})} \leq N_{wsv} \leq N_y \left(\frac{N_{exm}}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (3)$$

где N_{wsv} – определяемое количество синаптических связей; N_{exm} – количество элементов множества обучающих примеров.

Основываясь на доказательстве В.И. Арнольдом и А.Н. Колмогоровым теоремы о представлении непрерывной функции n -переменных $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в виде суммы непрерывных функций одного аргумента $f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n)$, Р. Хехт-Нильсеном была доказана теорема о возможности построения искусственной нейронной сети, позволяющей осуществлять преобразование для каждого входного вектора в соответствующий ему выходной вектор. Преобразование задается любым множеством различающихся между собой обучающих примеров. Установлено, что такой искусственной нейронной сетью является перцептрон с одним скрытым слоем, причем активационные функции его нейронов должны быть сигмоидными.

Исходя из теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт-Нильсена, для решения задачи классификации достаточно использовать перцептрон с одним скрытым слоем сигмоидных нейронов, число которых определяется по формулам (2, 3).

Определение количества нейронов скрытого слоя определяется путем решения задачи по максимизации значения показателя качества искусственной нейронной сети в заданных ограничениях на количество обучающих примеров N_{exm} :

$$Q(N_{skr}) \rightarrow \max_{N_{skr}}, \quad (4)$$

где $Q(N_{skr})$ – показатель качества созданной искусственной нейронной сети с числом нейронов скрытого слоя N_{skr} .

В качестве показателя качества искусственной нейронной сети может использоваться показатель F -мера, который вычисляется как среднее гармоническое показателей точности (precision, Pr) и полноты (recall, Rc):

$$F = \frac{2Pr * Rc}{Pr + Rc}. \quad (5)$$

Количество событий, произошедших в типовой инфокоммуникационной системе и влияющих на результат диагностирования КИ, может составлять от единиц до десятков тысяч, в зависимости от ширины временного интервала, количества охватываемых типов событий, представляющих собой диагностические признаки. Данное количество событий определяет размерность входного слоя искусственной нейронной сети, используемой для распознавания информационного образа нарушения безопасности информации. Для обучения такой нейронной сети требуется большой объем обучающих примеров. В связи с этим требуется проведение оптимизации структуры нейронной сети для недопущения негативного эффекта переобучения сети на ограниченном числе примеров, т. е. чтобы нейронная сеть смогла обобщать имеющиеся образы, а не просто их запоминать. С этой целью предлагается построение комбинированной искусственной нейронной сети, состоящей из кодирующей части автоэнкодера и многослойного персептрона [9, 10]. Проходя через кодирующую часть автоэнкодера, входные данные преобразуются в групповые диагностические признаки значительно меньшей размерности. Далее осуществляется классификация полученного набора групповых диагностических признаков на множестве значений одной характеристики нарушения безопасности. Структура комбинированной искусственной нейронной сети, применяемой для диагностирования КИ, приведена на рисунке 1. Подчеркивая предназначение рассматриваемой комбинированной нейронной сети, далее будем называть ее диагностической.

В общем виде зависимость значения j -ой характеристики нарушения безопасности от входного набора диагностических признаков X' с применением комбинированной искусственной нейронной сети имеет вид:

$$hn_j = f_3(f_2(f_1(W_1 \cdot X') \cdot W_2) \cdot W_3),$$

где $W_k \in W, k = \overline{1,3}$ – вектор весовых коэффициентов k -го слоя; f_k – функция активации нейронов k -го слоя.

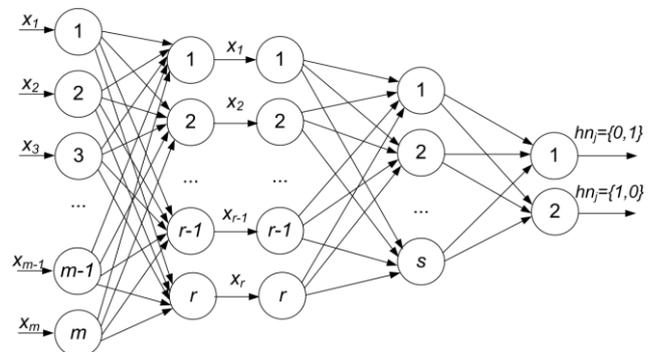


Рис. 1. Структура комбинированной искусственной нейронной сети для определения значения бинарной характеристики нарушения безопасности

Fig. 1. Structure of a Combined Artificial Neural Network for Determining the Value of a Binary Characteristic of a Security Breach

Значение на выходах диагностической искусственной нейронной сети представляет собой оценку степени соответствия значениям характеристики нарушения безопасности для предъявленной на входе совокупности диагностических признаков. Значения весовых коэффициентов W_k определяется путем обучения комбинированной искусственной нейронной сети.

Реализация диагностической искусственной нейронной сети

Для каждой определяемой вторичной характеристики нарушения безопасности информации предполагается своя диагностическая искусственная нейронная сеть. Обучение диагностических искусственных нейронных сетей осуществлялось на основе имеющейся базы данных о нарушениях безопасности информации, составленной экспертным путем. Экспериментальная база данных содержит описание двух характеристик нарушения безопасности «характер нарушения» и «последствия». Она состоит из 276 записей, которые включают наборы диагностических признаков из журналов событий для 20 рабочих станций. Для характеристики нарушения безопасности «характер нарушения» из 276 записей 113 соответствуют преднамеренному нарушению, а 163 – непреднамеренному нарушению. Для характеристики нарушения безопасности «последствия» реализации нарушения из 276 записей 164 соответствуют значительному ущербу, а 112 – незначительному.

Эксперименты проводились по следующей схеме. Первоначально осуществлялось формирование базы данных обучающих примеров, включающей в себя множество пар наборов диагностических признаков и соответствующих им значений характеристик нарушения безопасности. Данные пары предназначены для обучения комбинированных искусственных нейронных сетей и проверки их

готовности к функционированию. Затем в эту же базу данных сохраняются новые обучающие примеры, что требует изменение структуры нейронных сетей. Обучение осуществляется методом обратного распространения ошибки, в ходе которого происходит корректировка весовых коэффициентов каждой связи искусственных нейронов между собой [7].

Далее осуществлялось формирование структуры диагностических нейронных сетей. Размер входного слоя для всех диагностических нейронных сетей соответствует размеру вектора диагностических признаков. Для охвата исследуемых диагностических признаков на длительном интервале времени в ходе эксперимента размер входного слоя составил 32400. Выходной слой каждой комбинированной нейронной сети определяется по числу значений вторичной характеристики нарушения безопасности.

Размеры скрытых слоев автоэнкодера и перцептрона первоначально выбирались, исходя из минимально достаточного согласно условию (2 и 3) Р. Хехт-Нильсена, и составляли 12 и 1, соответственно.

Для обучения и проверки качества искусственной нейронной сети база данных была разделена на две части. Первоначально 180 записей были взяты для обучения и 76 записей – для тестирования. Оценка качества комбинированной нейронной сети проводилась по показателю F -мера, значение которого рассчитывается согласно выражению (5). В свою очередь показатели точности Pr и полноты Rc вычисляются следующим образом:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP'}$$

$$Rc = \frac{TP}{TP + FN'}$$

где TP – количество записей, классифицируемых как истинное значение характеристики, в то время как оно истинное; FP' – количество записей, классифицируемых как истинное значение характеристики, в то время как оно фактически ложное; FN' – количество записей, классифицируемых как ложное значение, в то время как оно истинное.

В ходе вычислительного эксперимента со 180 обучающими примерами получены зависимости значений показателя F -меры от количества нейронов скрытых слоев автоэнкодера N_{ae} и перцептрона N_{perc} для характеристики нарушения безопасности «характер воздействия», которые приведены на рисунке 2, а для характеристики нарушения безопасности «последствия» – на рисунке 3.

Как видно из рисунков 2 и 3, диагностические нейронные сети достигают максимума значения показателя F -меры при числе нейронов скрытого слоя автоэнкодера порядка 180 и 4 нейронов скрытого слоя перцептрона. При увеличении числа

нейронов скрытых слоев повышение показателя F -меры не наблюдается и впоследствии даже снижается из-за возникновения негативного эффекта переобучения.

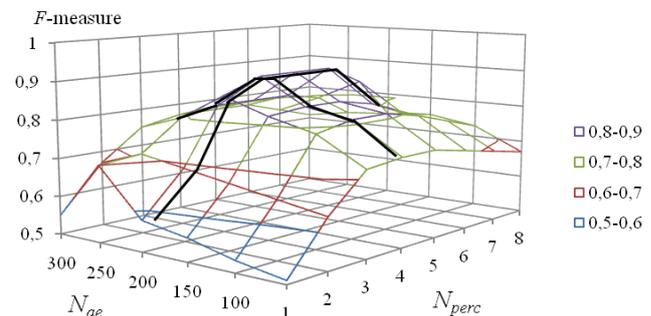


Рис. 2. Значения показателя F -мера для характеристики нарушения безопасности «характер воздействия»

Fig. 2. Values of the Indicator F -Measure for the Characteristic of a Security Breach «Nature of Impact»

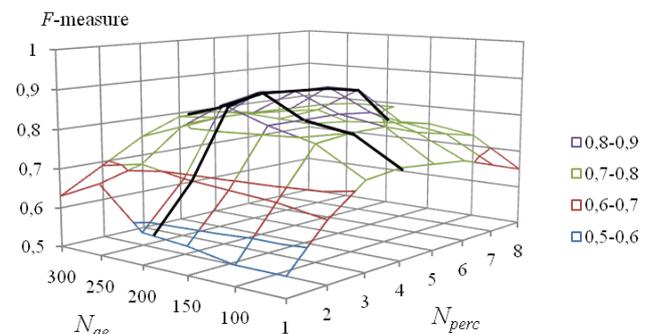
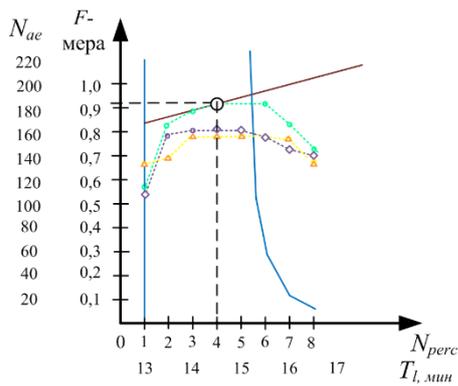


Рис. 3. Значения показателя F -мера для характеристики нарушения безопасности «последствия»

Fig. 3. Values of the F -Measure Indicator for the «Consequences» Characteristic of a Security Breach»

Затем количество обучающих примеров было увеличено до 194, а количество тестовых – до 82. В результате комбинированная нейронная сеть имеет высокие значения показателя точности определения значения бинарной характеристики нарушения безопасности при числе нейронов 186 для скрытого слоя автоэнкодера и 4 для скрытого слоя перцептрона. Задача оптимизации времени обучения нейронной сети решается путем выбора минимально достаточного количества нейронов скрытого слоя без потери качества первоначально созданной сети. На рисунке 4 приведена зависимость значений показателей F -меры и продолжительности обучения T_l от структуры комбинированной искусственной нейронной сети на примере характеристики нарушения безопасности «характер воздействия». При увеличении количества нейронов время обучения возрастает, а значения показателей точности и полноты сначала остаются прежними, но затем снижаются. При уменьшении числа нейронов скрытых слоев вместе с незначительным снижением времени обучения снижаются значения показателей точности и полноты, что недопустимо по условиям задачи.



- Ограничения Р.Хехт-Нильсена
- Количество нейронов скрытого слоя автоэнкодера равно 185
- △-△- Количество нейронов скрытого слоя автоэнкодера равно 250
- ◇-◇- Количество нейронов скрытого слоя автоэнкодера равно 150
- Время обучения искусственной нейронной сети

Рис. 4. Зависимости значений показателя F -мера и продолжительности обучения от структуры комбинированной искусственной нейронной сети

Fig. 4. Values of the Indicator F -Measure for the Characteristic of a Security Breach «Nature of Impact»

Данные результаты указывают на необходимость адаптации структуры диагностической нейронной сети при пополнении базы обучающих примеров, при этом для обучающих примеров числом до 200 нейронов скрытого слоя автоэнкодера целесообразно выбирать порядка 185, количество нейронов скрытого слоя персептрона – 4. С увеличением числа обучающих примеров на 14

значения показателя F -мера осталось прежним при увеличении числа нейронов скрытого слоя автоэнкодера на 6 (186–180) и сохранении 4 нейронов скрытого слоя персептрона.

Заключение

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента подтвердили необходимость адаптации структуры диагностической нейронной сети с целью минимизации времени обучения при добавлении новых обучающих примеров. Учитывая реализуемость предложенной структуры комбинированной искусственной нейронной сети в виде программного средства, представляется возможным ее практическое применение в составе системы защиты информации типовой инфокоммуникационной системы. Своевременное и достоверное диагностирование позволит обеспечить высокую безопасность и тем самым устойчивость инфокоммуникационных систем.

Направления дальнейших исследований связываются с исследованием вопросов применения диагностических нейронных сетей для определения значений вторичных характеристик нарушений безопасности информации, зависящих от других, ранее определенных значений характеристик, в том числе и первичных, за счет добавления в структуру рекуррентных связей.

Список используемых источников

1. Kotenko I.V., Saenko I.B. Creating New-Generation Cybersecurity Monitoring and Management Systems // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Vol. 84. No. 6. PP. 424–431. DOI:10.1134/S1019331614060033
2. Feiya Lv., Wen C., Bao Z., Liu M. Fault diagnosis based on deep learning // Proceedings of the American Control Conference (ACC, Boston, USA, 6–8 July 2016). IEEE, 2016. PP. 6851–6856. DOI:10.1109/ACC.2016.7526751
3. Zou D.Q., Qin H., Jin H. UiLog: Improving Log-Based Fault Diagnosis by Log Analysis // Journal of Computer Science and Technology. 2016. No. 31(5). PP. 1038–1052. DOI:10.1007/s11390-016-1678-7
4. Fu Q., Lou J.G., Wang Y., Li J. Execution Anomaly Detection in Distributed Systems Through Unstructured Log Analysis // Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Data Mining (Miami, USA, 6–9 December 2009). IEEE, 2009. PP. 149–158. DOI:10.1109/ICDM.2009.60
5. Nolle T., Seeliger A., Muhlhauser M. Unsupervised Anomaly Detection in Noisy Business Process Event Logs Using Denoising Autoencoders // Proceedings of the 19th International Conference on Discovery Science (DS, Bari, Italy, 19–21 October 2016). Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2016. Vol. 9956. PP. 442–456. DOI:10.1007/978-3-319-46307-0_28
6. Sakurada M., Yairi T. Anomaly Detection Using Autoencoders with Nonlinear Dimensionality Reduction // Proceedings of the 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis (MLSDA'14, Gold Coast, Australia, 2 December 2014). New York: Association for Computing Machinery, 2014. PP. 4–11. DOI:10.1145/2689746.2689747
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
8. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // Proceedings of the 1st Annual International Conference on Neural Networks (San Diego, USA, 21–24 June 1987). IEEE, 1987. Vol. 3. PP. 11–15.
9. Маликов А.В., Авраменко В.С., Саенко И.Б. Модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном обучении // Информационно-управляющие системы. 2019. № 6(103). С. 32–42. DOI:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42
10. Авраменко В.С., Маликов А.В. Диагностирование нарушений безопасности в инфокоммуникационных системах на основе комбинированной нейронной сети // VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 27–28 февраля 2019). СПб.: СПбГУТ, 2019. Т. 2. С. 14–19.

* * *

Adaptation of the Diagnostic Artificial Neural Network Structure When New Training Examples Appear

A. Malikov¹ 

¹Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-120-126

Received 19st September 2020

Accepted 25th October 2020

For citation: Malikov A. Adaptation of the Diagnostic Artificial Neural Network Structure When New Training Examples Appear. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4): 120–126. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-120-126

Abstract: *In this paper we can see that identified computer incidents are subject for diagnostics, during which the characteristics of information security violations are clarified (purpose, causes, consequences, etc.). To diagnose computer incidents, we can use methods of automation while collection and processing the events that occur as a result of the implementation of scenarios for information security violations. Artificial neural networks can be used to solve the classification problem of assigning diagnostic data set (information image of a computer incident) to one of the possible values of the violation characteristic. The purpose of this work is to adapt the structure of an artificial neural network that allows the accuracy diagnostics of computer incidents when new training examples appear.*

Keywords: *diagnostics, computer incident, multi-layer perceptron, autoencoder, security violation characteristic.*

References

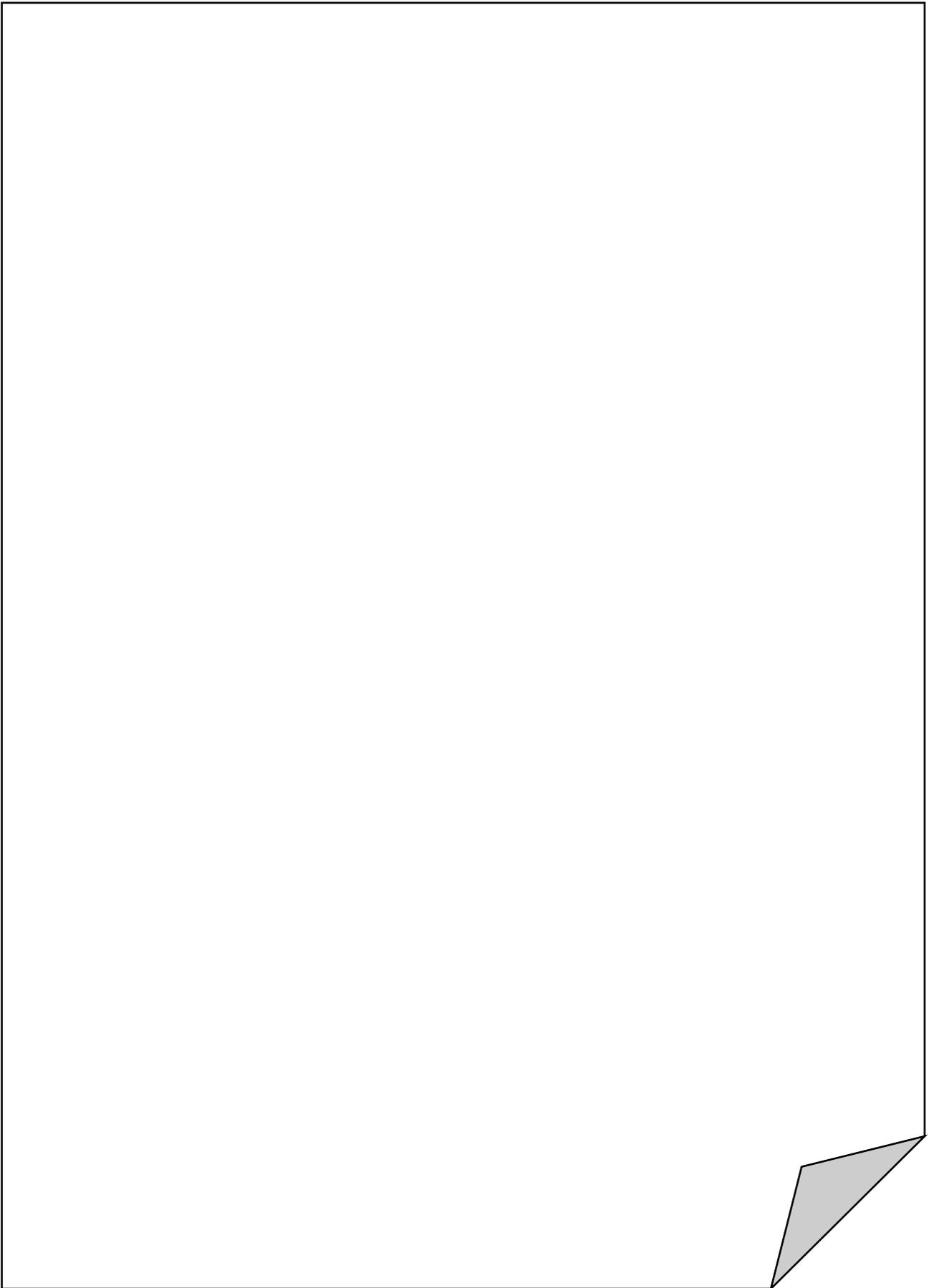
1. Kotenko I.V., Saenko I.B. Creating New-Generation Cybersecurity Monitoring and Management Systems. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2014;84(6):424–431. DOI:10.1134/S1019331614060033
2. Feiya Lv., Wen C., Bao Z., Liu M. Fault diagnosis based on deep learning. *Proceedings of the American Control Conference, ACC, 6–8 July 2016, Boston, USA*. IEEE; 2016. p.6851–6856. DOI:10.1109/ACC.2016.7526751
3. Zou D.Q., Qin H., Jin H. UiLog: Improving Log-Based Fault Diagnosis by Log Analysis. *Journal of Computer Science and Technology*. 2016;31(5):1038–1052. DOI:10.1007/s11390-016-1678-7
4. Fu Q., Lou J.G., Wang Y., Li J. Execution Anomaly Detection in Distributed Systems through Unstructured Log Analysis. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Data Mining, 6–9 December 2009, Miami, USA*. IEEE; 2009. p.149–158. DOI:10.1109/ICDM.2009.60
5. Nolle T., Seeliger A., Muhlhauser M. Unsupervised Anomaly Detection in Noisy Business Process Event Logs Using Denoising Autoencoders. *Proceedings of the 19th International Conference on Discovery Science, DS, 19–21 October 2016, Bari, Italy. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2016. vol.9956. p.442–456. DOI:10.1007/978-3-319-46307-0_28
6. Sakurada M., Yairi T. Anomaly Detection Using Autoencoders with Nonlinear Dimensionality Reduction. *Proceedings of the 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis, MLSDA'14, 2nd December 2014, Gold Coast, Australia*. New York: Association for Computing Machinery; 2014. p.4–11. DOI:10.1145/2689746.2689747
7. Khaikin, S.: Neural networks: A Comprehensive Foundation. Moscow: Williams Publ.; 2006. (In Russ.)
8. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. *Proceedings of the 1st Annual International Conference on Neural Networks, 21–24 June 1987, San Diego, USA*. IEEE; 1987. vol.3. p.11–15.
9. Malikov A.V., Avramenko V.S., Saenko I.B. Model and Method for Diagnosing Computer Incidents in Information and Communication Systems Based on Deep Machine Learning. *Information and Control Systems*. 2019;6(103):32–42 (In Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42
10. Avramenko V.S., Malikov A.V. Diagnosis of Security Breaches in Information and Communication Systems Based on Combination of a Neural Network. *Proceedings of the VIIIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 27–28 February 2019, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2019. vol.2. p.14–19. (In Russ.)

Сведения об авторе:

МАЛИКОВ
Альберт Валерьянович

адъюнкт кафедры автоматизированных систем специального назначения
Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
mkv.vas@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4285-5360>

ДЛЯ ЗАМЕТОК



**X ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
И НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ»**



ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ:

- Радиотехнологии связи
- Инфокоммуникационные сети и системы
- Информационные системы и технологии
- Теоретические основы радиоэлектроники и систем связи
- Цифровая экономика, управление и бизнес-информатика
- Гуманитарные проблемы информационного пространства
- Сети связи специального назначения

24–25 ФЕВРАЛЯ 2021 ГОДА

ПОДРОБНОСТИ НА САЙТЕ КОНФЕРЕНЦИИ

APINO.SPBGUT.RU

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



СВЯЗЬ

«Информационные и коммуникационные
технологии»

15–18 июня 2021

33-я международная
выставка

Организатор



При поддержке:

- Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.sviaz-expo.ru

12+

Реклама



Выходные данные

Дизайн обложки – ООО «Комильфо»

План издания научной литературы 2020 г., п. 10

Дата выхода в свет	Усл.-печ. л.	Формат	Тираж	Заказ	Свободная цена
16.12.2020	16,25	60×84 _{1/8}	1000 экз.	№ 1171	

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**
Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Адрес типографии:
193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

E-mail: tuzs@spbgut.ru Web: tuzs.sut.ru VK: vk.com/spbtuzs



Подписной индекс по каталогу "Издания органов НТИ" Агентства "Роспечать" – 59983