Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:11 Page 1

ОРГАНИЗАТОРЫ: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова (ЯрГУ)
Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)
Институт Инженеров Электротехники и Электроники (IEEE)
Издательский дом "Медиа Паблишер"

XLVI INTERNATIONAL CONFERENCE

«2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications» (SYNCHROINFO-2019)

3-5 июля 2019 года, г. Ярославль,
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова (ЯрГУ)

Язык предоставления материалов английский + русский (по желанию)

Доклады участников конференции на английском языке будут включены в Программу Публикаций Конференций IEEE (IEEE Conference Publication Program (CPP)) – **IEEE Explore**, возможна индексация в **Scopus** и **WoS**

Доклады участников конференции на русском языке будут опубликованы в журнале "СИНХРОИНФО" и размещены в РИНЦ

Стоимость Оргвзноса:

при ранней регистрации с предоставлением материалов до 30 апреля – 7000 руб. (5000 руб. для членов IEEE)

при регистрации до 31 мая – 10 000 руб. (7000 руб. для членов IEEE)

Заочное участие в конференции не предусмотрено!

Оргкомитет конференции:
Тел.: +7 (495) 957-77-43; +7(926) 218-82-43
Адрес для отправки заявок и материалов: sinchroconf@media-publisher.ru

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:11 Page 2

T•Comm
Телекоммуникации и транспорт
ТОМ 13. №6'2019

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобразования России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций.

Учредитель
ООО "Издательский дом Медиа Паблишер"

Главный редактор
Тихвинский Валерий Олегович

Издатель
Дымкова Светлана Сергеевна
ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович
(д.ф.-м.н., профессор, член программного и оргкомитетов WSEAS), Россия, Мексика

Бугаев Александр Степанович
(академик РАН), Россия

Вааль Альберт
(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

Варламов Олег Витальевич
(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

Головачев Юлиус
(управляющий консультант Detecon Intarnational GmBH), Германия

Гребенников Андрей Викторович
(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

Данилов Владимир Григорьевич
(д.ф-м.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

Дулкейтс Эрик
(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

Елизаров Андрей Альбертович
(д.т.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

Зубарев Юрий Борисович
(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ), Россия

Корбетт Ровэлл
(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), Гон-Конг (Китай), США

Кузовкова Татьяна Алексеевна
(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

Кюркчан Александр Гаврилович
(д.ф-м.н., профессор МТУСИ), Россия

Омельянов Георгий Александрович
(д.ф.-м..н., Университет де Сонора, факультет математики, Эрмосильо), Мексика

Самойлов Александр Георгиевич
(д.т.н., профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых), Россия

Сеилов Шахмаран Журсинбекович
(д.э.н., Президент Казахской академии инфокоммуникаций), Казахстан

Сысоев Николай Николаевич
(д.ф-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

Чиров Денис Сергеевич
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шарп Майкл
(д.э.н., вице-президент европейского института стандартизации – ETSI), Великобритания

Яшина Марина Викторовна
(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

www.media4publisher.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ

Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А.
Расчет интенсивности дождя, вызывающего срыв цифровой связи по атмосферному каналу 5

Платонов С.А., Платонов А.В., Постников М.Е., Смятских А.А., Хадонова С.В.
Использование ГНСС для решения комплексных прикладных задач 10

Друк Е.В., Левко И.В.
Основы организации и управления VPN-сетями современных информационных систем специального назначения 19

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Хлопов Б.В., Шашурин В.Д., Мешков С.А., Самойлова В.С., Апакин Ю.И.
Исследование модификации электромагнитных полей метасредой 30

Орлов В.С.
Широкополосный двухмодовый фильтр на оттекающих поверхностных акустических волнах с неэквидистантными электродами преобразователей и отражательных решеток 36

ТРАНСПОРТ

Соколов П.А., Школина И.В., Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г.
Моделирование движения автотранспорта на основе КГД системы уравнений с использованием суперкомпьютеров 46

Хасан Я.А., Рыжов Н.Г., Соколов Ю.М., Фахми Ш.С.
Сжатие и восстановление транспортной видеоинформации на основе адаптивного трехмерного косинусного преобразования 53

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

СВЯЗЬ

Руменко Н.Ю., Костюк А.В.
Метод распознавания LDPC-кодов для адаптивных систем связи 60

Кудряшова А.Ю.
Метод эффективного кодирования цветных изображений при условии допустимых и запрещенных значений цветовой гаммы 65

ТРАНСПОРТ

Евтюков С.С., Голов Е.В., Иванов Н.А.
Инновационные системы безопасности современных транспортных средств 71

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:11 Page 3

CONTENT

COMMUNICATIONS

Abramova E.S., Myshkin V.F., Khan V.A.
The calculation of the intensity of rain causing digital communication failure through the atmospheric channel 5

Platonov S.A., Platonov A.V., Postnikov M.E., Smyatskikh A.A., Khadonova S.V.
Using global navigation satellite systems to solve complex application problems 10

Druk E.V., Levko I.V.
Bases of the organization and management of vpn-setyami of special purpose modern information systems 19

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Hlopov B.V., Shashurin V.D., Meshkov S.A., Samoylova V.S., Apakin Yu.I.
Study of the modification of the electromagnetic fields of meta medium 30

Orlov V.S.
Wideband two-mode leaky surface acoustic wave filter with non-equidistant electrodes of transducers and reflecting gratings 36

TRANSPORT

Sokolov P.A., Shkolina I.V., Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G.
Traffic simulation on the basis of the QGD system of equations using supercomputers 46

Hasan Y.A., Ryzhov N.G., Sokolov Yu.M., Fahmi Sh.S.
Compression and restoration of transport video information on the basis of adaptive three-dimensional cosine transformation 53

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMMUNICATIONS

Rumenko N.Yu., Kostyuck A.V.
A method for identifying LDPC codes for adaptive communicational systems 60

Kudryashova A.Yu.
A method of efficient coding of color images under the condition of permissible and forbidden values of color gamut 65

TRANSPORT

Evtukov S.S., Golov E.V., Ivanov N.A.
Innovative safety systems for modern vehicles 71

T•Comm
Telecommunications and transport
Volum 13. №6 2019

The journal is included in the list of scientific publica4tions, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of sci4entific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses.

Founder: "Media Publisher", Ltd.

Publisher: Dymkova Svetlana S.
ds@media-publisher.ru

Editor in Chief: Dr. Valery O. Tikhvinskiy

Editorial board

Adzhemov Artem S.
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia
Anyutin Alexander P.
Doctor of sciences, Professor , member of the program and organizing committee WSEAS, Russia, Mexico
Bugaev Alexander S.
Academician of the RAS, Russia
Corbett Rowell
Full Professor: Electronic & Electrical Engineering Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA
Chirov Denis S.
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
Danilov Vladimir G.
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia
Golovachyov Julius
Managing Consultant Detecon Intarnational GmBH, Germany
Grebennikov Andrey
Ph.D., Sumitomo Electric Europe, United Kingdom
Dulkeyts Eric
Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA
Kuzovkova Tatyana A.
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
Kyurkchan Alexander G.
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia
Omel'yanov Georgii A.
Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, Mexico
Samoilov Alexander G.
Doctor of sciences, VLSU, Russia
Seilov Shakhmaran Zh.
Doctor of sciences, President of the Kazakh Academy of Infocomm, Kazakhstan
Sharpe Michael
PhD, vice-president of the European Standards Institute – ETSI, United Kingdom
Shavrin Sergey S.
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
Sysoev Nikolai N.
Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University. Lomonosov, Russia
Varlamov Oleg V.
Doctor of sciences, MTUCI, Russia
Waal Albert
Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany
Yashina Marina V.
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia
Yelizarov Andrey A.
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia
Zubarev Yuri B.
Doctor of sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Russia

All artocles and illustrations are copyryght. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company
© "Media Publisher", 2019

www.media4publisher.ru

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:11 Page 4

ОРГАНИЗАТОРЫ: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП) и Издательский дом "Медиа Паблишер"

XXII INTERNATIONAL CONFERENCE

«WAVE ELECTRONICS AND ITS APPLICATION IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS» (WECONF-2019)

3-7 июня 2019 года, г. Санкт-Петербург,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Доклады участников конференции будут включены в Программу Публикаций Конференций IEEE (IEEE Conference Publication Program (CPP)) – **IEEE Explore**, возможна индексация в **Scopus**

Стоимость Оргвзноса: 7000 руб.

Секции конференции:

1. Акустооптика
2. Акустоэлектроника
3. Оптические методы обработки информации
4. Обработка и передача информации в инфокоммуникационных системах
5. Круглый стол "Акустооптика и акустоэлектроника: проблемы, перспективы и области применения"
6. Встроенные микроэлектронные системы
7. Электромеханика и системы управления

Заочное участие в конференции и в индексе IEEE не предусмотрено!

Оргкомитет конференции:

Тел.: +7 (495) 957-77-43; +7(926) 218-82-43

Адрес для отправки заявок и материалов: weconf@media-publisher.ru

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:11 Page 5

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОЖДЯ, ВЫЗЫВАЮЩЕГО СРЫВ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ ПО АТМОСФЕРНОМУ КАНАЛУ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10274

Абрамова Евгения Сергеевна,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия, ***evgenka_252@mail.ru***

Мышкин Вячеслав Федорович,
Томский политехнический университет, г.Томск, Россия, ***gos100@tpu.ru***

Хан Валерий Алексеевич,
Томский политехнический университет, Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г.Томск, Россия, ***nt.centre@mail.ru***

Ключевые слова: *линия связи, атмосферный канал, интенсивность дождя, ослабление излучения, размер дождевых капель.*

В настоящее время в России возобновляется интерес к открытым оптическим линиям связи (ООЛС) в связи с подключением к мировым информационным коммуникациям. ООЛС успешно конкурирует с волоконными оптическими линиями связи (ВОЛС) по временным и финансовым затратам на установление связи. Существенным недостатком ООЛС является зависимость качества передачи информации от метеоусловий на трассе. Рабочие характеристики открытого канала связи определяются средой распространения. Если среда распространения отлична от свободного пространства (космическое пространство) происходит искажение структуры электромагнитной волны. Эти искажения определяются взаимодействием волны с неоднородностями среды. При распространении в атмосфере происходят амплитудные и пространственные искажение структуры лазерного пучка ООЛС, переносящего информацию. Амплитудные эффекты проявляются в виде временных изменений поля, приводящих к уменьшению мощности, флуктуациям мощности и частотной фильтрации излучения и ограничивают дальность связи. Пространственные эффекты проявляются в виде изменения направления распространения и искажения луча в направлении, поперечном фронту волны. Последнее приводит к ограничению скорости передачи информации. Распространение оптического излучения в атмосфере сопровождается широким набором явлений. При этом ни одно из этих явлений не проявляется в отдельности. По качественным признакам эти явления можно разделить на следующие основные группы: рефракция лучей, поглощение энергии атмосферными газами и аэрозолем, рассеяние энергии частицами аэрозолей и флуктуациями плотности воздуха, флуктуации параметров оптического излучения, обусловленные атмосферной турбулентностью. Приводятся формула для расчета и результаты оценки максимальной интенсивности дождя, выполненных на примере линии связи между различными корпусами СибГУТИ, приводящей к срыву связи.

Информация об авторах:

Абрамова Евгения Сергеевна, *доцент кафедры радиотехнических устройств, к.т.н., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия*

Мышкин Вячеслав Федорович, *профессор, д.ф.-м.н., Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Хан Валерий Алексеевич, *в.н.с. лаборатории оптической локации, профессор, д.т.н., Томский политехнический университет, Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Для цитирования:
Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А. Расчет интенсивности дождя, вызывающего срыв цифровой связи по атмосферному каналу // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 5-9.

For citation:
Abramova E.S., Myshkin V.F., Khan V.A. (2019) The calculation of the intensity of rain causing digital communication failure through the atmospheric channel . *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 5-9. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:12 Page 6

Введение

Технология ООЛС получила широкое распространение в городских условиях. Открытые оптические линии связи (ООЛС) успешно конкурирует с волоконными оптическими линиями связи (ВОЛС) по временным и финансовым затратам на установление связи.

Рабочие характеристики ООЛС определяются параметрами среды распространения. При распространении в атмосфере оптического излучения наблюдаются амплитудные и пространственные эффекты. Амплитудные эффекты проявляются в виде уменьшения и флуктуации мощности. Ослабление ограничивает дальность связи по ООЛС. Пространственные эффекты проявляются в виде изменения направления распространения и искажения пучка в направлении, поперечном фронту волны. Это ограничивает скорость передачи информации.

Существующие решения ООЛС на рынке позволяют получить следующий ряд преимуществ [1]:

1)– быстрое развертывание канала;

2) скрытность и защищенность - перехватить сигнал можно только установив сканеры приемники непосредственно в луч от передатчиков. Реальная сложность выполнения этого требования делает перехват практически невозможным. Отсутствие ярко выраженных внешних признаков (в основном, это электромагнитное излучение) позволяет скрыть не только передаваемую информацию, но и сам факт информационного обмена;

3) позволяет передавать спектр современных услуг по технологии VoIP, включая доступ в Интернет, подключение IP-телефонии, создание беспроводного канала цифрового телевидения (IPTV), видеонаблюдение.

Для ООЛС не требуется прокладки кабелей и разрешений на использование электромагнитных частот. ООЛС также позволяет организовать высокоскоростной беспроводный канал связи в течении нескольких часов (с монтажом и прокладкой кабелей).

Постановка задачи

Все учебные корпуса и студенческие общежития Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ) планируется подключить к цифровой сети связи Интернет. В связи с этим возникает задача выбора проводящей среды: оптическое волокно или открытый атмосферный канал. Средняя цена имеющегося в РФ оптического кабеля (ОК) составляет 13 долл. за 1 метр. При использовании подземного ОК необходимо также учесть стоимость работ по прокладке кабельной канализации. К первоначальным затратам относятся также стоимость передающего и принимающего электронно-оптических модулей (ПОМ и ПрОМ).

Одним из недостатков ООЛС является зависимость скорости передачи информации от метеоусловий на трассе. В настоящее время накоплен обширный материал по решению проблем, возникающих при распространении непрерывного и импульсного оптического излучения в турбулентной атмосфере [2, 3]. Изучены особенности передачи оптического изображения через аэрозольные облака [4].

В связи с этим целью исследований является получение соотношения позволяющее производить необходимые оценки устойчивости ООЛС, на примере линии связи СибГУТИ, в различных метеорологических условиях.

Теория

Все осадки содержат частицы, большие чем длина волны оптического излучения. В дождях концентрация капель находится в пределах $10^2 \div 10^4$ см$^{-3}$, а их размеры находится в диапазоне от 0,01 мм до нескольких мм, водность – до единиц граммов на кубометр, интенсивность – от 0,1 до десятков мм в час. Для подобных частиц выполняется условие геометрической оптики ($\rho >> 1$) во всем рабочем диапазоне ООЛС. Как для частиц дождя, так и снега объемный коэффициент ослабления равен двойному геометрическому сечению частиц.

Существуют оптические цифровые приемо-передающие устройства для создания оптических открытых линий связи. Стоимость комплекта приемопередатчика, включая установку и настройку составляет 2000 долл. Изготовитель гарантирует устойчивую связь на расстояниях до 1 км в широком интервале метеоусловий, включая туманы, дождь, град.

В приемо-передающем устройстве используется излучатель со средней мощностью $I_0 = 200$ мВт (при пиковой несколько Вт) на длине волны $\lambda = 0.85$ мкм, фотоприемник с пороговой чувствительностью $I_{пор} = 0.1$ мкВт.

Результаты экспериментов

При скоростях передачи информации ~1 Гбит/с основным процессом, ограничивающим максимальное расстояние связи является рассеяние лазерного излучения на каплях воды. Необходимо провести оценку максимальной интенсивности дождя, при различных значениях интенсивности осадков, приводящей к срыву связи по атмосферному каналу связи.

Коэффициент увеличения изображения излучающей площадки светодиода, вычисляемая из формулы тонкой линзы, составляет:

$$k = \frac{L}{F}, \qquad (1)$$

где L – длинна трассы, F – фокусное расстояние объектива передающего блока.

Следовательно, в плоскости приемника изображение излучающей площадки светодиода будет иметь размеры:

$$D = k \cdot d, \qquad (2)$$

где D – размер светового пятна в плоскости приемного блока, d – размер излучающей площадки светодиода передающего блока.

Потери мощности излучения за счет рассогласования апертур передатчика и приемника, со световым диаметром $\varnothing_{об}$, ООЛС составляют:

$$n = \left(\frac{D}{\varnothing_{iä}} \right)^2. \qquad (3)$$

Энергетический потенциал ООЛС можно определить как:

$$\tau = 10 \lg \left(\frac{I_0}{I_{iio}} \right). \qquad (4)$$

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:12 Page 7

При использовании ООЛС основной вклад в ослабление излучения вносят осадки. Вероятность появления тумана значительно ниже. Снежинки имеют разнообразные формы и размеры, эффективность взаимодействия которых с лазерным излучением невозможно оценить теоретически. Капли дождя с большой вероятностью имеют сферическую форму. Для таких частиц фактор эффективности взаимодействия с лазерным излучением может быть точно вычислено. Поэтому расчеты проведем для дождей с разной интенсивностью.

Для расчетов будем считать, что водность дождя равномерно распределена по трассе между передатчиком и приемником. Таким образом, ослабление происходит на частицах, находящихся внутри усеченного конуса объемом $V_к$. Уравнение ослабления излучения частицами, находящимися внутри усеченного конуса на трассе распространения луча, имеет вид [5]:

$$I = I_0 \exp[-\alpha \cdot l], \quad (5)$$

$$\alpha = 1 - \int_{r_{min}}^{r_{max}} \sigma(r) S(r) N_k(r) dr, \quad (6)$$

где $\sigma(r) = 2$ – фактор эффективности ослабления, $S(r) = \pi r^2$ – геометрическое сечение капли, $N_к(r)$ – непрерывная функция распределения капель по размерам.

Массовое содержание воды внутри светового усеченного конуса:

$$B = \rho_в \sum_i V(r_i) N_к(r_i) = \rho_в \int_{r_{min}}^{r_{max}} V(r) N_к(r) dr, \quad (7)$$

где $\rho_в$ – плотность воды, V(r) – объем капли.

Объемная плотность воды в атмосферных осадках

$$B = B_k / V_k.$$

Для описания функция распределения капель дождя по размерам используется достаточно большое количество выражений [6, 7]

$$N_k(r) = 7300\ R^{0,056} \exp(-8,6R^{-0,21} r) \quad (8)$$

где радиус капель r выражаются в мм, интенсивность дождя R – мм/час, а вероятностная дифференциальная плотность распределения дождевых капель по размерам $N(r)$ – м$^{-3}$мм$^{-1}$.

С учетом выражения для $N(r)$ уравнения (5, 6) будут иметь вид:

$$\alpha = 1 - 7300 \cdot 2\pi \cdot R^{0.056} \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \exp(-8,6R^{-0,21} r) dr, \quad (9)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left[-\left(1 - 7300 \cdot 2\pi \cdot R^{0,056} \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \exp(-8,6R^{-0,21} r) dr\right) \cdot l\right], \quad (10)$$

$$B_к = 7300 \frac{4\pi}{3} R^{0,056} \rho_в \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 \exp(-8,6R^{-0,21} r) dr. \quad (11)$$

Скорость падения капель в вязкой среде имеет вид:

$$\upsilon(r_i) = 4 \frac{\rho_в - \rho_{возд}}{18\ \mu_{возд}} g\ r_i^2, \quad (12)$$

где $\rho_в$, $\rho_{возд}$ – плотности воды и воздуха, g – ускорение свободного падения.

За время t через площадку S падает на землю капли диаметром r_i, количество которых равно:

$$N_y(r_i) = S\ \upsilon(r_i)\ \frac{N_к(r_i)}{V_к} t. \quad (13)$$

Объем падающих через площадку S капель воды, равная интенсивности дождя за единицу времени, можно вычислить из выражения:

$$V_y(r_i) = \frac{4\pi r^3}{3} N_y(r_i) = \frac{4\pi r^3}{3} S\ \upsilon(r_i) \frac{N_к(r_i)}{V_к} t. \quad (14)$$

Для расчета по уравнению (10) необходимо вычислить интеграл

$$\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \exp(-8,6R^{-0,21} r) dr = \left\{\exp\left(-\frac{8,6}{R^{0,21}} r\right)\left[-\frac{r^2 R^{0,21}}{8,6} - \frac{2r R^{0,42}}{8,6^2} - \frac{2R^{0,63}}{8,6^3}\right]\right\}\Bigg|_{r_{min}}^{r_{max}} \quad (15)$$

Поэтому расчетное выражение (9) будет иметь вид, пригодный для расчета при заданных метеоусловий и расстояний на местности:

$$\alpha = 1 - 7300 \cdot 2\pi \cdot R^{0,056} \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \exp(-8,6R^{-0,21} r) dr, \quad (16)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left[-\left(1 + 7300 \cdot 2\pi R^{0,056}\left\{\exp\left(-\frac{8,6}{R^{0,21}} r\right)\left[\frac{r^2 R^{0,21}}{8,6} + \frac{2r R^{0,42}}{8,6^2} + \frac{2R^{0,63}}{8,6^3}\right]\right\}\Bigg|_{r_{min}}^{r_{max}}\right) \cdot l\right] \quad (17)$$

Величины R, r_{min}, r_{max} определяются метеоусловиями, величина l – расстояние между передатчиком и приемником. Известно, что основной вклад в ослабление оптического излучения вносят капли размерами менее 1 мм. Поэтому можно использовать лишь две переменные величины R, l.

Выражение (13) написано для коллимированного луча, а любая ООЛС работает на расходящихся пучках. Например, для российской приемо-передающей системы МОСТ 300/850 (мощность излучателя – 10 Вт, чувствительность приемника – 0,001 мкВт) расходимость составляет 1 мрад. Поэтому правую часть необходимо умножить на коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности за счет расширения светового пятна.

Обсуждение результатов

Открытая оптическая трасса длиной более 1 км в условиях плохой метеорологической погоды, может вносить существенные искажения в передаваемые сигналы: уширение импульсов, дефлекция луча, низкочастотная модуляция интенсивности. Схема расположения корпусов СибГУТИ, расположенных в условиях прямой видимости, приведена на рис. 1. Приняв пределы интегрирования $r_{min} = 0,005$ мм, $r_{max} = 2,5$ мм рассчитаем значения предельной интенсивности дождя R (мм/час), обуславливающие ослабление сигнала ($\lambda = 0,85$ мкм) не более чем в $2\ 10^{-6}$ раз (с $P_0 = 0,2$ Вт до $P_{пор} = 0,1$ мкВт). Поэтому условие работоспособности ООЛС, имеющейся у СибГУТИ, от величины R может быть выражено условием:

$$\exp\left[-\left(1 + 7300 \cdot 2\pi R^{0,056}\left\{\exp\left(-\frac{8,6}{R^{0,21}} r\right)\left[\frac{r^2 R^{0,21}}{8,6} + \frac{2r R^{0,42}}{8,6^2} + \frac{2R^{0,63}}{8,6^3}\right]\right\}\Bigg|_{r_{min}}^{r_{max}}\right) \cdot l\right] \geq 2\ 10^{-6} \quad (18)$$

Для сферических частиц, значительно превышающих длину волны излучения, ослабление последнего пропорционально количеству частиц, в объеме, опирающейся на выходную апертуру передатчика и входную апертуру приемника.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:13 Page 8

Рис. 1. Схема расположения корпусов СибГУТИ

Расчетные данные показывают, что количество частиц пропорционально интенсивности дождя в узком диапазоне изменения интенсивности. Линейный характер изменения количества ослабляющих лазерное излучение частиц наблюдается для ливня (рис. 2).

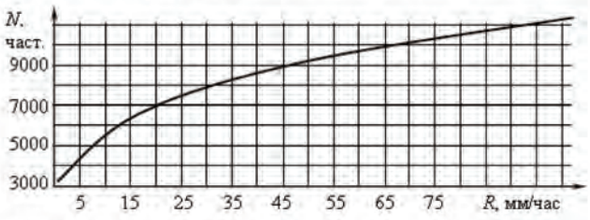


Рис. 2. Зависимость числа капель дождя в лазерном луче (при расстоянии передатчик – приемник 400 м) от интенсивности дождя

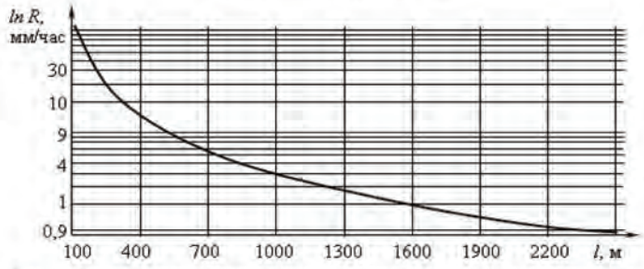


Рис. 3. Зависимость интенсивности дождя (мм/час), вызывающей ослабление в 10^6 раз, от длины атмосферной трассы

Результаты расчетной оценки работоспособности ООЛС, используемой в СибГУТИ, приведены на рис. 3 в виде графика зависимость интенсивности дождя R (мм/час), вызывающей ослабление в 60 дБ (в 10^6 раз) от расстояния между передатчиком и приемником l. При комбинации величин R и l, попадающей под расчетной кривой, имеющаяся ООЛС работоспособна. Область графика выше расчетной кривой связывает величины R и l, при которых ООЛС не работоспособна – срыв связи.

Из рисунка 3 видно, что при слабом дожде ($R < 5$ мм/час) устойчивая связь по ООЛС наблюдается при расстояниях передатчик – приемник, не превышающей 700 м. Это расстояние превышает максимально возможное расстояние между любыми двумя корпусами СибГУТИ. При умеренном дожде ($R < 20$ мм/час) максимальное расстояние устойчивой связи не превышает 250 м. Сопоставив полученные результаты с рис. 1 видно, что при умеренном дожде сохраняется работоспособность ООЛС лишь между некоторыми корпусами. Сильный дождь приводит к срыву связи между любыми двумя корпусами.

Известно [8], что в России надежность связи ООЛС из-за погодных условий может приводить к потере связи 1-2 раза в осенне-весенний период не более чем на 1-2 часа в течение одних суток. В течение года это время суммарно составляет менее 24 часа. Расчетный график, приведенный на рис. 3, хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [8]. Работа ООЛС между корпусами, расположенными на максимальном расстоянии 640 м, возможна лишь при интенсивности дождя менее 6 мм/час.

Выводы и заключение

Получено расчетное выражение для определения ослабления оптического излучения ООЛС для различных значений интенсивности дождя. Определены интенсивности дождя, приводящие к срыву связи через ООЛС между разными зданиями СибГУТИ. Установлено, что устойчивая связь по ООЛС между корпусами, расположенными на максимальном расстоянии 640 м, возможна при интенсивности дождя менее 6 мм/час.

Литература

1. *Бобков А.В.* Основные достоинства использования атмосферных оптических линий связи / Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарёва, в 3 ч., Саранск, 2016. С. 265-269.

2. *Мышкин В.Ф., Борисов В.А.* Регистрация потока лазерного излучения, рассеянного на аэрозолях, в направлении зондирующего луча // Актуальные вопросы науки. 2014. № 13. С. 37-39.

3. *Orazymbetova A.K., Khan V.A., Aitmagambetov A.Z., Dostiyarova A.M., Lipskaya M.A., Aralbaev Zh.N.* Dependence of the Increase in the Pulse Duration on the Change of the Angle of Optical Radiation Input Into the Optical Fiber at Different Temperatures // Russian Physics Journal. Vol. 58, No. 3, July, 2015, pp. 293-296.

4. *Bakhtiyarova E.A., Kemel'bekov B.Zh., Bekmagambetova Zh.M., Lipskaya M.A., Chigambaev T.O., Orazymbetova A.K., Ospanova N.A., Mekebaeva A.K., Khan V.A., Mamilov B.E.* Quality of speech reproduction using stochastic digital systems of information transfer with its statistical compaction. Russian Physics Journal. Vol. 60, No. 1. May, 2017 (Russian Original No. 1, January, 2017), pp. 190-195.

5. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.

6. *Кондратьев К.Я., Марчук Г.И., Бузников А.А., Минин И.Н., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Орлов В.М., Смоктий О.И.* Поле излучения сферической атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. 215 с.

7. *Малышенко Ю.И., Роенко А.Н.* Функция распределения дождевых капель по размерам для миллиметрового и терагерцового диапазонов радиоволн // Системи обробки інформації, № 75 (1), 2008. С. 76-84.

8. *Зеленюк Ю.И., Огнев И.В., Поляков С.Ю., Широбакин С.Е.* Влияние погодных условий на надежность атмосферной оптической связи // Вестник связи. №4. 2002. С. 136-138.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:13 Page 9

THE CALCULATION OF THE INTENSITY OF RAIN CAUSING DIGITAL COMMUNICATION FAILURE THROUGH THE ATMOSPHERIC CHANNEL

Evgeniya S. Abramova, *Siberian state University of telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia,* ***evgenka_252@mail.ru***

Vyacheslav F. Myshkin, *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia,* ***gos100@tpu.ru***

Valery A. Khan, *National Research Tomsk Polytechnic University, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia,* ***nt.centre@mail.ru***

Abstract

At present, interest in open optical communication lines (OOLS) is resuming in Russia in connection with connection to world information communications. OOLS successfully competes with fiber-optic communication lines (FOCL) in terms of time and cost for establishing communications. A significant drawback of OOLS is the dependence of the quality of information transmission on weather conditions on the highway. The performance of an open communication channel is determined by the distribution environment. If the propagation medium is different from free space (outer space), the structure of the electromagnetic wave is distorted. These distortions are determined by the interaction of the wave with medium inhomogeneities. When propagating in the atmosphere, amplitude and spatial distortions of the structure of the OALS laser beam transmitting information occur. Amplitude effects manifest as temporary changes in the field, leading to a decrease in power, fluctuations in power, and frequency filtering of radiation and limit the communication range. Spatial effects appear as a change in the direction of propagation and distortion of the beam in the direction transverse to the wave front. The latter leads to a limitation of the speed of information transfer. The propagation of optical radiation in the atmosphere is accompanied by a wide range of phenomena. At the same time, none of these phenomena is manifested separately. By qualitative characteristics, these phenomena can be divided into the following main groups: refraction of rays, energy absorption by atmospheric gases and aerosols, energy dissipation by aerosol particles and fluctuations in air density, fluctuations of optical radiation parameters caused by atmospheric turbulence. The article provides a formula for calculating and the results of estimating the maximum rain intensity, made on the example of a communication line between different buildings of SIBSUTIS, leading to a communication failure.

Keywords: *communication line, atmospheric channel, rain intensity, attenuation of radiation, size of raindrops.*

References

1. Bobkov A.V. (2016). The main advantages of using atmospheric optical communication lines. *Materials of the XXth scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students of the National Research Mordovian State University N.P. Ogaryova*. Saransk, 2016, pp. 265-269.
2. Myshkin V.F., Borisov V.A. (2014). Registration of the stream of laser radiation, scattered on aerosols, in the direction of a probing beam. *Actual problems of science*. No. 13, pp. 37-39.
3. Orazymbetova A.K., Khan V.A., Aitmagambetov A.Z., Dostiyarova A.M., Lipskaya M.A., Aralbaev Zh. N. (2015). Dependence of the Increase in the Pulse Duration on the Change of the Angle of Optical Radiation Input Into the Optical Fiber at Different Temperatures. *Russian Physics Journal*. Vol. 58, No. 3, July, pp. 293-296.
4. Bakhtiyarova E.A., Kemel'bekov B.Zh., Bekmagambetova Zh.M., Lipskaya M.A., Chigambaev T.O., Orazymbetova A.K., Ospanova N.A., Mekebaeva A.K., Khan V.A., Mamilov B.E. (2017). Quality of speech reproduction using stochastic digital systems of information transfer with its statistical compaction. *Russian Physics Journal*. Vol. 60. No. 1, May, 2017 (Russian Original No. 1, January, 2017), pp. 190-195.
5. Zuev V.E. (1981). *Propagation of laser radiation in the atmosphere*. Moscow: Radio and Communication. 288 p.
6. Kondratyev K.Ya., Marchuk G.I., Bouznika A.A., Minin, I.N., Mikhailov G.A., Nazaraliev M.A., Orlov V.M., Smokty O.I. (1977). *The radiation field of a spherical atmosphere*. L.: Publishing House of Leningrad State University. 215 p.
7. Malyshenko Yu.I., Roenko A.N. (2008). Function of distributing of raindrops on sizes for millimetric and terahertz of ranges of radio waves. *Information processing systems*. No. 75(1), pp. 76-84.
8. Zelenyuk Y.I., Ognev I.V., Polyakov S.Yu., Shirobakin S.E. (2002). Influence of weather conditions on the reliability of atmospheric optical communication. *Vestnik Svyazi*, No. 4, 2002, pp. 136-138.

Information about authors:

Evgeniya S. Abramova, *associate Professor of Department of radio engineering devices, Ph. D., Siberian state University of telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia*

Vyacheslav F. Myshkin, *Professor, Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Valery A. Khan, *Senior researcher optical location laboratory, Professor, Ph. D., National Research Tomsk Polytechnic University, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:13 Page 10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГНСС ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10275

Платонов Сергей Александрович,
ООО "СТ Технолоджи", Москва Россия, s_platonov@st-hld.ru

Платонов Андрей Викторович,
ООО "СТ Технолоджи", Москва Россия, platonov@st-hld.ru

Постников Михаил Евгеньевич,
ООО "СТ Технолоджи", Москва Россия, postnikov@st-hld.ru

Смятских Алексей Анатольевич,
ООО "СТ Технолоджи", Москва Россия, alex@st-hld.ru

Хадонова Светлана Викторовна,
ООО "СТ Технолоджи", Москва Россия, sv@st-hld.ru

Ключевые слова: *мониторинг транспорта, мониторинг сотрудников, телематика, ГЛОНАСС, INDOOR, навигационный фонарь, стили вождения.*

В настоящее время перечень сфер использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) весьма широк: персональная навигация, M2M, навигация движущихся объектов, различные высокоточные задачи. Наряду с этими, ставшими "классическими" отраслями использования, возникают новые нестандартные сферы применения ГНСС. Но также сейчас возникают новые области применения ГНСС. Это связано с так называемой "цифровизацией" экономики, производства и вообще всех областей нашей жизни. Результаты ГНСС-позиционирования находят своё применение в автоматизации производства, выполнения работ и оказания услуг, учёте выполненных работ и оказанных услуг. ГНСС-позиционирование проникает в различные информационные системы (управления персоналом, предприятием, бухгалтерского учёта). Возникают задачи бесшовной навигации и, как следствие, использования комбинированных методов позиционирования. Сейчас во многих отраслях происходит так называемая "цифровизация экономики", что на практике означает автоматизацию многих производственных и технологических процессов. Их сложность диктует необходимость применения комплексного решения: интеграции ГНСС-позиционирования в смежные технологии. В результате появляется возможность получения точных данных о местоположении и состоянии объектов производственных и технологических процессов.

В данной статье рассматривается несколько новых применений технологий ГНСС:

- **Система мониторинга сотрудников в режиме "Outdoor & Indoor";**
- **Система мониторинга автомобилей на территории станции техобслуживания;**
- **Система мониторинга исполнителей на территории аэропорта;**
- **Мониторинг плавучих знаков;**
- **Оценка стилей вождения.**

Информация об авторах:

Платонов Сергей Александрович, *Начальник отдела информационно-аналитической поддержки продаж, ООО "СТ Технолоджи", Москва, Россия*

Платонов Андрей Викторович, *Первый заместитель генерального директора, ООО "СТ Технолоджи", Москва, Россия*

Постников Михаил Евгеньевич, *Технический директор, ООО "СТ Технолоджи", Москва, Россия*

Смятских Алексей Анатольевич, *Генеральный директор, ООО "СТ Технолоджи", Москва, Россия*

Хадонова Светлана Викторовна, *Директор по маркетингу, ООО "СТ Технолоджи", Москва, Россия*

Для цитирования:
Платонов С.А., Платонов А.В., Постников М.Е., Смятских А.А., Хадонова С.В. Использование ГНСС для решения комплексных прикладных задач // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 10-18.

For citation:
Platonov S.A., Platonov A.V., Postnikov M.E., Smyatskikh A.A., Khadonova S.V. (2019). Using global navigation satellite systems to solve complex application problems. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 10-18. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:14 Page 11

Введение

В настоящее время сформировался ряд «традиционных» областей применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС):

– сервисы на мобильных устройствах для широкого круга потребителей – автомобильные и пешеходные навигаторы, фитнес-трекеры, такси и т.п.;

– персональная навигация (смартфоны или специализированные трекеры);

– транспортная телематика (M2M) – мониторинг транспортных средств (контроль перемещений, контроль топлива, мониторинг различной телеметрии);

– навигационное обеспечение различных движущихся объектов (наземный транспорт, воздушные и водные суда);

– задачи, требующие высокоточного позиционирования (геодезия, картография, мониторинг сооружений, координатное земледелие и т.п.);

– системы экстренного реагирования при авариях (ГАИС «ЭРА-ГЛОНАСС», eCall, ЭВАК);

– военные задачи и другие.

При решении задач транспортной телематики возникают задачи контроля новых типов объектов, а также мониторинга и контроля расширенного набора параметров объекта (что особенно актуально для спецтехники).

1. Система мониторинга сотрудников в режиме «Outdoor & Indoor»

Если рынок спутниковых навигационных технологий начинался и долгое время был сосредоточен исключительно на мониторинге транспорта, то сейчас большое внимание уделяется мониторингу персонала, причём здесь важно контролировать перемещения сотрудников не только на открытом пространстве, но и внутри зданий с рабочими помещениями.

Области применения мониторинга персонала – это: режимные объекты, предприятия с огромной территорией и даже отдельные магазины. В частности, система мониторинга персонала актуальна для мониторинга перемещений сотрудников электроподстанций.

Цели внедрения на предприятии системы бесшовного позиционирования и мониторинга перемещений сотрудников следующие:

– эффективное централизованное управление персоналом;

– минимизация издержек;

– максимизация прибыли;

– оптимизация рабочих процессов;

– повышение эффективности работы;

– обеспечение соблюдения правил, норм и стандартов безопасности при выполнении работ;

– обеспечение безопасности персонала;

– экономия рабочего времени (сокращение времени на выполнение служебных заданий на 15-30%).

Система мониторинга персонала решает задачи:

– геопозиционирование сотрудника на улице и внутри помещений;

– непрерывный автоматизированный онлайн мониторинг и контроль местоположения мобильных сотрудников;

– назначение и контроль выполнения производственных заданий;

– контроль присутствия сотрудника на рабочем месте, прибытия в заданное помещение, входа в запретную зону;

– предотвращение и разбор инцидентов;

– подача сотрудником сигнала тревоги с носимого персонального устройства (смартфон, персональный трекер или видеорегистратор) в диспетчерский центр во время внештатных ситуаций;

– удаленное прослушивание окружающей обстановки при поступлении сигнала тревоги в диспетчерский центр;

– оперативная фото- и видеосъёмка события с последующим сохранением в памяти носимого устройства;

– отправка фото и видео на телематический сервер системы;

– обмен текстовыми сообщениями между сотрудниками и диспетчерами (заранее заданными и произвольными);

– формирование информационно-аналитической отчётности для руководства и служб безопасности.

На рисунке 1 представлена архитектура системы мониторинга сотрудников в режиме «Outdoor & Indoor».

Рис. 1. Архитектура системы мониторинга сотрудников в режиме «Outdoor & Indoor»

Для позиционирования используется смартфон с операционной системой (ОС) Android, на котором в фоновом режиме непрерывно работает мобильное приложение, которое:

– определяет местоположение в режиме «Outdoor» – принимает координаты от навигационного приемника, встроенного в смартфон;

– определяет местоположение в режим «Indoor» – позиционирование выполняется с использованием технологии Bluetooth: помещение оборудуется метками, излучающими сигнал Bluetooth, а Bluetooth-модуль смартфона принимает эти сигналы и измеряет их уровень, а в мобильном приложении выполняется обработка этих данных для позиционирования смартфона;

– имеет функционал обработки производственных заданий, поступающих из системы мониторинга и управления или из внешней ERP-системы.

Система мониторинга «Outdoor & Indoor» позволяет следить за перемещениями сотрудника и на улице (как пешком, так и на машине), и в оборудованном помещении – см. рис. 2.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:15 Page 12

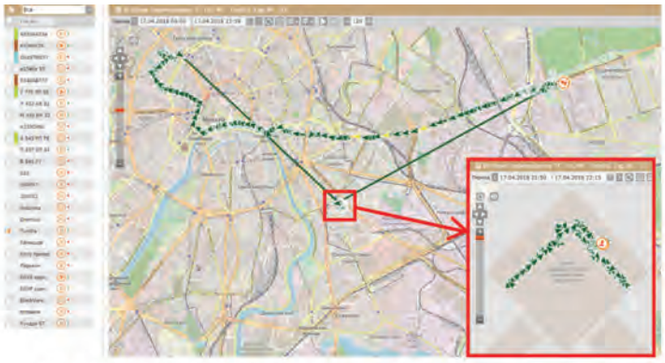


Рис. 2. Перемещения сотрудника «Outdoor & Indoor»

На рисунке 2 видны скачки местоположения, связанные с тем, что в эти моменты сотрудники перемещался на метро. Потенциально, при условии оснащения подземной территории метро Bluetooth-метками, есть возможность 100% слежения за сотрудником.

В системе мониторинга можно детально отслеживать перемещения сотрудника пешком – см. рис. 3.

Рис. 3. Перемещения сотрудника в пешем режиме

В системе можно отследить как сотрудник выходит из метро, заходит в здание и перемещается внутри – см. рис. 4. Также можно увидеть достаточно подробную траекторию его перемещения в офисе – см. рис. 5.

Рис. 4. Перемещения сотрудника «Outdoor» и «Indoor»

Рис. 5. Подробная траектория перемещения сотрудника в помещении

На рисунках 2-5 приведены результаты реального эксперимента по мониторингу сотрудника в режиме «Outdoor & Indoor». В эксперименте использовался недорогой пылевлагозащищённый смартфон с долгоживущим аккумулятором, для которого было разработано мобильное приложение для позиционирования «Outdoor&Indoor». Bluetooth-метки были расположены на этаже: через каждые 5-6 метров в коридоре и по одной метке в каждой комнате.

2. Мониторинг перемещения автомобилей в режиме «Indoor»

Существует достаточно перспективный вариант использования системы мониторинга внутри помещений – это мониторинг перемещения автомобилей на территории станции технического обслуживания (ТО).

Для относительно больших станций ТО существует ряд проблем, связанных с отсутствием информации о местоположении и перемещении клиентского автомобиля на территории станции ТО.

Отсутствие оперативной информации о текущем месте расположения автомобиля клиента на парковке и в пределах ремонтной зоны приводит к следующим проблемам:

- увеличение сроков поиска автомобиля на парковке специалистами станции ТО и клиентами;
- увеличение сроков ремонта за счет неоптимального планирования перемещения машин между ремонтными зонами;
- сложность получения достоверной оперативной информации о статусе обслуживания автомобиля;
- снижение общей производительности труда;
- рост времени ремонта автомобилей;
- снижение качества обслуживания клиентов.

Отсутствие инструмента планирования и анализа перемещения автомашин между зонами станции ТО приводит к следующим проблемам:

- невозможность оперативного контроля и анализа времени выполнения технологических операций;
- невозможность определения «узких мест» в технологических цепочках обслуживания автомобилей;

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:15 Page 13

– отсутствие объективной информации об истории перемещения автомобилей при рассмотрении претензий клиентов;

– сложность определения «узких мест» в технологических цепочках обслуживания автомобилей и их оптимизации.

Решением перечисленных задач становится создание и внедрение системы мониторинга перемещения автомобилей на территории станции ТО.

Принцип решения данной задачи – такой же, как для мониторинга персонала – это позиционирование внутри оборудованных помещений с использованием технологии Bluetooth, только в машину кладётся не смартфон, а небольшой терминал мониторинга с модемом GSM, ГНСС-приемником и модулем Bluetooth. Математическая обработка выполняется в прошивке на процессоре данного терминала. Терминал кладётся в машину после того, как она въехала на территорию станции ТО.

В результате появляется возможность создать систему мониторинга, в которой можно видеть – где находится каждая машина, въехавшая на территорию станции ТО, сколько времени она находится в определенной зоне. А если ещё и у сотрудников есть смартфоны с функцией позиционирования «Outdoor & Indoor», то в системе можно он-лайн наблюдать – кто и какие работы выполняет с машиной. На рисунке 6 приведен интерфейс подобной системы.

Рис. 6. Система мониторинга автомобилей на станции ТО

Система мониторинга перемещения автомобилей на станции ТО обладает широким функционалом:

– Отслеживание перемещения автомобилей, персонала и техники в режиме реального времени;

– Поиск автомобилей по государственному регистрационному номеру с отображением на карте здания;

– Отображение объектов по заранее созданным группам;

– Разметка здания для отслеживания движения внутри/вне каждой зоны и уведомлений о их посещениях;

– Автоматические уведомления о событиях, связанных с перемещениями (с возможностью настройки событий);

– Настройка уведомлений о событиях на территории станции ТО, связанных с перемещениями:

1) пересечение границы зоны;
2) длительное нахождение/отсутствие в заданной зоне;
3) отклонение от технологической скорости;

– Оповещения в режиме реального времени на e-mail и по SMS;

– Отчеты о перемещениях автомобилей по участкам станции ТО;

– Выгрузка данных о перемещениях автомобилей в сторонние информационные системы, эксплуатируемые на стации ТО.

3. Система мониторинга исполнителей для аэропорта

Крупное и актуальное в настоящее время применение результатов ГНСС-позиционирования – это создание систем мониторинга и управления, внедряемых на крупных предприятиях и интегрируемых с другими информационными системами.

Пример подобной системы мониторинга и управления – система мониторинга исполнителей (СМИ) для аэропорта.

СМИ – это система мониторинга аэродромной техники и персонала, позволяющая контролировать выполнение задач обслуживания воздушных судов, а именно:

– своевременность выполнения задач и их этапов: назначение заданий, контроль их выполнения, мониторинг стадий, статусов и времени исполнения заданий;

– контроль всех составных частей хода выполнения задачи: контроль готовности техники к обслуживанию самолётов (например, наполненность цистерн топливозаправщика) и мониторинг самого обслуживания (т.е., контроль работы конкретного оборудования – щётки снегоочистителя, проблескового маяка, подъем трапа и т.д.);

– обеспечение безопасности (невыезд авто на взлётно-посадочные полосы, открытие дверей автобуса только у терминала и самолёта, соблюдение скоростного режима).

На рисунке 7 представлена архитектура системы мониторинга исполнителей в аэропорту – из неё видно, почему идёт речь про внедрение ГНСС-позиционирования в сложные информационные системы.

Рис. 7. Архитектура СМИ

Исходные данные по геопозиционированию поступают от 3х типов контролируемых объектов – персонал, транспортные средства (ТС) и самолёты.

Используются разные методы позиционирования:

– ТС – только ГНСС;

– персонал – ГНСС и режим «Indoor» с использованием Bluetooth;

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:16 Page 14

– самолёты – данные поступают из радиосистемы триангуляции, развёрнутой на территории аэропорта.

Также в СМИ поступают данные от системы RMS (Resource Management System), развернутой в аэропорту, и от системы формирования и контроля расписаний воздушного трафика (AODB – Airport Operational Data Base).

В результате появляется возможность создания системы, формирующей единое информационно-навигационное поле в зоне аэропорта. Она позволяет контролировать перемещения, назначать задания, контролировать статусы транспортных средств и персонала (см. рис. 8).

Рис. 8. Интерфейс СМИ (управление ТС)

Также СМИ позволяет контролировать этапы обслуживания воздушных судов (ВС) (см. рис. 9).

Рис. 9. Интерфейс СМИ (контроль облуживания ВС)

Для решения задач мониторинга работы каждого навесного оборудования, установленного на ТС, машины приходится оснащать большим количеством датчиков, зачастую нестандартных. В «традиционной» транспортной телематике ставится терминал для геопозиционирования и датчик уровня топлива для контроля топлива в баке машины.

На аэродромную технику приходится ставить самые разнообразные датчики для контроля работы отдельных механизмов (см. рис. 10), причём аэродромная техника – это зачастую специализированная техника именно для аэропорта, не имеющая аналогов.

Рис. 10. Пример оснащения аэродромной техники

Для аэродромной спецтехники должны контролироваться «стандартные» для транспортной телематики параметры:

- местоположение, скорость и направление движения ТС;
- работа основного двигателя ТС;
- остаток топлива в баке (баках) ТС;
- пробег ТС;
- моточасы наработки основного двигателя ТС;
- положение стояночного тормоза;
- работа проблескового маяка.

Кроме того, требуется контроль ряда специфических параметров:

- работа главного насоса;
- работа дополнительного двигателя (агрегата, навесного оборудования);
- уровень жидкости в цистерне;
- положение аутригеров;
- работа щёток/шнека (или любого другого навесного оборудования);
- положение трапа/отвала/лифта (или любого другого навесного оборудования);
- температура в салоне ТС;
- открытие дверей ТС;
- выход газа/жидкости/реагента;
- факт работы двигателя печки и проч.

4. Мониторинг плавучих знаков

Новое применение навигационных технологий – это мониторинг плавучих знаков.

Плавучие знаки – это буи, на которых установлены фонари, которые служат ориентиром для судов на реках, озерах и в морях.

С плавучими знаками возникают следующие проблемы:

- воровство;
- разряд батареи (фонарь перестает работать);
- критический наклон (изменяется диаграмма освещённости фонаря);
- нарушение режима работы проблескатора фонаря;
- снос буев (течением, волной, после удара судном);
- сложность техобслуживания – нужно посылать судно к каждому бую.

Самая главная проблема состоит в том, что сейчас для того, чтобы узнать состояние буя с фонарем, к каждому бую

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:17 Page 15

посылают судно с экипажем, а это – огромные денежные затраты.

Решение перечисленных проблем – это установка на буи цифровых навигационных фонарей с навигационным и телеметрическим контролем, и создание системы мониторинга плавучих знаков.

Цифровой навигационный фонарь (см. рис. 11) – это светосигнальное оборудование со встроенной платой для навигационного и телеметрического мониторинга, которая обеспечивает:

– непрерывное позиционирование плавучего знака по сигналам ГНСС;
– контроль сноса плавучего знака от заданной позиции;
– мониторинг ударов по плавучему знаку;
– контроль напряжения батареи плавучего знака;
– измерение и контроль углов наклона плавучего знака;
– контроль и управление режимами работы проблескатора;
– передача телематических данных на сервер диспетчерского центра в режиме реального времени;
– внеочередная передача данных при возникновении аварийного события.

Для передачи данных помимо канала GSM могут использоваться каналы спутниковой связи (IRIDIUM) или каналы связи LPWAN.

Рис. 11. Цифровой навигационный фонарь

На рисунке 12 приведен пример интерфейсных окон самой системы мониторинга плавучих знаков: система позволяет видеть местоположение каждого знака, просматривать детальную информацию по всем его контролируемым параметрам, видеть тревожные события и отрабатывать их.

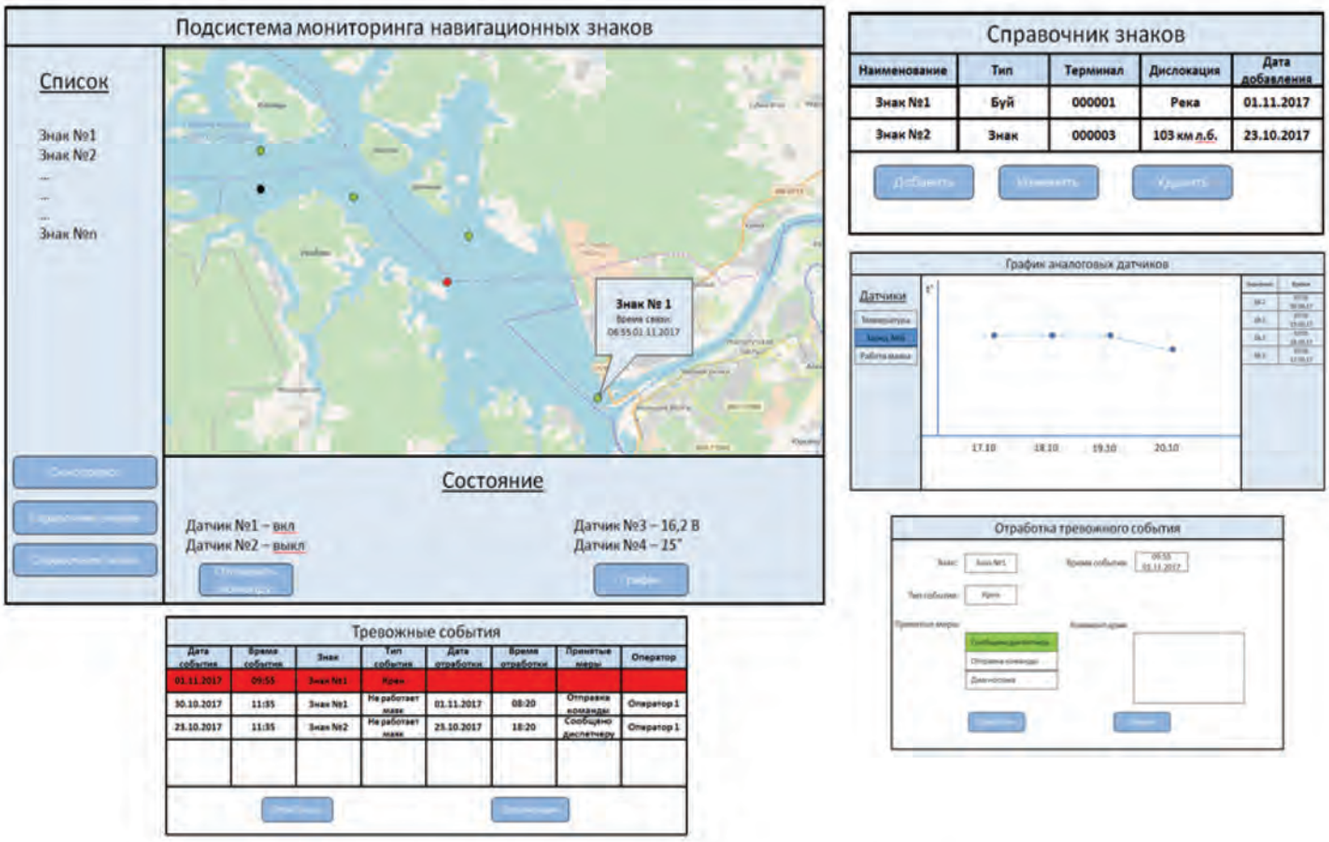


Рис. 12. Интерфейсы системы мониторинга плавучих знаков

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:18 Page 16

5. Оценка стилей вождения

Ещё один пример относительно нового применения ГНСС-технологий – это оценка стилей вождения.

Возможность оценивать поведение водителей на дороге за рулем транспортного средства обеспечивает:

- повышение сохранности эксплуатируемых ТС;
- снижение стоимости владения ТС;
- повышение безопасности – для водителя, для ТС и для всех участников дорожного движения;
- высокую степень сохранности доставляемых грузов;
- контроль за водителем со стороны руководства;
- передачу телеметрических данных в мониторинговый центр;
- оценку множества критериев, определяющих качество вождения;
- выявление критичных событий (нарушений) в процессе движения ТС;
- фиксацию ДТП;
- формирование статистических данных (оценка водителя, нарушения, ДТП) по каждой поездке и за длительный период.

Система оценки стиля вождения позволяет выявлять факты опасного вождения он-лайн, а также оценивать поведение водителей на длительном интервале.

Технология оценки стилей вождения следующая:

- в машину устанавливается бортовое оборудование ГНСС/GSM со встроенным акселерометром,
- фиксируются все данные по движению машины и передаются в мониторинговый центр,
- в режиме реального времени выявляются критичные события,
- в режиме постобработки вычисляются оценки стилей вождения с использованием скоринговых моделей.

Скоринговая модель – это математическая модель для численной оценки стиля вождения, учитывающая ряд параметров:

- ускорения, измеренные акселерометром, встроенным в бортовое оборудование (для выявления резких торможений, ускорений, перестроений и ДТП);
- пробег;
- учет трафика;
- учет аварийности дорог;
- движение на повышенных оборотах;
- контроль соблюдения скоростного режима;
- учет погодных условий (осадки, видимость, ветер);
- учет качества дорог (тип дороги, качество покрытия);
- учет нарушений ПДД (графы дорог и/или интеграция с ГИБДД).

В результате обработки полученных телематических данных в рамках скоринговой модели вычисляются оценки для водителей.

На рисунке 13 приведён пример реализации оценки стилей вождения, позволяющий руководителю или владельцу автопарка посмотреть статистику по всему персоналу (худший, средний и лучший результаты), а также по каждому водителю, в том числе – детально по каждому контролируемому параметру.

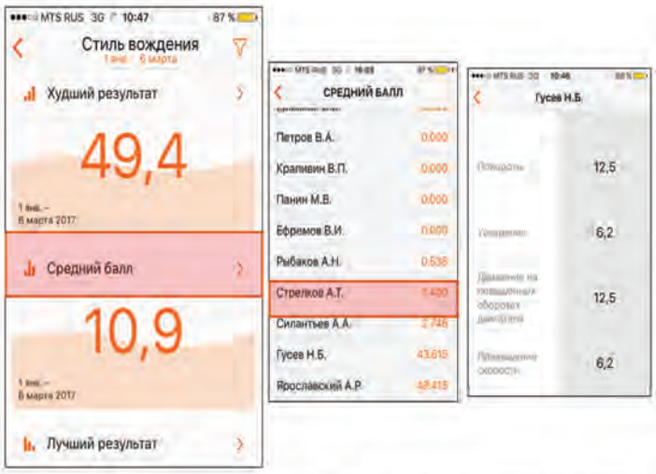


Рис. 13. Оценка стилей вождения, приложение руководителя

На рисунке 13 приведён пример оценки стилей вождения, в рамках которой реализована скоринговая модель, в которой за нарушения начисляются штрафные баллы, то есть 0 баллов – это лучший стиль вождения, а чем больше баллов – тем хуже.

На рисунке 14 приведён пример детального отчёта оценки стиля вождения по отдельному водителю, полученной на временном интервале в 1 месяц. Здесь реализована иная скоринговая модель: здесь 100% – это идеальное вождение, и чем ниже процент, тем хуже. Собственно, здесь, помимо, графика изменения оценки стиля вождения, можно просмотреть подробную аналитику по всем оцениваемым параметрам, включая движение в пробках, на плохих дорогах, при плохой погоде и так далее.

4. Заключение

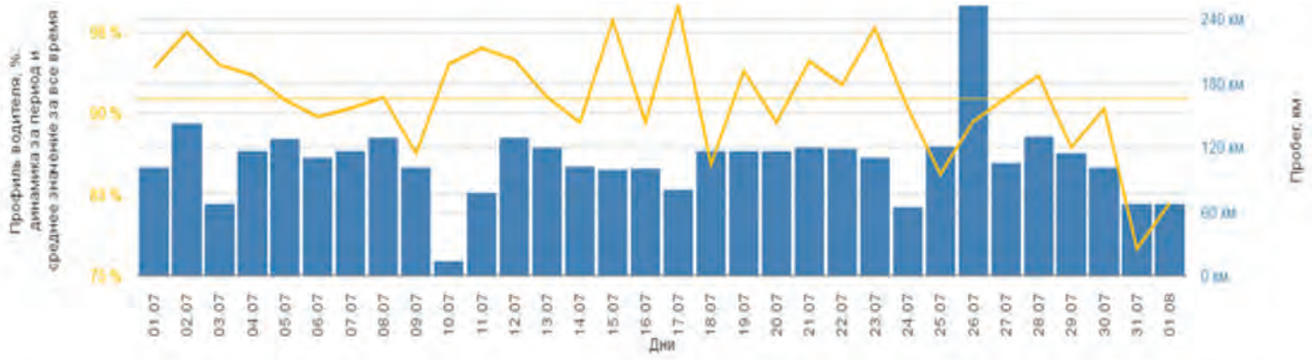
В данной статье было рассмотрено лишь несколько примеров новых применений ГНСС для решения различных прикладных задач, каждый из которых заслуживает отдельного подробного рассмотрения.

Основные тренды использования ГНСС-технологий на сегодняшнем рынке навигационных услуг, это:

- тесная интеграция с другими методами позиционирования;
- внедрение результатов ГНСС-позиционирования в системы ERP (в частности для учёта выполненных работ и оказанных услуг);
- внедрение ГНСС-технологий в процессы управления персоналом и техникой;

мониторинг новых типов объектов и контроль большего числа параметров.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:18 Page 17



Наименование критерия				Значение
Скоринг				
	>85	70-85	<70	91.43
Сколько ездит				
Пробег за период	до 640 км	от 641 до 1333 км	более 1333 км	3482.1
Средний пробег за месяц				3264.47
Прогноз пробега за год				39717.7
Пробег без устройства				0
Средняя продолжительность поездки	до 30 минут	от 30 минут до 1,5 часа	более 1,5 часов	8.74
Поездок в сутки	до 3 поездок	от 3 до 5 поездок	свыше 5 поездок	35
Пробег по дням недели: км в сутки				
Будние дни	от 0 до 20 км	от 21 до 50 км	свыше 50 км	119.09
Выходные	от 0 до 150 км	от 151 до 300 км	свыше 300 км	86.22
Время эксплуатации ТС	до 50 часов	от 50 до 120 часов	свыше 120 часов	166.38
Движение менее 20 км/ч от общего времени эксплуатации ТС	до 20%	от 20% до 40%	свыше 40%	65.2
Когда ездит				
Пробег в часы пик Утро (%), 08:00-11:00 в будни	<25%	25%-50%	>50%	6.51
Пробег в часы пик Вечер (%) 17:00-21:00 в будни	<25%	25%-50%	>50%	0.57
Пробег в ночные часы (%) *23:00-6:00	<4%	4%-12%	>12%	55.09
Пробег в ночные часы пятница / суббота (%) *23:00-6:00	<4%	4%-12%	>12%	15.72
Пробег в часы пик (%) - Дачный сезон *17:00-23:00 (пятница), 06:00-14:00 (субботы), с 8:00-23:00 (воскресенье)	<25%	25%-50%	>50%	6.99
Пробег при плохих погодных условиях				
Доля пробега на плохом покрытии	<30%	30%-60%	>60%	19.97
Доля пробега на очень плохом покрытии	<20%	10%-40%	>40%	0

Рис. 14. Детальный отчет по оценке стилей вождения

Литература

1. *Платонов С.А.* Использование ГНСС для решения комплексных прикладных задач // Сборник тезисов XXIII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 2018. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). С. 43-45.

2. *Макеев А.А.* Система GPS (ГЛОНАСС) мониторинга сотрудников станций технического обслуживания автомобилей // Наука, техника и образование. № 3 (33), 2017. С. 65-67.

3. *Лобанова Ю.И.* Стиль вождения: определяющие факторы, характеристики, направления оптимизации // Российский гуманитарный журнал. Т. 4. № 1. 2015. С. 76-84.

4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е, перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с.

5. *Соловьев Ю.А.* Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 326 с.

6. https://iot.ru/monitoring/geoservisy-ot-megafona-trendy-monitoringa, дата обращения – 04.02.2019 г.

7. https://iot.ru/riteyl/eto-modnoe-slovo-indoor, дата обращения – 31.01.2019 г.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:19 Page 18

USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS TO SOLVE COMPLEX APPLICATION PROBLEMS

Sergey A. Platonov, *LLC "ST Technology", Moscow, Russia,* ***s_platonov@st-hld.ru***
Andrey V. Platonov, *LLC "ST Technology", Moscow, Russia,* ***platonov@st-hld.ru***
Michail E. Postnikov, *LLC "ST Technology", Moscow, Russia,* ***postnikov@st-hld.ru***
Alexey A. Smyatskikh, *LLC "ST Technology", Moscow, Russia,* ***alex@st-hld.ru***
Svetlana V. Khadonova, *LLC "ST Technology", Moscow, Russia,* ***sv@st-hld.ru***

Abstract
Currently, the list of areas of use of global navigation satellite systems (GNSS) is very wide: personal navigation, M2M, navigation of moving objects, various high-precision tasks. Along with these, which have become “classic” branches of use, new non-standard areas of GNSS application are emerging. But new areas of GNSS are also emerging. This is due to the so-called "digitalization" of the economy, production and in general all areas of our life. The GNSS positioning results are used in automation of production, performance of works and provision of services, accounting of work performed and services rendered. GNSS positioning penetrates into various information systems (personnel management, enterprise, accounting). And, of course, there are tasks of seamless navigation and, as a result, the use of combined positioning methods. Now, in many industries, the so-called “digitalization of the economy” is taking place, which in practice means the automation of many industrial and technological processes. Their complexity dictates the need for an integrated solution: the integration of GNSS positioning into related technologies. As a result, it becomes possible to obtain accurate data on the location and state of production and technological objects.
This article discusses several new applications of GNSS technology:
– Employee monitoring system in the mode "Outdoor & Indoor";
– Car monitoring system on the territory of the maintenance station;
– Monitoring system of performers at the airport;
– Monitoring of floating signs;
– Evaluation of driving styles.

Keywords: *transport monitoring, employee monitoring, telematics, GLONASS, INDOOR, navigation light, driving styles.*

References

1. Platonov S.A. (2018). The use of GNSS for solving complex applied problems. *Collection of theses of the XXIII International Scientific Conference "System Analysis, Management and Navigation"*. Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University), pp. 43-45.
2. Makeev A.A. (2017). GPS system (GLONASS) for monitoring the staff of car service stations // *Science, equipment and education*. No. 3 (33), pp. 65-67.
3. Lobanov Y.I. (2015). Driving style: determining factors, characteristics, directions of optimization. *Russian Journal of Humanities*. Vol. 4. No. 1, pp. 76-84.
4. *GLONASS. Principles of construction and operation.* Ed. A.I. Perova, V.N. Harisova. Ed. 3rd, pererabot. Moscow: Radio engineering, 2005. 688 p.
5. Soloviev Yu.A. (2003). *Satellite navigation and its applications*. Moscow: Eco-Trendz3. 326 p.
6. https://iot.ru/monitoring/geoservisy-ot-megafona-trendy-monitoringa, appeal date 04.02.2019.
7. https://iot.ru/riteyl/eto-modnoe-slovo-indoor, appeal date 01/31/2019.

Information about authors:

Sergey A. Platonov, *ST Technology, LLC, Head of Sales Information and Analytical Support, Moscow, Russia*

Andrey V. Platonov*, ST Technology LLC, First Deputy General Director, Moscow, Russia*

Mikhail E. Postnikov, *ST Technology LLC, Technical Director, Moscow, Russia*

Alexey A. Smyatskih, *ST Technology LLC, General Director, Moscow, Russia*

Svetlana V. Hadonova, *ST Technology LLC, Marketing Director, Moscow, Russia*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:19 Page 19

ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ VPN-СЕТЯМИ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10276

Друк Евгений Владимирович,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия
conferencia_asu_vka@mail.ru

Левко Игорь Владимирович,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: *система, мультисервисная сеть связи, транспортная сеть, безопасность, управление, потоки информации, управление потоками, виртуальная частная сеть.*

Рассматриваются вопросы обеспечения безопасности информационного взаимодействия пользователей (руководства госкорпораций, должностных лиц различных звеньев управления и пр.), через недостаточно защищенные от атак (далее слабо защищенные) телекоммуникационную составляющую информационных систем специального назначения. При этом обеспечивается защита как подключенных к каналам и трактам транспортной сети мультисервисных сетей связи специального назначения средств сетей доступа средств административного управления от широкого спектра несанкционированных действий со стороны нарушителей применением межсетевых экранов (брандмауэров), которые поддерживают безопасность информационного обмена путем фильтрации потоков информации и выполнением посреднических функций при переносе информации по транспортной сети мультисервисной сети связи специального назначения, так и информации пользователей в процессе передачи ее по слабо защищенной среде с применением ряда мер (аутентификации, криптографии, проверки подлинности и целостности). Реализация многих мер базируется на объединении разных сетей доступа средств административного управления в единую виртуальную частную VPN-сеть, обеспечивающую безопасность данных в информационных системах. При этом разные группы пользователей могут пользоваться услугами одной или нескольких VPN-сетей в соответствии с принятой в мультисервисных сетях связи специального назначения политикой безопасности, а каждая VPN-сеть формируется на основе каналов слабо защищенной сети и должна эффективно управляться. Эффективность использования виртуальных каналов в их совокупности в рамках организованных VPN-сетей и их пропускные способности во многом определяются используемыми способами, алгоритмами и протоколами управления. При этом основными способами и алгоритмами управления VPN-сетями являются способы и алгоритмы управления потоками информации, реализация которых в значительной степени определяется выбранными метриками виртуальных путей. Предложенные способы управления VPN-сетями, несмотря на их простоту, достаточно эффективны и существенно снижают среднее время задержки криптопакетов.

Информация об авторах:

Друк Евгений Владимирович, *адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия*

Левко Игорь Владимирович, *к.т.н., доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия*

Для цитирования:
Друк Е.В. Основы организации и управления VPN-сетями современных информационных систем специального назначения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 19-29.

For citation:
Druk E.V., Levko I.V. (2019). Fundamentals of VPN-networks organization and management for special purposes in modern information systems. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 19-29. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:20 Page 20

Введение

Безопасность информационного взаимодействия различных пользователей в сфере экономики страны (представители руководства Государственных корпораций, должностные лица органов управления районного, областного, краевого, регионального и федерального уровней, средства информатизации и автоматизации систем управления) через относительно слабо защищенные от атак выделенные телекоммуникационные сети мультисервисных сетей связи специального назначения (МСС СН), в частности через многопротокольную транспортную сеть МСС СН, осуществляющую базовую услугу переноса информации на основе одной или нескольких широкополосных технологий: ATM, FR, IP-MPLS или MPLS over ATM, которые используются, например, в перспективной системе связи органов государственной власти США по программе Networx [1], требует эффективного решения двух задач:

– защиты подключенных к каналам и трактам транспортной сети МСС СН оборудования сетей доступа комплексов технических средств административного управления (руководства госкорпораций, органов управления районного, областного, краевого, регионального и федерального уровней, средств информатизации и автоматизации) от широкого спектра несанкционированных действий со стороны нарушителей;

– защиты информации пользователей госкорпораций и органов управления в процессе ее передачи по слабо защищенной среде МСС СН, осуществляющей транспортирование (прозрачный перенос) информации.

Решение первой задачи традиционно осуществляется за счет применения в комплексах технических средств административного управления межсетевых экранов (брандмауэров) [2], поддерживающих безопасность информационного обмена за счет фильтрации двусторонних потоков информации, а также выполнения функций санкционированного посредничества при обмене информацией по транспортной сети МСС СН.

Решение второй задачи, т.е. обеспечение защиты информации при ее передаче по слабо защищенным каналам и трактам транспортной сети МСС СН, основано на выполнении следующих функций:

– аутентификации сетевых пользователей (средств сетей доступа) транспортных услуг;

– криптографическом закрытии транспортируемой информации;

– подтверждении подлинности и целостности доставленной до сетей доступа информации и пр.

В общем приведенные меры связаны друг с другом, а их реализация базируется как на традиционной криптографической защите передаваемых данных, так и на более гибких современных решениях, связанных с объединением разных выделенных сетей доступа комплексов технических средств административного управления через слабо защищенную внешнюю среду передачи (транспортирования) информации в единую виртуальную частную или VPN-сеть, обеспечивающую безопасность циркулирующих данных (так называемая защищённая VPN-сеть).

Отдельные группы пользователей комплексов технических средств административного управления, прикрепленных к той или иной выделенной сети доступа могут пользоваться услугами одной или нескольких VPN-сетей в соответствии с разработанной и утвержденной политикой безопасности всей МСС СН. При этом каждая VPN-сеть МСС СН формируется на основе каналов слабо защищенной транспортной сети, осуществляющей транспортирование информации от одной сети доступа до другой, рис. 1.

Здесь и далее под термином «виртуальная» понимается, что виртуальные (логические) каналы каждой защищенной VPN-сети интерпретируются с помощью телекоммуникационных протоколов, каналов связи и трактов реальной транспортной сети, а сама слабо объединенная защищенная VPN-среда служит основой для одновременной организации нескольких частных VPN-сетей, количество и принадлежность которых определяется как политикой безопасности МСС СН, так и пропускной способностью каналов связи и трактов ее транспортной сети.

Потоки информации в VPN-сетях МСС СН

Потоки информации, циркулирующие в каждой защищенной VPN-сети МСС СН, характеризуются рядом параметров: интенсивностью, уровнем нестационарности, степенью неоднородности, степенью последействия и т.д. Эти параметры зависят не только от характеристик потоков в объектовых (пользовательских) сетях комплексов технических средств административного управления, но и от того как сама виртуальная сеть организована и какие используются при этом технологии. В настоящее время наиболее распространенная организация VPN-сетей осуществляется на основе наложения на транспортную сеть (технологии ATM, FR, MPLS over ATM, MPLS over SDH) сети на основе достаточно широко применяемой и популярной в настоящее время (как в локальных, так и сетях доступа) IP-технологии с протоколом IP v6 [3, 4].

Рис. 1. Обеспечение безопасности информационного взаимодействия пользователей через слабо защищенную сеть связи, осуществляющую транспортирование информации за счет организации защищенных VPN-сетей

Эффективность и безопасность каждой VPN-сети МСС СН определяется как уровнем защищённости информации, циркулирующей по слабо защищенным каналам связи и

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:20 Page 21

трактам транспортной сети, так и организацией ее продвижения по закрытым сегментам виртуальных сетей.

Политика безопасности МСС СН требует, чтобы в каждой VPN-сети обеспечивался заданный уровень безопасности в случае:

– объединения локальных сетей пользователей комплексов технических средств административного управления, объединенных группой функциональных задач;

– информационного взаимодействия специальных выделенных сетей доступа;

– реализации доступа к локальным сетям пользователей комплексов технических средств административного управления, объединенных группой функциональных задач, удалённых пользователей или комплексов средств других отраслей экономики.

Как правило, организация защиты информации при её передаче по слабо защищенным каналам и трактам транспортной сети МСС СН, осуществляющей перенос разнородного трафика (рис. 2) основана на построении защищённых виртуальных каналов связи (защищённых туннелей), каждый из которых представляет собой виртуальной соединение, проведённое через транспортную сеть, по которому передаются криптографически защищённые пакеты – пакеты VPN-сети (например, протокол IPSek в туннельном режиме) [5].

Использование встроенных возможностей стека протоколов TCP/IP позволяет достаточно просто организовать защиту от повторов, удаления и задержек пакетов в каждой VPN-сети МСС СН, передаваемых по организованным защищенным туннелям, основой организации которых, как правило, является протокол IP-sec, входящий в состав новой версии протокола IPv6. Протокол IP-sec предусматривает стандартные методы аутентификации пользователей, центров коммутации сетей доступа комплексов технических средств административного управления при инициации туннеля, стандартные способы шифрования конечными точками туннеля, формирования и проверки цифровой подписи, а также стандартные методы обмена и управления криптографическими ключами между конечными точками. Туннели IP-sec между каждыми взаимодействующими сетями доступа комплексов технических средств административного управления поддерживает множество индивидуальных виртуальных каналов передачи данных.

В соответствии с протоколом IP-sec архитектура средств безопасности информационного обмена в VPN-сетях МСС СН разделяется на три уровня.

На верхнем уровне расположены:

– протокол согласования параметров виртуального канала и управления ключами (ISAKMP);

– протокол аутентифицирующего заголовка (AH);

– протокол инкапсулирующей защиты содержимого (ESP).

Протоколы защиты виртуального канала верхнего уровня архитектуры IP-sec (AH и ESP) не зависят от конкретных криптографических алгоритмов. Могут использоваться любые методы аутентификации, типы ключей (симметричные или несимметричные), алгоритмы шифрования и распределения ключей. При этом независимость протоколов AH и ESP требует предварительного согласования набора применяемых алгоритмов и их параметров, поддерживаемых взаимодействующими сторонами.

К среднему уровню отчасти относятся алгоритмы согласования параметров и управления ключами, применяемые в протоколе ISAKMP.

Роль фундамента в архитектуре IP-sec выполняет домен интерпретации (DOI), являющийся базой данных, хранящей сведения об используемых в протоколе алгоритмах, их параметрах, протокольных идентификаторах и т.д.

Рис. 2. Организация VPN-сетей МСС СН (протокол IP-sec)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:21 Page 22

При работе в этом туннельном режиме каждый исходный IP-пакет помещается целиком в криптозащищенном виде в конверт IP-sec, а тот, в свою очередь, инкапсулируется в другой IP-пакет (содержимое закрыто, заголовок новый и открытый). Туннельный режим обычно реализуют на специально выделенных защитных шлюзах, в роли которых могут выступать многопротокольные криптомаршрутизаторы. Между такими шлюзами и формируются защищенные туннели IP-sec. При этом туннелирование IP-пакетов полностью прозрачно для всех взаимодействующих элементов сетей доступа комплексов технических средств административного управления.

Туннельный режим также может использоваться для защищенного взаимодействия удаленных и мобильных пользователей. В этом случае непосредственно на компьютерах этих пользователей должно быть установлено программное обеспечение, реализующее туннельный режим IP-sec.

Протокол ESP обеспечивает выполнение следующих функций по защите информационного обмена:

– криптографическое гарантированное закрытие содержимого IP-пакетов;

– защита от анализа трафика путем применения туннельного режима;

– формирование и проверка цифровой подписи IP-пакетов для их защиты от нарушений подлинности и целостности;

– защита от воспроизведения IP-пакетов.

Представленный перечень функций по защите информационного обмена в протоколе ESP обеспечивает конфиденциальность данных, а также поддерживает все функции по защите зашифрованных потоков данных от подлога, воспроизведения и случайного искажения. При выполнении шифрования без аутентификации появляется возможность использования механизма трансляции сетевых адресов (NAT), поскольку в этом случае адреса в заголовках IP-пакетов можно модифицировать произвольно или по случайному закону.

Сеть МСС СН, осуществляющая транспортирование (перенос) информации (многопротокольная транспортная сеть МСС СН) будет использоваться в данном случае как высокоскоростная магистраль, обеспечивающая передачу информации между выделенными сетями доступа комплексов технических средств административного управления на основе протокола IP-sek.

Поскольку в настоящее время технология IP не обеспечивает параметры QoS из-за недостаточно развитых средств управления потоком [3, 4], то при достаточно высоких требования[к качеству либо выбирается режим работы многопротокольной транспортной сети, реализующий такую транспортную технологию, которая позволит гарантировать требуемый уровень QoS, либо применяются специальные протоколы, обеспечивающие резервирование пропускной способности (скорости передачи)Ю, гарантирущей требуемое качество.

Если многопротокольная транспортная сеть МСС СН реализует при переносе трафика протоколы технологии ATM [3, 6], MPLS over ATM или MPLS совместно с протоколом резервирования RSVP-TE (RFC-3209), то это позволит обеспечить для различных услуг и приложений пользователей (ДЛ органов управления, информационных аппаратных и аппаратных автоматизации комплексов технических средств административного управления), поддерживающих IP-услуги, необходимое качество обслуживания (QoS). Гарантирование параметров QoS особенно важно для услуг, связанных с передачей чувствительной к задержкам информации (речь, аудио, видео, межмашинный обмен в реальном масштабе времени).

Для обеспечения взаимодействия специальных выделенных сетей доступа комплексов технических средств административного управления в МСС СН, работающих по протоколу IP в многопротокольной транспортной сети, реализующей протоколы ATM или MPLS over ATM, необходимо обеспечить:

– соответствующим протоколом уровня адаптации ATM параметры трафика и QoS для каждого виртуального соединения ATM;

– инкапсуляцию пакетов IP в ячейки ATM;

– взаимодействие между выделенными сетями доступа комплексов технических средств административного управления, находящимися в одной или разных регионах МСС СН, с установление виртуальных соединений ATM между ними;

– многоадресную *передачу* пакетов IP сетей доступа.

Категории услуг многопротокольной транспортной сети МСС СН задаются взаимодействующими с ней средствами, реализующими протоколы уровня адаптации AAL. Так для приложений и услуг сетей доступа, использующих услуги IP, не критичных к задержкам, таким как передача файлов или электронная почта, может применяться категория услуги переноса UBR или ABR (стандарты Форума ATM для AAL3|4, AAL5).

Для приложений и услуг, критичных к задержкам, таким как IP-телефония, передача видеоинформации и межмашинный обмен в реальном времени, целесообразно использовать категорию услуги переноса rt-VBR с QoS2 (стандарты форума ATM для AAL1). При этом инкапсуляция пакетов IP (MPLS) сетей доступа комплексов технических средств административного управления в ячейки ATM многопротокольной транспортной сети осуществляется в соответствии со стандартом Интернет RFC 1483.

В качестве пограничного VPN-устройства, располагающегося либо на узле сети доступа комплексов технических средств административного управления, либо на узле примыкания к транспортной сети, может быть выбран многопротокольный коммутатор-криптомаршрутизатор, в т.ч. поддерживающий уровень адаптации многопротокольной транспортной сети при реализации технологии ATM, рис. 3.

При построении транспортных сетей МСС СН нередко еще применяют технологию FR, которая хотя и не гарантирует гибкость качественных показателей, предоставляемой услуги переноса как технология ATM, но в силу достаточно простой реализации ее на реальных сетях, все еще занимает достойное место в перечне транспортных технологий. Так, например, сети FR относительно широко используются для транспорта информации в NCS США со скоростями передачи от 2 Мбит/с до 45 Мбит/с. Как правило, сеть FR является «верхним слоем» многопротокольной транспортной сети и базируется на высокопроизводительных коммутаторах ATM ее нижнего коммутируемого слоя. Также в качестве верхнего слоя может быть реализована MPLS-сеть, рис. 4.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:21 Page 23

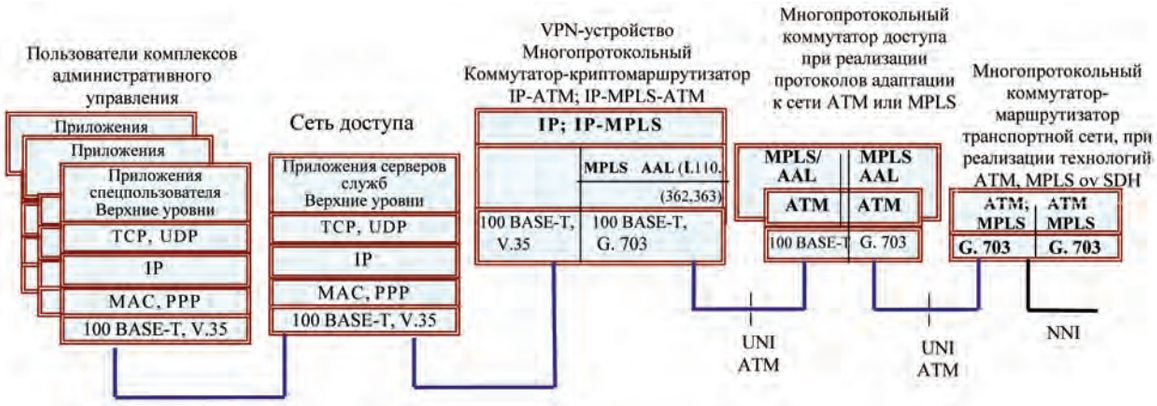


Рис. 3. Логическая архитектура организованной VPN сети в МСС СН

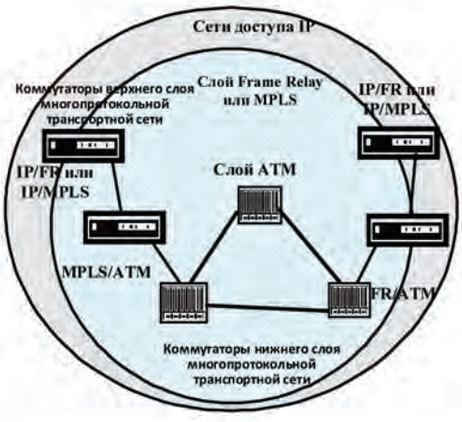


Рис. 4. Общая схема организации многоуровневой транспортной сети МСС СН

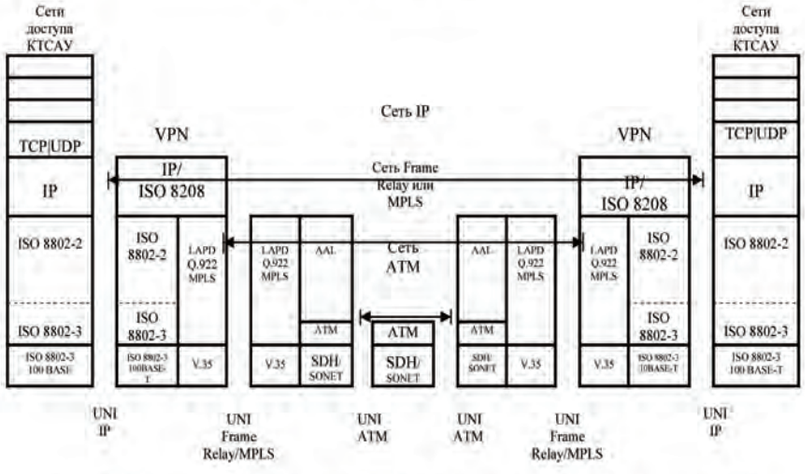


Рис. 5. Организация VPN сетей в МСС СН на основе многопротокольного коммутатора-криптомаршрутизатора, поддерживающего протоколы FR и MPLS

При этом только верхний слой транспортной сети МСС СН строится на базе многопротокольных коммутаторов FR-MPLS, а нижний слой – на высокопроизводительных ATM-коммутаторах.

В качестве пограничного VPN-устройства, также располагающегося либо на узле сети доступа, либо на узле примыкания к верхнему слою транспортной сети МСС СН, может быть выбран многопротокольный коммутатор-криптомаршрутизатор, в данном случае поддерживающий протоколы FR и MPLS, рис. 5.

Управление VPN-сетями МСС СН

Эффективность использования виртуальных каналов в их совокупности в рамках организованных в МСС СН VPN-сетей и их пропускные способности во многом определяются используемыми способами, алгоритмами и протоколами управления. При этом основными способами и алгоритмами управления VPN-сетями МСС СН (в силу специфики самих VPN-сетей), являются способы и алгоритмы управления потоками информации, реализация которых в значительной степени определяется выбранными метриками виртуальных путей.

Естественно, что на задачу управления потоками в VPN-сетях МСС СН накладываются ограничения, связанные с применяемыми протоколами маршрутизации. В настоящее время в той или иной мере стандартизировано достаточно много протоколов маршрутизации, предназначенных для IP сетей, в т. ч. виртуальных. Наиболее известным является протокол RIP (RFC 1058), который вначале широко и, практически, монопольно применялся в сети Интернет, но по мере роста масштабов последней, был заменен на другие протоколы (в частности OSPF). Протокол RIP является протоколом с достаточно простой логикой и позволяет передавать пакеты в IP или другой виртуальной сети по пути, кратчайшему по числу промежуточных маршрутизаторов. Несомненным преимуществом протокола RIP является его простота. Недостатками – увеличение трафика за счёт периодической рассылки широковещательных сообщений, ограничения на величину транзита и слабая защищенность. Однако многие недостатки протокола RIP, проявляющиеся в сети Интернет, для VPN-сетей не столь существенны. Так ограничения по числу транзитов (не более 15) и загрузка трафиком не являются определяющими для VPN-сетей МСС СН.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:22 Page 24

Протокол OSPF описан в документе RFC 1247. Протокол рекомендован для больших распределённых IP сетей. OSPF вычисляет маршруты в сетях IP, работая вместе с рядом других протоколов обмена маршрутной информацией. Протокол OSPF использует понятие "состояние" канала. Суть его алгоритма состоит в вычислении кратчайшего пути. Подразумевается, что информация пройдёт по этому пути быстрее, чем по другим. VPN-маршрутизатор, работающий с этим протоколом, отправляет запросы всем соседним маршрутизаторам, находящимся в одном домене маршрутизации, для определения состояния виртуальных (зарезервированных) каналов до них и далее от них. Состояние виртуального канала при этом характеризуется несколькими параметрами, которые называются метриками. Чаще всего в качестве метрики берется пропускная способность (скорость передачи информации) виртуального канала, но иногда берется его загрузка на текущий момент, задержка информации при её прохождении по этому каналу и т.д. Обобщив полученные сведения по одной из выбранных метрик, маршрутизатор сообщает их всем соседям. После этого им строится ориентированный граф, который повторяет топологию домена маршрутизации. Каждому ребру этого графа назначается оценочный параметр (выбранная метрика). После построения графа используется алгоритм Дейкстры, который по двум заданным узлам находит набор рёбер с наименьшей суммарной стоимостью, т.е., по сути, на практике, выбирается маршрут с наибольшей сквозной пропускной способностью. По совокупной информации создаётся таблица маршрутизации.

В целом протокол OSPF достаточно широко используется в современных IP сетях общего пользования (например, Интернет), но недостаточно эффективен для сетей специального назначения с существенным уровнем нестационарности информационных потоков, и кроме того, он практически не защищен от компьютерных и сетевых атак. Все это делает актуальным решение задачи управления потоками в VPN-сетях МСС СН.

Оперативный характер формирования структуры выделенных VPN-сетей в МСС СН и необходимость учета требований по безопасности и адаптивности процедур маршрутизации потоков информации в них, определяют необходимость синтеза протоколов адаптивного управления потоками и задание адаптивных процедур маршрутизации для их использования в виртуальных сетях МСС СН. Во-первых, т. к. организуемые VPN-сети «ложатся поверх» коммутируемых трактов транспортной сети МСС, то топологические изменения самих VPN-сетей зависят (или могут быть сведены) в основном только от наличия (выхода из строя, восстановления) соответствующего пограничного VPN-устройства. Это необходимо учитывать при формировании маршрутной информации и вычислении метрик для каждого информационного направления, на основе которых производится выработка правил управления потоками информации, позволяющими осуществлять процессы адаптивной маршрутизации.

Процедуры формирования метрики могут носить различный характер, определяемый степенью ее адекватности реальным процессам распределения информации в виртуальных сетях МСС СН в соответствии с принятым способом управления потоками информации.

В настоящее время распространено мнение, что с точки зрения информационной безопасности в сетях специального назначения необходимо применять статическую маршрутизацию. Связано это с тем, что в этом случае по сети не передается никакой маршрутной информации, и возможности внешнего воздействия на маршруты снижаются, хотя не исключаются, т.к. возможны косвенные атаки через коммутационные средства и средства управления. Однако классической статической маршрутизации присущи существенные недостатки, связанные с тем, что при изменении ситуации в любом фрагменте VPN-сети, маршрутная информация может стать настолько неадекватной, что это приведет к срыву нормальной работы всей сети. Кроме того, маршрутная информация не защищена от нарушителя, размещаемого на данном узле сети.

Поэтому в этой связи может быть предложен наиболее простой квазистатический способ управления потоками и формирования метрики, который является детерминированным групповым способом, при котором исходная маршрутная информация не изменяется в процессе функционирования и взаимодействия специальных сетей, но алгоритмика ее использования меняется с учетом локальных параметров адаптации. Исходная маршрутная информация задается матрицей маршрутов $M_{\phi i} = \left[\mu_{ijk}\right]$, $i, j, k = \overline{1, N}$, каждый элемент μ_{ijk} которой равен 1, если путь из i-го узла VPN-услуг VPN-сети в k-й узел VPN-услуг через соседний j-й узел VPN-услуг является путем первого выбора (т.е. наилучшим). Если путь является путем второго выбора, то соответствующий элемент μ_{ijk} равен 2. Матрица маршрутов не позволяет раскрыть структуру VPN-сети, что важно для обеспечения требований безопасности. Каждой строке соответствует определенный код исходящего направления, выбор которого по матрице маршрутов $M_{\phi i}$ происходит следующим образом: при поступлении заявки на передачу шифрованного IP пакета к k-му узлу VPN-услуг в матрице выбирается столбец, соответствующий этому узлу. В нем ищется элемент, равный 1. Строка, в которой он находится, определяет код исходящего направления. При невозможности передать пакет по данному направлению в том же столбце выбирается элемент равный 2, по которому определяется исходящее направление второго выбора и т.д. При выходе из строя соответствующего пограничного VPN-устройства матрица меняется на новую, заранее рассчитанную, которая передается из соответствующего центра управления услугами VPN совместно с рассылкой ключевой информации. Наряду со статичностью маршрутных данных это обстоятельство приводит к негативному свойству данного метода, так как кратковременное занятие какого-либо пограничного VPN-устройства на пути первого выбора приводит к выбору пути второго выбора.

Этот недостаток можно устранить, если при выборе исходящего направления учитывать статистические свойства потоков. Пусть полностью занятое пограничное VPN-устройство b_{ij} содержит k_{ij} потенциальных IP-пакетов в очереди на занятую VPN-ветвь. Пусть известно, что среднее время передачи пакета по VPN-каналу равно $\bar{t}_{зан}$, тогда среднее время занятия при передаче всех пакетов $t_{ij} = k_{ij} t_{зан}$.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:22 Page 25

Если первая попытка установить соединение по исходящему направлению первого выбора окончилась неудачей, то максимальное среднее время, которое пограничное VPN-устройство b_{ij} будет находиться после этого в перегруженном состоянии, равно $t_{ij} = k_{ij} t_{зан}$. Допустим далее, что среднее время на операцию поиска составляет $t_{пр}$, а время между двумя последовательными пробами - $\tau_{пр}$. Тогда число последовательных проб передачи по данному VPN-направлению составит: $n_m = k_{ij} t_{зан} [t_{пр} + \tau_{пр}]^{-1}$.

Вместе с тем, как правило, для каждой сформированной VPN-сети МСС СН характерна высокая ее загруженность, поэтому как время t_{ij}, так и число последовательных проб достаточно велики, что может привести к значительным временным задержкам. Чтобы избежать этого может быть предложен следующий подход. Пусть при передаче информации в VPN-сети МСС СН по пути второго выбора среднее время задержки шифрованных пакетов на Δt_{12} больше, чем по пути первого выбора. Кроме того, путь второго выбора хуже в γ_{12} раз по каким-то другим соображениям (например, степень снижения пропускной способности VPN-направлений). Тогда за число последовательных проб целесообразно взять число $n_{m12} = \gamma_{12} \Delta t_{12} [t_{пр} + \tau_{пр}]^{-1}$. Аналогичные рассуждения применяют к пути третьего выбора: $n_{m23} = \gamma_{23} \Delta t_{23} [t_{пр} + \tau_{пр}]^{-1}$ и т.д.

Выбрав, соответствующим образом, число последовательных проб посылки шифрованных IP-пакетов, и задав эти значения при реализации алгоритма управления, формируется квазистатический способ управления потоками информации в каждой VPN-сети МСС СН с метрикой, учитывающей элементарную статистику потоков в каждой сети, для которого в общем виде число последовательных проб посылки пакетов составит $n_{mab} = \gamma_{ab} \Delta t_{ab} [t_{пр} + \tau_{пр}]^{-1}$, где Δt_{ab} – разница во времени доставки (включая установление виртуального туннеля) шифрованного пакета по пути b-го выбора по сравнению с путем a-го выбора; γ_{ab} - соответствующее ухудшение параметров VPN-сети.

В принципе управление VPN-сетями МСС СН можно организовать, используя простой способ, при котором по каждой сформированной виртуальной сети передаются короткие IP-пакеты пробники (аналог волнового способа управления потоками информации в телефонных сетях и сетях передачи данных [7]). Суть состоит в том, что при поступлении заявок на i-й узел VPN-услуг по каждой VPN-сети последовательно передаются три волны сигналов: поисковая, ответная и заключительная, при этом i-й узел выдает всем соседним узлам VPN-услуг поисковые IP-пакеты пробники, которые транслируются всеми узлами. При трансляции каждый узел принимает во внимание только первый поступивший пакет. Узел назначения VPN-услуг, получив сигнал поисковой волны, передает сигналы ответной волны IP-пакетов "откликов", которые также транслируются всеми узлами VPN-сети. Сигналы ответной волны прекращают трансляцию сигналов поисковой волны. Узел i-й узел VPN-услуг, получив первый сигнал ответной волны, фиксирует это направление и посылает сигналы заключительной волны IP-пакетов фиксации пути, которая распространяется по тем же путям, что и поисковая и информация о которой должна быть отражена в протоколе RSVP-TE для резервирования полученных путей передачи.

Несмотря на то, что при описанном способе процедура управления формируется фактически автоматически, он требует передачи по каждой VPN-сети достаточно большого объема служебной информации. Причем, особенно важно, что объем этот увеличивается при возрастании нагрузки в VPN-сети. Передача служебной информации в условиях большой нагрузки заметно снижает пропускную способность каждой VPN-сети. Качество обслуживания пользователей снижается. Для его сохранения потребуется резервировать ресурсы с некоторым превышением для передачи этого достаточно заметного объема служебной информации. Вместе с тем, относительная простота его и устойчивость в условиях резкой смены оперативной топологии, приводит к тому, что он может быть эффективно применен в мобильных компонентах транспортных сетей МСС СН при нахождении путей передачи пакетов при постоянно меняющейся топологии.

Если потоки информации, передаваемой по каждой VPN-сети, носят достаточно стабильный характер с мало изменяющимся трендом (среднее значение или интенсивность потока информации изменяется незначительно за время существования (жизни) данной VPN-сети), то для таких сетей может быть достаточно эффективной является стратегия управления, основанная на игровых процедурах [7, 9]. Основное достоинство этой стратегии заключается в том, что при формировании процедуры управления она не требует передачи по VPN-сети какой-либо служебной информации. В игровых процедурах в качестве своеобразных служебных сигналов выступают сами IP-пакеты, а процедуры управления используют результаты прохождения информации: всего сообщения (если средний объем сообщений невелик); пачек пакетов; отдельных IP-пакетов за все предыдущее время функционирования каждой VPN-сети. Эта информация используется при формировании плана управления для каждой новой информации (сообщение, пачка пакетов, пакет), по результатам обслуживания которой, план вновь корректируется. Этот способ оказывается весьма полезным, если VPN-сети спланированы не совсем правильно (не оптимально), поскольку он позволяет "нащупать" стратегию управления потоками информации в случае вынужденного "перекоса" нагрузки.

Каждая VPN-сеть в игровых процедурах рассматривается как случайная среда, а устройства формирования маршрутной информации представляются в виде коллектива стохастических автоматов, функционирующих в этой среде. В качестве играющего автомата на j-м узле VPN-услуг принимают автомат с переменной структурой [7, 9]:

$$A_j = (p_{j1}, p_{j2}, ..., p_{j\gamma}, ..., p_{jk}), \quad (1)$$

где $p_{j\gamma} > 0$ – вероятность появления состояния γ-го выхода, а $\sum_{r=1}^{k} p_{jr} = 1$.

Изменение элементов $p_{j\gamma}$ происходит следующим образом: если было совершено действие γ-го типа и автомат был оштрафован, то

$$p^*_{j\gamma} = \frac{p^*_{j\gamma}\alpha}{1+(\alpha-1)p^*_{j\gamma}} \quad (2)$$

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:22 Page 26

Если за это же действие автомат был поощрен, то

$$p^*_{j\gamma} = \frac{p^*_{j\gamma}\beta}{1+(\beta-1)p^*_{j\gamma}} \qquad (3)$$

где $\alpha \le 1$ и $\beta \ge 1$ – параметры метода; $p^*_{j\gamma}$ – оценка вероятности состояния γ-го выхода по результатам обслуживания предыдущих пакетов.

После изменения величин $p^*_{j\gamma}$ все остальные элементы $p^*_{j\xi}\ \forall \xi \neq \gamma$ нормируются:

$$p^*_{j\xi} = \frac{p^*_{j\xi}}{1+(\alpha-1)p^*_{j\xi}};\quad p^*_{j\xi} = \frac{p^*_{j\xi}}{1+(\beta-1)p^*_{j\xi}}; \qquad (4)$$

Реализация игрового метода управления VPN-сетью состоит в следующем: на каждом i-м узле VPN-сети хранится стохастическая матрица с числом строк, равным числу узлов в сети, и числом столбцов, равным числу исходящих направлений.

Каждая j-я строка матрицы, соответствующая j-му узлу, представляет собой автомат $A_{ij} = (p_{ij1}, p_{ij2}, ..., p_{ijy}, ..., p_{ijk})$, а элемент p_{jy} сопоставляется с γ-м исходящим направлением. Элементы p_{jy} изменяются описанным выше образом. Причем, если заявка на передачу информации к j-му узлу VPN-сети по исходящему направлению γ заканчивается успешно, то автомат поощряется; если нет, то штрафуется.

Практическая реализация игровой процедуры управления состоит в следующем: на каждом узле VPN-услуг VPN-сети хранится стохастическая матрица с числом строк, равным числу узлов, охваченных управлением, и числом столбцов равным числу исходящих направлений из данного узла. Каждая j-я строка матрицы, соответствующая i-му узлу , представляет собой автомат A_{ij}, а элемент p_{ijy} сопоставляется с γ-м исходящим направлением. Элементы p_{ijy} изменяются описанным выше образом в соответствии с (2), (3) и (4). При поступлении информации она направляется по тому исходящему направлению, которому соответствует максимальное значение p_{ijy}.

В случае, когда стабильность потоков пакетов в VPN-сетях МСС СН проявляется на достаточно коротких временных интервалах необходимо периодически изменять величины α и β под изменившуюся нагрузку. Однако получить аналитическое выражение для этих величин в зависимости от нагрузки не представляется возможным. Обычно параметры α и β для разных значений нагрузки просто подбираются путем моделирования работы VPN-сети, в результате которого, исходя из заданной вероятности условного отказа в передаче пакета по определенному исходящему направлению $P_{отк}$, могут быть получены некоторые вероятности p_1 и p_2, удовлетворяющие условию $p_1 \le P_{отк} < p_2$.

Тогда параметры α и β могут быть определены из следующего выражения:

$$\alpha = \frac{p_1}{p_2};\quad \beta = \frac{q_1}{q_2}, \qquad (5)$$

где $q_1 = 1 - p_1;\ q_2 = 1 - p_2$.

Вместе с тем, практическая реализация вероятностно-временной вариации игровых процедур управления VPN-сетями МСС СН, достаточно сложна. Поэтому может быть предложена стратегия управления каждой VPN-сетью, основанная на простом адаптивном способе управления потоками, основанном на текущем мониторинге состояния локальных параметров.

Способ предполагает, что осуществляется текущий мониторинг состояния всех VPN-устройств по параметру величины очереди на каждое виртуальное направление. При этом в качестве показателя при управлении потоками информации может быть выбрано случайное или среднее время задержки шифрованных IP пакетов в тракте передачи, поскольку оно аддитивно возрастает по мере удаления от VPN-устройства назначения.

На каждом VPN-устройстве хранится матрица T_k, число строк которой равно числу VPN-устройств в конкретной виртуальной сети, а число столбцов – числу исходящих из него виртуальных направлений. Элемент $t_{k\,ji}$ матрицы T_k, хранящейся на k-м узле VPN-услуг, равен минимальному времени задержки при передаче пакета из k-го узла к i-му через j-й узел. Таким образом, при выборе исходящего направления учитывается длина очереди IP пакетов на него. Пусть w_{kj} – число пакетов, ждущих передачи из k-го к j-му узлу. Пакет направляется к l-му узлу, для которого время задержки будет минимальным, т.е. $\min_l \{t_{klj} + w_{kl}t_l\}$. Для отображения оперативной информации организуется процедура обмена служебными пакетами, содержащими информацию определенного вида. Так, пакет, который k-ый узел VPN-услуг посылает i-му, имеет вид $\Delta T_{kj} = \left(t^M_{kl1}, \Lambda\ t^M_{kli}, \Lambda\ t^M_{kni}\right)$.

В целях получения более адекватного значения величины задержки может использоваться стохастическая модель очереди. Пусть на k-ое VPN-устройство для определенного виртуального направления поступает поток с интенсивностью λ_k. Пакет передается по виртуальному каналу, если он свободен, или записывается в память, если канал занят.

Функционирование VPN-устройства может быть описано моделью системы массового обслуживания (СМО) типа $\left|\vec{M}\right|M|M|\vec{1}\left|r\right|$, т.е. системами массового обслуживания с квазистационарным пуассоновским входящим потоком, экспоненциально распределенными временем передачи и старения, а также реальной надежностью виртуального канала (надежность тракта передачи плюс надежность портов взаимодействующих VPN-устройств) и возможностью хранения r сообщений в памяти.

Состояния ее не входят в установившийся режим, поэтому могут быть заданы только системой дифференциальных стохастических уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{dP_{00}(t_c)}{dt_c} &= -P_{00}(t_c)\lambda_k + P_{10}(t_c)(\mu+\alpha) + P_{01}(t_c)\\
\frac{dP_{0\chi}(t_c)}{dt_c} &= -P_{0\chi}(t_c)[\lambda_k + \chi\gamma] + P_{0,\chi+1}(t_c)(\chi+1)\gamma + P_{0,\chi-1}(t_c)\lambda_k;\\
\frac{dP_{1r}(t_c)}{dt_c} &= -P_{1r}(t_c)[\mu+\alpha+r\gamma] + P_{1,r-1}(t_c)
\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

где $P_{00}(t_c)$, . . ., $P_{0\chi}(t_c)$, . . ., $P_{1r}(t_c)$ – вероятности того, что на данное направление не передается ни одного пакета и ни

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:23 Page 27

одного нет в памяти; канал забракован на какое-то время и в памяти находятся χ пакетов; передается один пакет, а в памяти находится r *пакетов* соответственно; μ, α, γ – интенсивности освобождения виртуального канала, выхода его из строя (за счет выхода из строя соответствующих портов двух корреспондирующих VPN-устройств, т.к. ненадежностью ресурсов транспортной среды можно пренебречь, и старения (потери актуальности) пакетов соответственно; t_c – момент времени, принадлежащий данному временному интервалу, внутри которого интенсивность можно считать неизменной.

Решение данной системы дифференциальных уравнений для конкретного временного интервала даст значения вероятностей всех состояний и позволит, аналогично [10], задать интервалы загрузки, выступающие в качестве переменных параметров управления потоками.

В работе [11] для целей управления информационными потоками в VPN-сетях, сформированных в современных телекоммуникационных сетях, построенных на принципах сетей следующего поколения (NGN), предложены достаточно сложные квазиоптимальные вероятностно-временные методы, практическая реализация которых в МСС СН будет затруднена. Поэтому предложенные в статье простые, но эффективные способы управления и формирования метрик могут быть рекомендованы для использования и обеспечат приемлемые результаты, рис. 6.

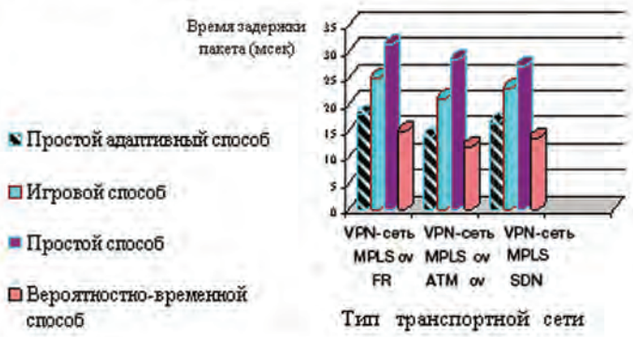


Рис. 6. Среднее время задержки криптопакета в VPN-сетях транспортной сети МСС СН при различных стратегиях управления

Выводы

При организации информационного взаимодействия различных пользователей из административного аппарата структур РФ (руководство госкорпораций, должностные лиц органов различных звеньев управления, руководство концернов и пр.) возникают требования по обеспечению безопасности при передаче информации через недостаточно защищенные от атак телекоммуникационные сети мультисервисных сетей связи специального назначения (МСС СН) [//].

Требуется обеспечить защиту как подключенных к каналам и трактам транспортной сети МСС СН сетей доступа средств административного управления от широкого спектра несанкционированных действий со стороны нарушителей применением межсетевых экранов (брандмауэров), которые поддерживают безопасность информационного обмена путем фильтрации потоков информации и выполнением посреднических функций при переносе информации по транспортной сети МСС СН, так и информации пользователей в процессе передачи ее по слабо защищенной среде с применением ряда мер (аутентификации, криптографии, проверки подлинности и целостности).

Реализация многих мер базируется на объединении разных сетей доступа средств административного управления в единую виртуальную частную VPN-сеть, обеспечивающую безопасность данных. При этом разные группы пользователей могут пользоваться услугами одной или нескольких VPN-сетей в соответствии с принятой в МСС СН политикой безопасности, а каждая VPN-сеть формируется на основе каналов слабо защищенной сети и должна эффективно управляться.

Эффективность использования виртуальных каналов в их совокупности в рамках организованных в МСС СН VPN-сетей и их пропускные способности во многом определяются используемыми способами, алгоритмами и протоколами управления. При этом основными способами и алгоритмами управления VPN-сетями МСС СН (в силу специфики самих VPN-сетей), являются способы и алгоритмы управления потоками информации, реализация которых в значительной степени определяется выбранными метриками виртуальных путей. Предложенные способы управления VPN-сетями МСС СН, несмотря на их простоту, достаточно эффективны и существенно снижают среднее время задержки криптопакетов.

Литература

1. URL: http://freelance4.narod.ru/NCS.htm.

2. *Браун С.* Виртуальные частные сети // М.: Лори Mc Grav-Hill Comp., 2001. 508 с.

3. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2010. 916 с.

4. *Новиков Ю., Новиков Д., Черепанов А., Чуркин В.* Компьютерные сети. Интернет. СПб.: Питер, 2002. 928 с.

5. *Зима В.М., Молдовян А.А., Молдовян Н.А.* Безопасность глобальных сетевых технологий. СПб.: СПбУ, 1999. 234 с.

6. *Таненбаум Э.* Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2002. 846 с.

7. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Левко И.В.* Организация эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами на основе методов управления процессами предоставления информационных услуг // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 3. С. 45-54.

8. *Буренин А.Н., Легков К.Е.* Вопросы управления параметрами, характеризующими процессы функционирования инфокоммуникационной системы специального назначения // В сборнике: Технологии информационного общества X Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2016. С. 213-214.

9. *Burenin A.N., Legkov K.E., Orkin V.V., Alekseev V.F.* To the question of effective functioning organization of information subsystems of automated control systems for complex organizational-technical objects in conditions of external influences // В сборнике: 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SINKHROINFO 2017. 2017. С. 7997506.

10. *Легков К.Е., Буренин А.Н.* Вопросы организации эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 8-12.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:23 Page 28

11. *Легков К.Е., Буренин А.Н.* Метод квазистатического управления потоками требований в инфокоммуникационной системе специального назначения // I-methods. 2009. Т. 1. № 1. С. 17-21.

12. *Буренин А.Н., Легков К.Е.* Основные подходы к организации оперативного управления комплексами обеспечения единым временем системы управления сложным организационно-техническим объектом // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 1. С. 20-32.

13. *Легков К.Е., Бабошин В.А., Пастухов А.С.* Повышение эффективности системы управления в рамках изменения подхода к автоматизации и информации // I-methods. 2014. Т. 6. № 4. С. 19-23.

14. *Легков К.Е., Левко И.В.* Системный подход к организации управления информационными подсистемами автоматизированных систем управления сложными объектами специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 84-91.

15. *Легков К.Е., Скоробогатова О.А., Буренин А.Н., Умаров А.Б.* Перспективы развития автоматизированных систем управления специального назначения // I-methods. 2014. Т. 6. № 3. С. 22-25.

16. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Боговик А.В.* Основы поддержки процессов организационного управления системами специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 2. С. 54-61.

17. *Легков К.Е.* Математическая модель инфокоммуникационной системы специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 2. С. 6-14.

18. *Легков К.Е., Буренин А.Н.* Метод управления параметрами, характеризующими процессы функционирования инфокоммуникационной системы // I-methods. 2010. Т. 2. № 1. С. 14-19.18.

19. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Емельянов А.В.* Элементы системного анализа автоматизированных систем управления современными инфокоммуникационными сетями специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 3. С. 56-63.

20. *Легков К.Е., Емельянов А.В.* Математическое обеспечение контуров автоматизированных систем управления информационными системами специального назначения при решении задач учета и мониторинга // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № S1. С. 37-43.

21. *Ерохин С.Д., Артамонова Я.С., Легков К.Е.* К вопросу о методике выявления угроз информационной безопасности в пограничном пространстве // I-methods. 2013. Т. 5. № 2. С. 19-22.

22. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Первов М.С.* О некоторых принципах управления серверным оборудованием защищенных инфокоммуникационных сетей специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № S2. С. 22-26.

23. *Голубинцев А.В., Мясникова А.И., Легков К.Е.* Архитектурные принципы организации автоматизированных систем управления инфокоммуникационными сетями специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 4. С. 16-23.

FUNDAMENTALS OF VPN-NETWORKS ORGANIZATION AND MANAGEMENT FOR SPECIAL PURPOSES IN MODERN INFORMATION SYSTEMS

Eugene V. Druk, *Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia*
Igor V. Levko, *Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia*

Abstract

In work questions of safety of information exchange of users (the manuals of state corporations, officials of different control links and so forth), through insufficiently protected from the attacks (further poorly protected) a telecommunication component of special purpose information systems are considered. At the same time protection as the special purpose multiservice communication networks of means of access networks of means of administration management connected to canals and highways of a transport network from a broad spectrum of unauthorized actions is provided from violators with use of firewalls (firewalls) which maintain safety of information exchange by filtering of information streams and execution of mediatorial functions at transfer of information on a transport network of a special purpose multiservice communication network, and information of users in the course of transfer it on poorly protected environment using a number of measures (authentications, cryptography, authentication and integrity). Implementation of many measures is based on association of different access networks of means of administration management in the uniform virtual private VPN network ensuring data security in information systems. At the same time different user groups can use services of one or several VPN networks according to the security policy accepted in special purpose multiservice communication networks, and each VPN network forms on the basis of channels of poorly protected network and should be controlled effectively. Efficiency of use of virtual channels in their set within organized VPN networks and their throughputs in many respects are defined by the used ways, algorithms and protocols of management. At the same time the main ways and control algorithms VPN networks are ways and control algorithms information streams which implementation substantially is defined by the selected metrics of virtual paths. The offered ways of management of VPN networks, despite their simplicity, are rather effective and significantly reduce the average time of a delay of cryptopackets.

Keywords: *system, multiservice communication network, transport network, safety, management, information streams, management of flows, virtual private area network.*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:24 Page 29

References

1. URL: http://freelance4.narod.ru/NCS.htm
2. Brown S. (2001). *Virtual private area networks*. Moscow: Laurie Ms of Grav-Hill Comp. 508 p.
3. Olifer V.G., Olifer N.A. (2010). *Computer networks. Principles, technologies, protocols*. SPb.: Piter. 916 p. (In Russian).
4. Novikov Yu., Novikov D., Cherepanov A., Churkin V. (2002). *Computer networks. Internet.* SPb.: Piter. 928 p. (*in Russian*)
5. Zima V.M., Moldovyan A.A., Moldovyan N.A. (1999). *The global security network technologies*. St. Petesburg: SPbU. 234 p. (*in Russian*)
6. Tanenbaum E. (2002). *Computer networks*. SPb.: Piter. 846 p. (*in Russian*)
7. Burenin A.N., Legkov K.E., Levko I.V. (2017). Effective functioning organization of information subsystems of automated control systems for complex organizational-technical objects based on the methods of process management of information services provision processes control. *H&ES Research*.Vol. 9. No. 3. Pp. 45-54. (*in Russian*)
8. Burenin A.N., Legkov K.E. (2016). Questions of management of the parameters characterizing processes of functioning of an infocommunication system of a special purpose. In the collection: *Technologies of information society X International industry scientific and technical conference: collection of works*. Pp. 213-214. (*in Russian*)
9. Burenin A.N., Legkov K.E., Orkin V.V., Alekseev V.F. (2017). To the question of effective functioning organization of information subsystems of automated control systems for complex organizational-technical objects in conditions of external influences. *In the collection: 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SINKHROINFO 2017*. P. 7997506.
10. Legkov K.E., Burenin A.N. (2017). Questions of the organization of effective functioning of information subsystems of automated control systems for difficult organizational and technical objects. *Questions of the defense equipment. Series 16: Technical means of counteraction to terrorism.* No. 9-10 (111-112). Pp. 8-12. (*in Russian*)
11. Legkov K.E., Burenin A.N. (2009). A method of quasistatic management of flows of requirements in a special purpose infocommunication system. *I-methods*. Vol. 1. No. 1. Pp. 17-21. (*in Russian*)
12. Burenin A.N., Legkov K.E. (2019). Basic approaches to the organization of operational management of complexes of providing management system with uniform time with the difficult organizational and technical object. *H&ES Research*. Vol. 11. No. 1. Pp. 20-32. (*in Russian*)
13. Legkov K.E., Baboshin V.A., Shepherds of A.S. (2014). Increase in system effectiveness of management within change of approach to automation and information. *I-methods*. Vol. 6. No. 4. Pp. 19-23. (*in Russian*)
14. Legkov K.E., Levko I.V. (2017). System approach to organization of control of information subsystems of automated control systems for complex objects of special purpose. *H&ES Research*. Vol. 9. No. 5. Pp. 84-91. (*in Russian*)
15. Legkov K.E., Skorobogatova O.A., Burenin A.N., Umarov A.B. (2014). Perspectives of development of special purpose automated control systems. *I-methods*. Vol. 6. No. 3. Pp. 22-25. (*in Russian*)
16. Burenin A.N., Legkov K.E., Borovik A.V. (2016). The base of support processes of organizational control systems for special purposes. *H&ES Research*. Vol. 8. No. 2. Pp. 54-61. (*in Russian*)
17. Legkov K.E. (2016). A mathematical model of the infocommunication system of special purpose. *H&ES Research*. Vol. 8. No. 2. Pp. 6-14. (*in Russian*)
18. Legkov K.E., Burenin A.N. (2010). A method of management of the parameters characterizing processes of functioning of an infocommunication system. *I-methods*. Vol. 2. No. 1. Pp. 14-19. (*in Russian*)
19. Burenin A.N., Legkov K.E., Emelyanov A.V. (2016). Elements of the system analysis automated control systems modern information and communication networks special purpose. *H&ES Research*. Vol. 8. No. 3. Pp. 56-63. (*in Russian*)
20. Legkov K.E., Yemelyanov A.V. (2016). Mathematical provision of automated control systems of information systems of special purpose in dealing with accounting and monitoring tasks. *H&ES Research*. Vol. 8. No. S1. Pp. 37-43. (*in Russian*)
21. Yerokhin S.D., Artamonova Ya.S., Legkov K.E. (2013). To a question of a technique of identification of threats of information security in boundary space. *I-methods*. Vol. 5. No. 2. Pp. 19-22. (*in Russian*)
22. Burenin A.N., Legkov K.E., Pervov M.S. (2016). Some principles of server hardware control of protected infocommunication networks of special purpose. *H&ES Research.* 2016. Vol. 8. No. S2. Pp. 22-26. (*in Russian*)
23. Golubintsev A.V., Myasnikova A.I., Legkov K.E. (2015). Architectural principles of organization automated control systems of infocommunication networks special purpose. *H&ES Research*. Vol. 7. No. 4. Pp. 16-23. (*in Russian*)

Information about authors:

Eugene V. Druk, *graduated of Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia*

Igor V. Levko, *PhD in Technological Sciences, associate professor, associate professor of automated control systems of Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:24 Page 30

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТАСРЕДОЙ

Хлопов Борис Васильевич,
АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, ***hlopovu@yandex.ru***

Шашурин Василий Дмитриевич,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, ***shashurin@bmstu.ru***

Мешков Сергей Анатольевич,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, ***sb67241@mail.ru***

Самойлова Валерия Сергеевна,
АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, ***Samvalser@yandex.ru***

Апакин Юрий Игоревич,
АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, ***yura145557@yandex.ru***

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10277

Ключевые слова: *метаматериалы, композитный материал, импульсное магнитное поле, нанокластеры, полеобразующая система, рупорная антенна.*

Исследована модификация электромагнитных полей образцами, изготовленными из композиционных материалов, свойства которых обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из опаловой матрицы с заполнением нанополостей (межсферических пустот) кластерами из магнитного проводящего материала, которые имеют произвольный размер и форму. Экспериментальные образцы, на основе метаматериалов, представляют собой метасреду с пространственной в диапазоне 50-300 нм модуляцией (дисперсией) магнитных, электрических свойств при размере активных областей (кластеров) в диапазоне 5-50 нм. Исследование влияния электромагнитных полей на нанокомпозиты и определение их электрических и магнитных свойств проведено в широком рабочем диапозоне. Разработаны методики, изготовлены и аттестованы стенды для испытаний. Например, стенд для оценки восприимчивости образцов композитных материалов при воздействии на них внешним равномерным электромагнитным полем, в полеобразующей системе соленоида в частотном диапазоне до 500 КГц. Приведены экспериментальные результаты воздействия импульсными магнитными полями на образцы, содержащие наночастицы Fe, Ni и Co, изготовленными из метаматериалов с решетчатой упаковкой наносфер SiO2. Представлен стенд для оценки восприимчивости образцов композитных материалов в дальней зоне при воздействии на них внешним электромагнитным полем. Проверка полевой зависимости коэффициента прохождения через нанокомпозит и полевой зависимости коэффициента отражения, содержащего наночастицы (Fe; Ni+Fe) проведена на частотах миллиметрового диапазона волн. Приведены результаты измерений характеристик рупорной антенны в дальней зоне с размещением нанокомпозитных материалов содержащих наночастицы Fe и Ni+Co в пространстве магнитного поля антенны. Влияние нанокомпозита на прохождение электромагнитной волны отражено в таблице.

Информация об авторах:
Хлопов Борис Васильевич, *д.т.н., начальник отдела, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия*
Шашурин Василий Дмитриевич, *д.т.н., профессор, зав. кафедрой "Технологии приборостроения", МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
Мешков Сергей Анатольевич, *д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Москва, Россия*
Самойлова Валерия Сергеевна, *инженер научно-технического отдела, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия*
Апакин Юрий Игоревич, *инженер научно-технического отдела, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия*

Для цитирования:
Хлопов Б.В., Шашурин В.Д., Мешков С.А., Самойлова В.С., Апакин Ю.И. Исследование модификации электромагнитных полей метасредой // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 30-35.

For citation:
Hlopov B.V., Shashurin V.D., Meshkov S.A., Samoylova V.S., Apakin Yu.I. (2019). Study of the modification of the electromagnetic fields of meta medium. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 30-35. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:24 Page 31

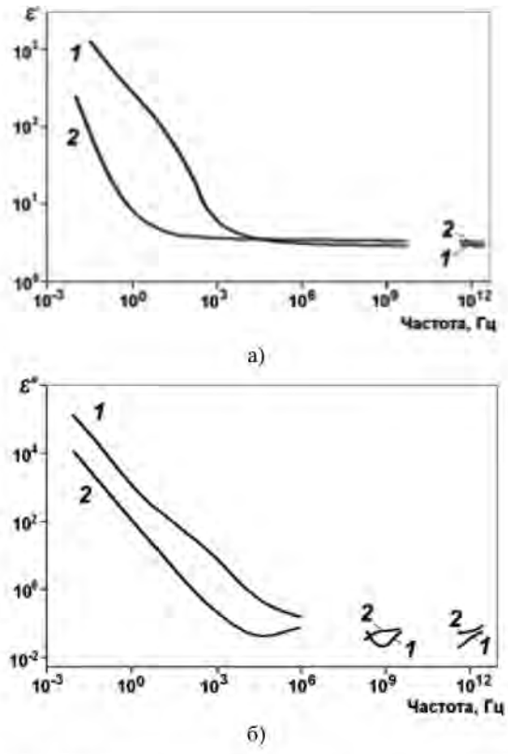
Введение

Метасреда, искусственно созданная периодической структурой из опаловой матрицы с заполнением нанополостей кластерами из магнитного проводящего материала определенного размера и формы, обладает характеристиками, несвойственными природным соединениям. Искусственная периодическая структура матрицы модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала [1]. Для достижения независимости избирательных свойств метасреды от направления электромагнитных волн используется объемная (3D периодически упорядоченная), слоистая, частотнозависимая среда из структурообразующих элементов. Изменяющееся во времени электромагнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности матрицы из мультиферроидных материалов, вызывает потоки, которые, в зависимости от резонансных свойств структуры матрицы, порождают вторичное магнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему, что приводит к положительным или отрицательным эффективным значениям электромагнитной проницаемости (μ) материала матрицы [2]. Анализ мультиферроидных материалов на основе железосодержащих, кобальтсодержащих, барий содержащих и редкоземельных переходных металлических сплавов проведен с учетом отечественных и зарубежных источников [3,4]. Он позволил уточнить возможность и условия фазовых переходов материалов их магнитную восприимчивость к внешним магнитным полям [5] и разработать технологическое оборудование и методики для исследования магнитных свойств образцов при воздействии внешних электромагнитных полей [6]. Для оценки дальнейшего перспективного направления использования в электронной промышленности нанотехнологий нами проведены исследования частотно-резонансных свойств элементов структуры образцов нанокомпозитов, изготовленных на основе опаловых матриц, в зависимости от их формы содержащих наночастицы Fe и Ni+Co в межсферических нанополостях.

Условия фазовых переходов материалов

Пространственно неоднородный метаматериал с модуляцией (дисперсией) электрических и диэлектрических параметров, в диапазоне до 500 кГц, с высокой реальной компонентой диэлектрической проницаемостью (ε′) и малыми значениями мнимой компоненты (ε″), эффективно изменяет групповую и фазовую скорости падающего электромагнитного излучения и корректирует направления силовых линий электромагнитного и электрического поля. За счет таких физических характеристик как ε, μ и, соответственно, реальной и мнимой компонентами показателя преломления, фокусируются электромагнитные поля, созданные в кластерах и объединенные в области с высоким значением напряженности электромагнитного поля. На рисунке 1 приведены графики частотных зависимостей ε' и ε''.

Облучающее опаловую матрицу с заполнением нанополостей кластерами из магнитного проводящего материала электромагнитное поле создает поверхностный эффект. Поверхностный эффект выражается в неравномерном распределении тока по сечению кластерного магнитного проводящего материала.



а)

б)

Рис. 1. Графики частотных зависимостей действительной ε' и мнимой ε'' параметров диэлектрической проницаемости опаловых матриц, межсферические полости которых заполнены кластерами Ni_3Fe (а) и Ni_2Fe_3(б)

Различные концентрации магнитного проводящего материала, размещаемого в опаловой матрице, в периодической структуре субмикронных наносфер SiO_2 с заполнением нанополостей, инициирует эффект близости токопроводящих материалов. Периодическая структура матрицы из мультиферроидных материалов обеспечивает в электромагнитном поле многоуровневую, пространственную равномерность напряженности магнитного поля при воздействии внешним электромагнитным полем.

В этом случае матрица обеспечивает фазовый переход своей электромагнитной структуры из лабиринтного в однородное состояние. Эффект близости представляет собой разновидность поверхностного эффекта и состоит в концентрации тока и соответственно электромагнитного поля в определенных зонах, состоящих из кластерного магнитного проводящего материала. В результате суммарного взаимодействия всех структурных кластерных зон, входящих в рассматриваемую среду, с пространственной модуляцией магнитных, электрических свойств, электромагнитное поле полеобразующей системы концентрируется в области размещения метасреды (преобразователя или фокусирующей линзы). Частотные зависимости микроволновой проводимости и компоненты диэлектрической восприимчивости для композитов на основе опаловых матриц с кластерами из магнитных металлов обеспечивают выделение полезной мощности. Для получения и формирования нанокомпозитов использовали образцы опаловых матриц с диаметром наношаров SiO_2 $d \approx 260$–280 нм. [2, 3].

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:24 Page 32

Воздействия электромагнитным импульсом на метасреду

Метаструктура – преобразующая электромагнитное поле матрица (фокусирующая линза) имеет габаритные размеры 19 х 11,3 х 2,6 (мм). Полученный прочный материал матрицы прошел механическую обработку до рабочих габаритных размеров.

На первом этапе провели проверку мультипликации и электромагнитной восприимчивости образцов матрицы методом воздействия электромагнитным импульсом в камере полеобразующей системы. Методы измерений напряженности импульсного магнитного поля приведены в [6]. Измерения проводились в точках рабочего объема камеры полеобразующей системы соленоида при емкости накопителей энергии 1500 мкФ. Измерения зависимости вектора напряженности импульсного магнитного поля, направленного перпендикулярно и параллельно плоскости образцов №№131 (Fe), 114 (Ni+Co) проводились 3 раза для уменьшения погрешности.

Анализ результатов проведенных экспериментов подтверждает, что при размещении образцов №№131,114 в полеобразующей системе [7] эффективная мультипликация методом воздействующих импульсных магнитных полей со значением 825 КА/м осуществляется в пространственном сферическом объеме рабочей камеры. Конструктивное соединение двух образцов №131 в пластину с габаритными размерами 38,0 х 11,3 х 2,6 мм обеспечило в ограниченном пространстве рабочей камеры полеобразующей системы эффективное размножение дипольных образований и мультипликацию воздействующих импульсных магнитных полей со значением 885 КА/м при измерении на расстоянии 28мм. Конструктивное соединение двух образцов: № 114 в пластину с габаритными размерами 38,0 х 11,3 х 2,6 мм обеспечило в ограниченном пространстве рабочей камеры полеобразующей системы эффективное размножение дипольных образований и мультипликацию воздействующих импульсных магнитных полей со значением 871 КА/м при измерении на расстоянии 25мм. При облучении образцов метаматериала, размещенных в равномерном магнитном поле полеобразующей системы, в локальной области создается эффективная мультипликация поля с увеличением значения напряженности в пространственном объеме рабочей камеры в сферических пределах значений радиуса R (зависит от геометрических факторов метаматериала). При удалении на большее расстояние от размещения образцов, напряженность электромагнитного поля приобретает среднее значение напряженности 720 КА/м, создаваемое полеобразующей системой.

Воздействия на метасреду электромагнитным полем в миллиметровом диапазоне частот

В опаловой матрице с меньшей концентрацией металлов наблюдается дисперсия диэлектрической проницаемости и проводимости с максимумом диэлектрических потерь на частотах миллиметрового диапазона, которую можно объяснить за счет механизма проводимости на переменном токе в несвязанных кластерах. Вклад проводимости на постоянном токе и в низкочастотном диапазоне ниже, чем значения проводимости в миллиметровом диапазоне частот. На рисунке 2 приведена полевая зависимость коэффициента отражения (а) и прохождения (б) для нанокомпозита, содержащего наночастицы Ni и Fe. Величина коэффициентов приведенных на рисунке 2 может быть велика, так как во многом зависит от структуры и технологии изготовления матрицы.

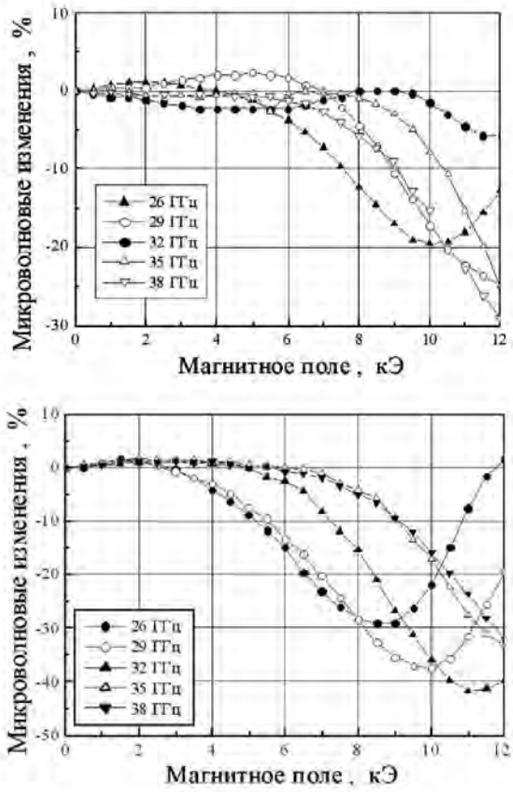


Рис. 2. Полевая зависимость коэффициента отражения (а) и прохождения (б) для нанокомпозита, содержащего наночастицы Ni и Fe на частотах миллиметрового диапазона

Частотная зависимость значений напряженности электромагнитного поля в метаматериалах [6] предопределяет возможность использования их в антенных устройствах в качестве преобразователя (фокусирующей линзы) электромагнитного поля. Проверка полевой зависимости коэффициента прохождения через нанокомпозит и полевой зависимости коэффициента отражения, содержащего наночастицы (Fe; Ni+Co) на частотах миллиметрового диапазона проведена на разработанном стенде с макетными образцами матриц №№131,114 и антенных устройств.

Секториальные рупора, имеют следующие геометрические размеры: приемный Е-плоскостной: a = 34 мм, b =71 мм, R = 83 мм; передающий Е-плоскостной: a = 65 мм, b =65 мм, R = 160 мм. Корректирующие линзы диэлектрическая SiO_2 с $\varepsilon = 2.5$, опаловая матрица образец №131 с кластерами из магнитного проводящего материала (Fe) и опаловая матрица образец №114 с кластерами из магнитного проводящего материала (Ni+Co), размещались в пенопластовом держателе с расстоянием от горловины рупора на $a_1 = 30$ мм. Измерение диаграммы направленности и коэффициента усиления антенн производилось при работе их в режиме передачи и приема по известной методике [8].

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:25 Page 33

При экспериментальной проверке измерения проводились в диапазоне частот 23-37 ГГц с использованием режима передачи.

Рис. 3. Стенд исследования макетных образцов матриц: 1,6 – стойки для антенн, имеющие поворотные диски; 2 – излучающая антенна П6-69; 3 – генератор сигналов KEYSIGHT E8257D; 4 – анализатор спектра Agilent E4447A; 5– исследуемый макет антенны №0005

На рисунке 3 приведена фотография стенда для исследования рупорных антенн. Результатами измерений являются значения мощности принимаемого сигнала в зависимости от угла поворота антенны и значения коэффициента усиления на крайних и центральной частотах диапазона. Исследуемый рупор укреплен на поворотном диске, на стойке с угломерным устройством. Рупорная антенна закреплена на поворотном диске таким образом, что диаграммы направленности измеряются как в Е- так и в Н-плоскости. Положение приемного рупора при измерении соответствует поляризации излучаемого рупором поля. Измеряется диаграмма направленности рупора в плоскости, совпадающей с широкой стороной его раскрыва, вращая передающий секториальный рупор относительно приемной антенны. При измерениях соблюдается условие, что расстояние от источника излучения до индикаторного устройства остается постоянным и равно h = 2,15 м, так как диаграмма направленности антенны характеризует зависимость амплитуды напряженности электрического поля E_m в дальней зоне от угловых координат θ при этом условии.

Корректирующие линзы устанавливают в раскрыве исследуемого рупора, как отмечалось ранее, наличие квадратичных фазовых искажений в раскрыве рупора приводит к нежелательным явлениям в характеристиках излучения. Существуют различные методы компенсации фазовых искажений в рупоре. Принцип действия их основан на искусственном выравнивании оптических длин путей, проходимых электромагнитной волной от вершины рупора до всех точек раскрыва. В данной работе для коррекции фазовых искажений в раскрыве рупора используются линзы, принцип действия которых рассмотрен [2]. Принцип действия линзы основан на том, что скорость распространения электромагнитных волн в материале линзы отличается от их скорости распространения в окружающем пространстве. Как известно, скорость распространения электромагнитной волны в любом диэлектрике меньше скорости света и определяется выражением, εC = V, где C – скорость света; ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Для коррекции фазовых искажений в раскрыве необходимо выполнить линзу, подбирая соответствующим образом ее форму. Используя в качестве материала линзы систему параллельных метапластин, можно создать линзу, подбирая соответствующим образом ее форму. Такую метапластинчатую линзу принято называть ускоряющей. При плоском раскрыве рупора сторона линзы, обращенная к источнику волны, должна быть вогнутой Профиль линзы в этом случае определяется уравнением эллипса. Такая метапластинчатая линза, установленная в раскрыве рупора, обеспечивает синфазное распределение поля в раскрыве.

Наличие корректирующей линзы влияет на закон изменения амплитуды поля в раскрыве рупорной антенны. Измерение диаграммы направленности макета приемного рупора проводится в диапазоне частот 23-37 ГГц. Результатом измерений являются значения мощности принимаемого сигнала в зависимости от угла поворота антенны на крайних и центральной частотах диапазона. В данных измерениях поворот антенны производился в Е- и Н-плоскостях в секторе -75^0 … $+75^0$. Измерения коэффициента усиления приемного рупора проводятся по методу эталонной антенны.

Результаты измерения ширин диаграммы направленности по уровню -3 Дб в плоскости расширения рупора с различными образцами нанокомпозитных материалов, а так же полученные результаты по коэффициентам усиления представлены в табл. 1.

Таблица 1

23 ГГц		30 ГГц		37 ГГц	
Без образцов нанокомпозитных материалов					
К, дБ	$2_{0,5}$	К, дБ	$2_{0,5}$	К, дБ	$2_{0,5}$
17,9	28	19,3	14	20,2	24
С образцом Ni+Co (образец с меньшей толщиной)					
19,7	30	20,4	16	20,7	27
С образцом Ni+Co (образец с большей толщиной)					
18,4	24	19,8	23	21,3	13
С образцом Fe					
19,6	30	19,8	16	20,2	32

Таким образом, мы наблюдаем увеличение коэффициента усиления в измерениях с участием образцов. Сужение диаграммы направленности наблюдается лишь при увеличении толщины образца Ni+Co и только на крайних частотах исследуемого диапазона.

Заключение

1. В настоящей работе приведены исследования электромагнитных и диэлектрических свойств 3D-нанокомпозитов на основе опаловых матриц, с внедренными в их межсферические нанополости металлическими наночастицами.
2. При облучении образцов метаматериала, размещенных в ограниченном пространстве рабочей камеры полеобразующей системы, в локальной области облучающего поля создается эффективная мультипликация с увеличением значения напряженности поля
3. Проведено сопоставление изменений микроволнового сигнала при прохождении волной образца магнитной

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:25 Page 34

матрицы и при отражении от нее. Установлено, что величина изменений и форма полевой зависимости коэффициентов прохождения и отражения для нанокомпозитов с диэлектрическими частицами близки друг к другу.

4. В миллиметровом диапазоне изменения коэффициентов прохождения через пластину нанокомпозита и отражения от нее вызваны двумя физическими явлениями – магнитным резонансом и антирезонансом.

5. Экспериментально продемонстрировано эффективное взаимодействие электромагнитных волн с 3D-нанокомпозитами. Установлено, что спектры магнитного резонанса содержат акустическую ветвь.

6. Полученные результаты создают предпосылки для разработки высокочастотных устройств, работа которых будет основана на использовании микроволнового магнитного резонанса в магнитных нанокомпозитах на основе опаловых матриц.

Литература

1. *Вендик И.Б., Вендик О.Г.* Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // Журнал технической физики. 2013. том 83. вып. 1. С. 3-27.
2. *Белянин А.Ф., Чучева Г.В., Хлопов Б.В.* Формирование, строение и физические свойства нанокомпозитов: опаловые матрицы – метатитанаты металлов // Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2017, Москва, 2017, С. 132-135.
3. *Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Митягина А.Б.* Фазовые изменения мультиферроидных магнитных материалов, применяемых в системах внешней памяти // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: физика. том 17. № 1. 2017. С. 33-43.
4. *Yuanzhe Piao.* Multi-Ferroic Polymer Nanoparticle Composites for Next Generation Metamaterials// AOARD. Final Report. April 25th 2016. P. 13.
5. *Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Бовтун В., Чучева Г.В., Хлопов Б.В.* Особенности фазовых превращений и кристаллизации металлов и соединений на их основе (Ni, Fe) в межсферических полостях решетчатых упаковок наносфер SiO_2. Сборник научных трудов XXI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», XXVIII Международного симпозиума «Тонкие пленки в электронике», VIII Международной научно-технической конференции «Наноинженерия». 8 – 10 сентября 2016 г. г. Москва, Россия. С. 355-360.
6. *Хлопов Б.В., Шашурин В.Д., Чучева Г.В., Самойлова В.С., Митягина А.Б.* Исследование возможности мультиферроидных метаматериалов на основе опаловых матриц изменять свои параметры под воздействием внешнего электромагнитного поля // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №10. С. 38-44.
7. *Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Митягин А.Ю.* Исследование пространственного мультиплицирования импульсного магнитного поля образцами метаматериалов // T-Comm. 2013. №1. С. 48-50
8. *Шабунин С.Н., Мительман С.Н., Князев Н.С.* Измерение параметров антенн : учеб. пособие; под общ. ред. С.Н. Шабунина. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2014. 56 с.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:26 Page 35

STUDY OF THE MODIFICATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS OF META MEDIUM

Boris V. Hlopov, *JSC "CNIRTI named after academician A.I. Berg", Russian Federation, Moscow, Russia,* ***hlopovu@yandex.ru***
Vasily D. Shashurin, *MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia,* ***shashurin@bmstu.ru***
Sergey A. Meshkov, *MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia,* ***sb67241@mail.ru***
Valeria S. Samoylova, *JSC Central Research Radio Engineering Institute of the Academician A.I. Berg, Moscow, Russia,* ***samvalser@yandex.ru***
Yuriy I. Apakin, *JSC Central Research Radio Engineering Institute of the Academician A.I. Berg, Moscow, Russia,* ***yura145557@yandex.ru***

Abstract
We investigated the modification of electromagnetic fields by means of samples made of composite materials whose properties are caused not so much by the properties of its constituent elements as by the artificially created periodic structure of an opal matrix with filling interspherical voids with clusters of magnetic conductive material which have arbitrary size and shape. Experimental samples represent a meta-environment with spatial modulation (dispersion) of magnetic, electrical properties with the size of active regions (clusters) in the range of 5-50 nm. We studied the effect of electromagnetic fields on nanocomposites and determined their electrical and magnetic properties in a wide operating range. We have developed methods and stands for testing. For example, a stand for assessing the susceptibility of samples of composite materials when exposed to an external uniform electromagnetic field in a field-forming system in the frequency range up to 500 KHz. The article presents the experimental results of exposure to pulsed magnetic fields on samples containing Fe, Ni, and Co nanoparticles made of metamaterials with lattice packing of SiO2 nanospheres. Also, presented a stand for assessing the susceptibility of samples of composite materials in the far zone when exposed to an external electromagnetic field. The article presents the results of measurements of the characteristics of a horn antenna in the far zone with the placement of nanocomposite materials containing Fe and Ni + Co nanoparticles in the antenna space. The effect of a nanocomposite with regard to the passage of an electromagnetic wave is shown in the table.

Keywords: *metamaterials, composite material, pulsed magnetic field, nanoclusters, field-forming system, horn antenna.*

References

1. Vendik I.B., Vendik O.G. (2013). Metamaterials and their application in microwave technology (Review). *Technical Physics.* Vol. 83, No. 1, pp. 3-27.
2. Hlopov B.V., Chucheva G.V., Belyanin A.F. (2017). Formation, structure and physical properties of nanocomposites: opal matrices - metal metatitanates. *INTERMATIC-2017*, pp. 132-135.
3. Hlopov B.V., Chucheva G.V., Mityagina A.B. Phase (2017). Changes of multiferrod magnetic materials used in external memory systems. *Izvestiya of Saratov university. New series.* Vol. 17. Issue 1, pp. 21-33.
4. Yuanzhe Piao. (2016). Multi-Ferroic Polymer Nanoparticle Composites for Next Generation Metamaterials. *AOARD. Final Report.* April 25th 2016. P. 13.
5. Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Bovtun V., Chucheva G.V., Hlopov B.V. (2016). Features of phase transformations and crystallization of metals and compounds based on them (Ni, Fe) in interspherical cavities of lattice packings of SiO2 nanospheres. *Collection of scientific papers of the XXI International Scientific and Technical Conference "High Technologies in the Industry of Russia", XXVIII International Symposium "Thin Films in Electronics", VIII International Scientific and Technical Conference "Nanoengineering"*, pp. 355-360.
6. Hlopov B.V., Shashurin V.D., Chucheva G.V., Samoylova V.S., Mityagina A.B. (2017). The possibility research of multiferroidny metamaterials on the basis of opal matrixes to change the parameters under the influence of the external electromagnetic field. *T-Comm*, vol. 11, no.10, pp. 38-44.
7. Hlopov B.V., Shashurin V.D., Mityagin A.Y. (2013). Investigation of the spatial multiplication of a pulsed magnetic field by metamaterial samples. *T-Comm.* No. 1, pp. 48-50.
8. Shabunin, Yu.E. Mitelman, N.S. Knyazev (2014). *Measurement parameters of antennas.* Yekaterinburg. 56 p.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:26 Page 36

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ДВУХМОДОВЫЙ ФИЛЬТР НА ОТТЕКАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10278

Орлов Виктор Семенович,
МТУСИ, Москва, Россия,
filtrov-pav@yandex.ru

Ключевые слова: *оттекающая поверхностная акустическая волна, двухмодовый фильтр, звено, каскад, преобразователь, отражательная решетка, вносимые потери, избирательность.*

В традиционной структуре звена двухмодового фильтра внутренние отражения оттекающих поверхностных акустических волнах (ПАВ) от электродов преобразователей приводят к образованию несимметричной АЧХ с пологим высокочастотным скатом и "плечом" затухания на уровне -(10-15) дБ. Кроме того, зазоры между входным и выходными ВШП представляют акустические неоднородности, вызывающие пульсации АЧХ в полосе пропускания, и являются источниками дополнительных потерь из-за переизлучения энергии ПАВ в объемные волны. Описывается конструкция СВЧ двухкаскадного фильтра на оттекающих ПАВ, позволяющая существенно снизить влияние у указанных эффектов. На частоте 1310 МГц описываемая конструкция позволяет реализовать широкую полосу пропускания BW3=8,7%, близкую к предельно возможной, и обеспечивает высокую избирательность более 52-56 дБ вблизи полосы пропускания и не менее 43-48 дБ в широком диапазоне частот до 3,0 ГГц. Подавление "плеча" на высокочастотном скате АЧХ до 52-54 дБ достигалось как за счет применения отражательных решеток между преобразователями, выполняющих функции дополнительных частотно-селективных элементов акустического тракта, так и путем варьирования пространственного шага в группах электродов преобразователей и отражательных решеток с последующей оптимизацией. Снижение резистивных потерь обеспечивалось за счет использования параллельно включенных звеньев в каждом каскаде. В отличии от аналогов, для изготовления описываемой конструкции применялись стандартные технология изготовления и материалы, что позволяет использовать конструкцию в качестве базовой.

Информация об авторе:
Орлов Виктор Семенович, *д.т.н., главный научный сотрудник, МТУСИ, Москва, Россия*

Для цитирования:
Орлов В.С. Широкополосный двухмодовый фильтр на ПАВ с неэквидистантными электродами преобразователей и отражательных решеток // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 36-45.

For citation:
Orlov V.S. (2019). Wideband Two-Mode Leaky Surface Acoustic Wave Filter with Non-Equidistant Electrodes of Transducers and Reflecting Gratings . *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 36-45. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:26 Page 37

Введение

Фильтры на оттекающих поверхностных акустических волнах (ПАВ) являются одними из ключевых компонентов СВЧ трактов помехозащищенной аппаратуры мобильной и спутниковой связи. Расширение сервисных функций аппаратуры, постоянное усложнение используемых сигналов, необходимость уплотнения каналов связи, требует расширения относительных полос пропускания применяемых фильтров при одновременном уменьшении их вносимых потерь, улучшении прямоугольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и избирательности по соседнему каналу.

Во входных трактах помехозащищенной аппаратуры очень часто применяются фильтры на оттекающих ПАВ с резонаторами, использующими продольную акустическую связь двух или более рабочих мод, благодаря широкому интервалу реализуемых полос пропускания, приемлемой избирательности, а также сравнительной простоте построения балансных структур и возможности проектирования фильтров с несимметричными входными и выходными импедансами (50/100 Ом, 100/250 Ом и т.д.). При этом с целью повышения избирательности до 45-55 дБ в широком диапазоне частот обычно используются 4-х полюсные фильтры из двух каскадов, электрически включенных последовательно.

Главными недостатками традиционных конструкций двухмодовых фильтров, использующих резонирующие 1-ю и 3-ю акустические моды оттекающих ПАВ, являются сравнительно узкие реализуемые полосы пропускания BW3=2-4% при относительно высоких вносимых потерях 2,5-3,0 дБ, которые растут с расширением полосы пропускания, а также несимметричная АЧХ с пологим высокочастотным скатом и "плечом" на этом скате на уровне порядка –(20-25) дБ, что ограничивает избирательность по соседнему каналу [1].

Поскольку предельно достижимая полоса пропускания двухмодовых фильтров на оттекающих ПАВ в первую очередь определяется коэффициентом k^2 электромеханической связи (КЭМС) используемого материала подложки, то естественным решением проблемы расширения полосы пропускания является применение пьезоэлектрических кристаллов с высоким k^2 типа ниобата лития различных кристаллографических ориентаций. Так, в работах [1, 2] описываются двухмодовые фильтры на оттекающих ПАВ, изготовленные на подложках из ниобата лития среза $yxl/64^0$, имеющего эффективный k^2=11 % . Для 4-х полюсных двухкаскадных фильтров со средней частотой 836 МГц относительные полосы пропускания по уровню -3 дБ составляли около BW3=3,9%, вносимые потери были IL=2,1-2,5 дБ, а подавление "плеча" не превышало 24-25 дБ.

Использование других срезов ниобата лития с более высокими КЭМС: среза $yxl/49^0$ с k^2=15,7% и среза $yxl/41^0$ с k^2=17,2%, позволило расширить полосы пропускания до BW3=6,2% и BW3=7,1% соответственно на частотах 405-446 МГц [3]. Указанные значения эффективного КЭМС и полос пропускания достигались при относительной толщине алюминиевых электродов резонаторов h/λ=0,05-0,06, где λ- длина акустической волны на средней частоте. Однако подавление "плеча" на пологом высокочастотном скате АЧХ в этих фильтрах также не превышало 22-24 дБ.

В работе [4] представлен шестимодовый фильтр со сверхширокой полосой пропускания BW3=12,6% на частоте 850 МГц. Для получения такой полосы использовался уникальный срез ниобата лития $yxl/15^0$, в котором распространяется волна SH-типа, существующая только под решеткой со значительной массовой нагрузкой. Условия существования этой волны в решетке и высокий эффективный КЭМС около k^2=25% для нее обеспечивались за счет применения тяжелых и толстых медных электродов в резонаторах (h/λ=0,10-0,12). С целью ослабления многочисленных пульсаций в полосе пропускания из-за поперечных мод между толстыми суммирующими шинами, авторы работы [4] были вынуждены использовать дополнительные методы подавления этих паразитных эффектов.

Все перечисленное (уникальный срез, особые условия существования используемой волны, толстые медные электроды и т.д.) существенно усложнило процедуру расчетов конструкции многомодового фильтра, повысило трудоемкость ее оптимизации, а также усложнило технологию изготовления и увеличило чувствительность конструкции к технологическим погрешностям.

В настоящей статье описывается конструкция двухмодового фильтра на оттекающих ПАВ с широкой относительной полосой пропускания BW3=8,7% на частоте 1310 МГц, обеспечивающая высокую избирательность более 52-56 дБ вблизи полосы пропускания и не менее 43-48 дБ в широком диапазоне частот до 3,0 ГГц. Подавление "плеча" на высокочастотном скате АЧХ до 52-56 дБ достигалось как за счет применения дополнительных отражательных решеток между преобразователями, выполняющих функции частотно-селективных элементов акустического тракта [5], так и за счет варьирования пространственного шага в части электродов преобразователей и дополнительных отражательных решеток [6]. В качестве материала подложки фильтра применялся ниобат лития широко распространенного среза $yxl/41^0$ с высоким k^2= 17,2%. Изготовление алюминиевых электродов преобразователей и отражательных решеток с типичной толщиной h/λ=7 % осуществлялось по стандартному технологическому процессу обратной фотолитографии.

Для проектирования двухмодового фильтра с такими неэквидистантными электродами в преобразователях и решетках использовалась модифицированная модель эквивалентных схем [7].

Модифицированная модель эквивалентных схем для фильтров с продольной акустической связью резонаторов

На рис. 1а показана топологическая схема одного звена двухполюсного фильтра с продольной акустической связью резонаторов для двух нечетных 1-й и 3-й акустических мод. В традиционной конструкции фильтра такое звено состоит из входного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) 1, двух электрически параллельно включенных выходных преобразователей ВШП2 и ВШП3, а также двух короткозамкнутые отражательных решеток ОР1 и ОР2. Электроды элементов акустического тракта (ЭАТ) выполнены эквидистантными, но их пространственные периоды для разных ЭАТ фильтра отличаются друг от друга. Перечисленные ЭАТ в совокупности с зазорами между ними, являющимися акустическими линиями передачи (АЛП), образуют резонансную полость для различных акустических мод [1].

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:27 Page 38

На рис.1б условно представлено распределение энергии в резонансной полости для рабочих 1-й и 3-й акустических мод А и В, а также для дополнительной моды С, имеющей максимальные амплитуды в зазорах между входным ВШП1 и выходными ВШП2, ВШП3 [6, 8].

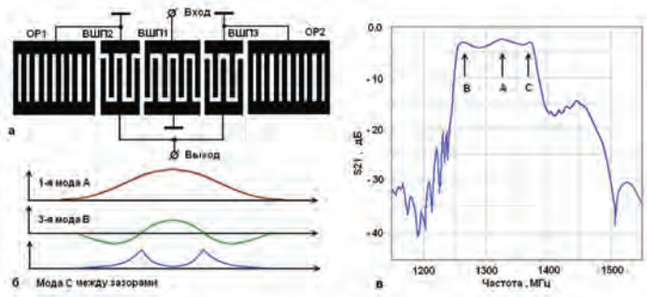


Рис. 1. Двухполюсное звено фильтра с продольной акустической связью резонаторов: а – топологическая схема; б – распределение энергии 1-й, 3-й акустических мод А, В в резонаторах и моды С между зазорами; в – влияние акустических мод на формирование АЧХ звена фильтра

В традиционной – конструкции двухмодового фильтра (рис. 1а), вследствие внутренних отражений оттекающих ПАВ от электродов преобразователей происходит частичное самосогласование реактивных компонент входных проводимостей преобразователей, что приводит к полезному эффекту - снижению вносимых потерь. Но при этом максимумы действительных компонент проводимостей входного и выходных ВШП смещаются в сторону низких частот, причем на разную величину. Это вызывает появление асимметричной АЧХ фильтра с более пологим высокочастотным скатом и "плечом" на этом скате АЧХ с затуханием около 15-20 дБ. Кроме того, максимумы проводимостей, соответствующих рабочим 1-й и 3-й модам А и В, находятся на разных частотах, что увеличивает пульсации АЧХ в полосе пропускания [2]. Наличие же дополнительной моды С, резонирующей между акустическими неоднородностями, которыми являются зазоры как между преобразователями, так и между преобразователями и отражательными решетками (рис. 1б), не только увеличивает количество и амплитуды пульсаций АЧХ в полосе пропускания фильтра (рис. 1в) [6], но и вызывает увеличение вносимых потерь из-за рассеяния части энергии отекающих ПАВ в энергию объемных волн на этих неоднородностях [8].

Другими источниками вносимых потерь в двухмодовых фильтрах являются резистивные потери, потери на распространение оттекающих ПАВ, накопление энергии объемных акустических волн (ОАВ) на краях электродов, излучение акустической энергии суммирующими шинами[8] и т.д.

Наиболее распространенными моделями, используемыми при проектировании устройств как на незатухающих рэлеевских ПАВ, так и затухающих оттекающих ПАВ, позволяющими учесть перечисленные выше эффекты в двухмодовых фильтрах, являются модель связанных волн [4, 8] и модель эквивалентных схем [3, 7]. Модель эквивалентных схем оперирует с элементарной ячейкой устройства на оттекающих ПАВ, представляющей пленочный электрод ВШП или отражающей решетки, окруженный слева и справа половинами зазоров с соседними электродами (рис. 2). Такая элементарная ячейка позволяет с высокой точностью смоделировать как одиночную акустическую неоднородность (электрод или зазор), так и их совокупность в элементах акустического тракта, например, в преобразователях и отражательных решетках с варьированием пространственного шага электродов. Поэтому модель эквивалентных схем была выбрана для расчетов в настоящей работе.

В модифицированной модели эквивалентных схем используется следующая иерархия ее элементов:

– элементарные ячейки электродов с заданной полярностью напряжения на них;

– элементарные ячейки металлизированных участков пьезоэлектрической подложки без наряжения;

– элементарные ячейки зазоров или неметаллизированных участков пьезоэлектрической подложки;

– элементарные секции, например, в преобразователе или в отражающей решетке, объединяющие

несколько периодически повторяющиеся комбинаций элементарных ячеек;

– элементы акустического тракта (ЭАТ- преобразователи, отражающие решетки, акустические линии передачи, фазовращатели, многополосковые ответвители, акустические поглотители, электромагнитные экраны-фазовращатели и т.д.), образованные совокупностями элементарных секций;

– электро-акустические устройства (линии задержки, трансверсальные фильтры, резонаторы, резонаторные фильтры и т. д.), сформированные из нескольких элементов акустического тракта в соответствии со структурной схемой устройства.

Каждая элементарная ячейка или элементарная секция описывается электро-акустическим шестиполюсником с двумя акустическими входами 1-1, 2-2 и одним электрическими входом 3-3, в котором механическая сила и скорость распространения ПАВ заменяются эквивалентными напряжениями и токами (рис. 2).

Для описания свойств элементарных ячеек и секций используется смешанная матрица передачи $[a_{ij}]$, описывающая связь напряжений и токов на входах 1-1, 2-2 и 3-3 электроакустического шестиполюсника следующим образом [7]:

$$\begin{cases} U_2 = a_{11}U_1 + a_{12}I_1 + a_{13}U_3 \\ I_2 = a_{21}U_1 + a_{22}I_1 + a_{23}U_3 \\ I_3 = a_{31}U_1 + a_{32}I_1 + a_{33}U_3 \end{cases} \quad (1)$$

и имеющая вид:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ a_{ij} \\ \\ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Здесь $i, j = 1,2,3$, a_{11}, a_{22}, a_{23}, a_{31} – безразмерны, a_{12}, a_{13}, a_{32}, a_{33} имеют размерность проводимостей, a_{21} – имеет размерность сопротивления [7].

Для элементарной ячейки, расположенной **в преобразователе под электродом** с условной положительной полярностью (рис.2а), смешанная матрица передачи $[a_{ij}]_m$ имеет вид:

$$[a_{ij}]_m = \begin{bmatrix} cos(\theta_m) & i \cdot sin(\theta_m)/Z_m & -i \cdot r \cdot sin(\theta_m)/Z_m \\ i \cdot Z_m \cdot sin(\theta_m) & cos(\theta_m) & r \cdot (1 - cos(\theta_m)) \\ r \cdot (1 - cos(\theta_m)) & -i \cdot r \cdot sin(\theta_m)/Z_m & i \cdot r^2 \cdot sin(\theta_m)/Z_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:28 Page 39

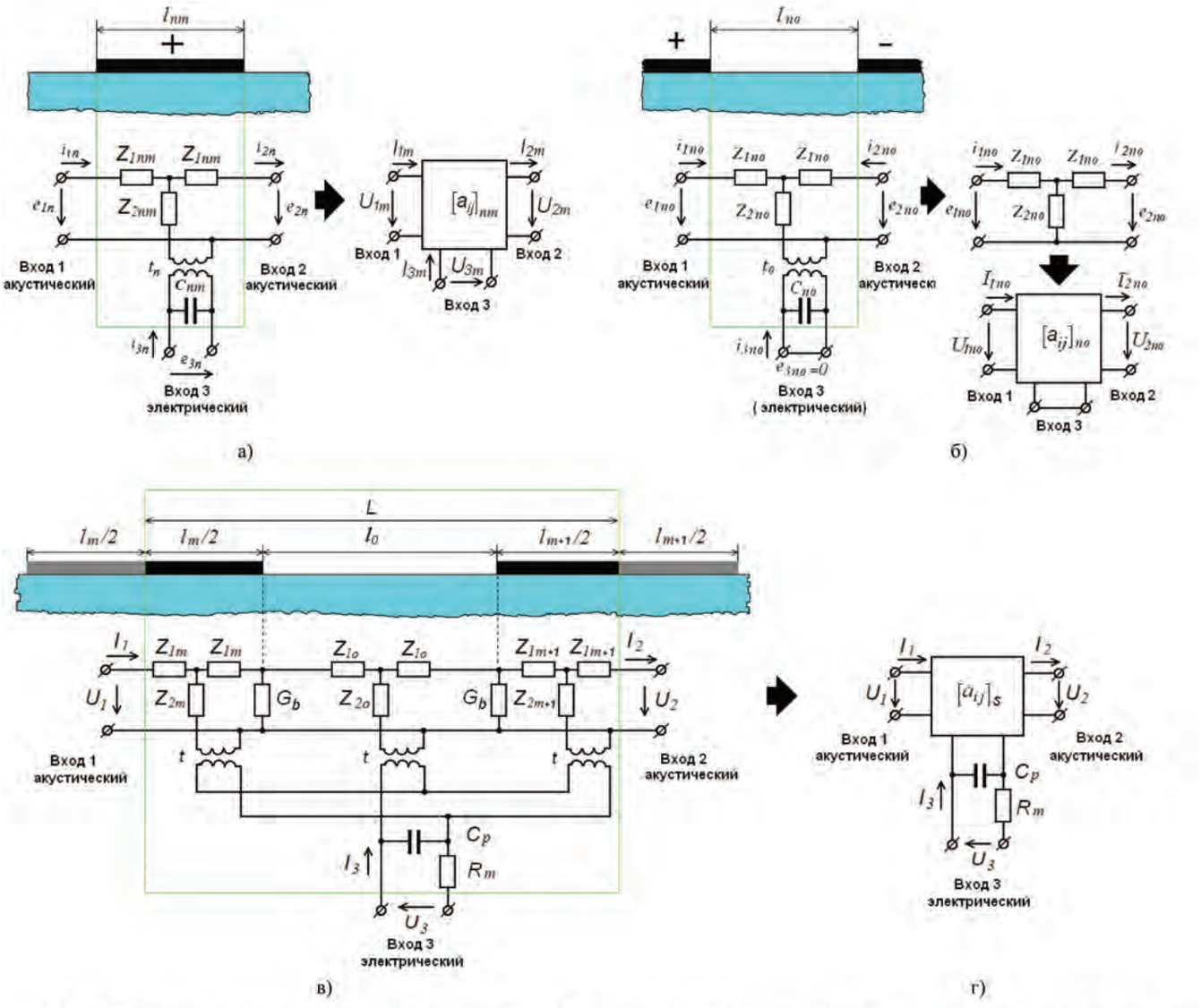


Рис. 2. Топология и эквивалентные схемы элементов ВШП: а – элементарная ячейки электрода; б – элементарная ячейки зазора; в – элементарная секция с учетом резистивных потерь в каждом электроде

где Z_m и θ_m – соответственно акустическое сопротивление и фазовый угол, описывающий задержку акустического сигнала при прохождении металлизированного участка пьезоэлектрической подложки протяженностью l_m, t – коэффициента трансформации энергии оттекающей ПАВ.

Смешанная матрица передачи $[a_{ij}]_0$ элементарной ячейки **зазора, окруженного в преобразователе** слева прилегающим электродом положительной полярности, а справа-электродом отрицательной полярности (рис. 2б), имеет тот же вид, что и (3) с заменой Z_m и θ_m соответственно на акустическое сопротивление Z_0 и фазовый угол θ_0, описывающий задержку акустического сигнала при прохождении неметаллизированного участка пьезоэлектрической подложки с протяженностью l_0 [7]. Поскольку в элементарной ячейке зазора напряжение на электрическом входе отсутствует, то на эквивалентной схеме ячейки зазора электрический вход закорочен (U_3=0), а элементы матрицы $[a_{ij}]_0$ ячейки принимают значения $a_{11}=a_{21}=cos\theta_0$, $a_{12}=i\cdot sin\theta_0/Z_0$, $a_{12}=i\cdot Z_0\cdot sin\theta_0$, $a_{13}=a_{23}=a_{31}=a_{32}=a_{33}=0$. При этом ячейка может быть представлена уже четырехполюсником.

В качестве периодической элементарной секции эквидистантного двунаправленного встречно-штыревого преобразователя выбрана секция, включающая в себя пять элементарных ячеек: зазор шириной l_0, два прилегающих к зазору справа и слева электрода, каждый из которых имеет половинную ширину $l_m/2$ и один из которых находится под положительным потенциалом, а другой – под отрицательным потенциалом, а также две ячейки перехода G_b, включенные

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:28 Page 40

на границах электродов с зазором и моделирующие эффекты рассеивания и накопления энергии оттекающих ПАВ, но не имеющие топологического эквивалента. Выбор такой элементарной секции позволяет установить простую связь с используемой для синтеза моделью дельта-источников с расположением центров возбуждения в середине электродов преобразователей [8]. Топологическая и эквивалентная схемы элементарной секции, используемые в модифицированной модели для преобразователя, показаны на рис. 2в.

Величины сопротивлений Z_i на рис. 2 описываются соотношениями [7]:

$$Z_{10} = i \cdot Z_0 \cdot tg(\theta_0/2),\ Z_{20} = -i \cdot Z_0 \cdot cosec(\theta_0),$$
$$Z_{1m} = i \cdot Z_m \cdot tg(\theta_m/2),\ Z_{2m} = -i \cdot Z_m \cdot cosec(\theta_m),$$
$$Z_0 = 1 + r_r,\ Z_m = 1 - r_r, \quad (4)$$
$$\theta_0 = \pi \cdot f \cdot l_0/v = 0{,}5 \cdot \pi \cdot (1 - k_m) \cdot f/f_t,$$
$$\theta_m = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_m/v = \pi \cdot k_m \cdot f/f_t,\ t^2 = f \cdot C_p \cdot k^2,$$
$$C_p = 2 \cdot A \cdot (e'_{pr} + 1) \cdot (6{,}5 \cdot k_m^2 + 1{,}08 \cdot k_m + 2{,}37) \cdot 10^{-12}.$$

Здесь f – частота возбуждения; f_t – центральная частота преобразователя; k^2–квадрат коэффициента электромеханической связи; $k_m = l_m/(l_0 + l_m)$ – коэффициент металлизации; r_r – коэффициент отражения оттекающей ПАВ на границе электрода; t – коэффициента трансформации энергии ПАВ; v – эффективная фазовая скорость ПАВ под преобразователем; W – абсолютная апертура преобразователя; C_p – статическая емкость пары электродов; e'_{pr} – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; I_1, I_2, U_1, U_2 – эквивалентные токи и напряжения в акустическом тракте, соответствующие механическим смещениям и напряжениям; I_3, U_3 – ток и напряжение на электрическом входе 3-3.

Поскольку элементарные ячейки зазора, электрода и перехода, входящие в состав элементарной секции на рис. 2б и представленные электроакустическими шестиполюсниками, акустически включены последовательно, а электрически параллельно, то, следуя правилам соединения таких шестиполюсников, i-я элементарная секция в преобразователе также может быть представлена электроакустическим шестиполюсником, показанным на рис. 2г. Напряжения и токи на электрическом и акустических входах элементарной секции преобразователя связаны между собой соотношением

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_1 \\ I_3 \end{bmatrix}_S = \begin{bmatrix} a_{ij} \end{bmatrix}_S * \begin{bmatrix} I_2 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}_S \quad (5)$$

При этом элементарная секция ВШП описывается смешанной матрицей передачи вида

$$[a_{ij}]_S = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

элементы $[a_{ij}]$ которой получены при последовательном каскадировании матриц пяти элементарных ячеек электродов и зазоров, начиная с правого края секции.

Эквивалентная схема элементарной секции в **отражающей решетке** аналогична схеме для элементарной секции встречно-штыревого преобразователя на рис.2в при условии короткого замыкания электрического выхода, т.е. при $U_3 = 0$.

В многоэлектродном элементе акустического тракта (например, в **преобразователе на рис. 2а или в отражающей решетке на рис. 2б)** элементарные секции акустически соединены последовательно, а электрически параллельно. Поэтому полная эквивалентная схема такого элемента ЭАТ формируется путем последовательного соединения необходимого количества элементарных секций, эквивалентные схемы которых, например, показаны на рис. 3. В алгоритме программы анализа полученной эквивалентной схемы преобразователя или отражающей решетки расчет проводится последовательным каскадированием матриц элементарных секций типа (6), начиная с правого края ЭАТ. При необходимости, от результирующих смешанных матриц передачи преобразователя $[A]_{ВШП}$ или решетки $[A]_{ОР}$ можно перейти к их матрицам проводимостей $[Y]_{ВШП}$ и $[Y]_{ОР}$ или к матрицам рассеяния $[S]_{ВШП}$ и $[S]_{ОР}$. Более подробно расчет ЭАТ (преобразователей, отражающих решеток и акустических линий передачи) по модифицированной модели эквивалентных схем описан в [7]. После определения соответствующих матриц (*A-, Y-* или *S-* матриц) элементов акустического тракта в соответствии со структурной схемой фильтра на оттекающих ПАВ вычисляется его сквозная макро-матрица $[A]_{ФИЛ}$, $[Y]_{ФИЛ}$ или $[S]_{ФИЛ}$ уже как электрического четырехполюсника (рис.3в) и определяются частотные характеристики устройства в целом: коэффициенты передачи *S13* и *S31* (или АЧХ), фазо-частотная характеристика (ФЧХ), групповое время запаздывания (ГВЗ), коэффициенты отражения *S11* и *S12* (или КСВ по входу и выходу) и т. д.

Модифицированная модель эквивалентных схем была разработана с целью повышения точности моделирования устройств как на незатухающих рэлеевских ПАВ, так и затухающих оттекающих ПАВ за счет учета следующих эффектов второго порядка:

– отражения ПАВ от электродов с учетом массовой нагрузки, пьезоэлектрического эффекта и накопления энергии под электродам материала, а также профиля электродов;

– влияния физических характеристик материала положки при его выбранной кристаллографической ориентации;

– конечности проводимости электродов (резистивных потерь), зависящей от материала и технологии нанесения металлических пленок;

– распределения зарядов на электродах в зависимости от их соседнего окружения (свободные зазоры, электроды под напряжением, изолированные электроды, закороченные электроды и т.д.);

– потерь на рассеяние при распространении оттекающих ПАВ;

– влияния согласующих цепей и внешних паразитных элементов;

– сигнала электромагнитной наводки и некоторых других.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:29 Page 41

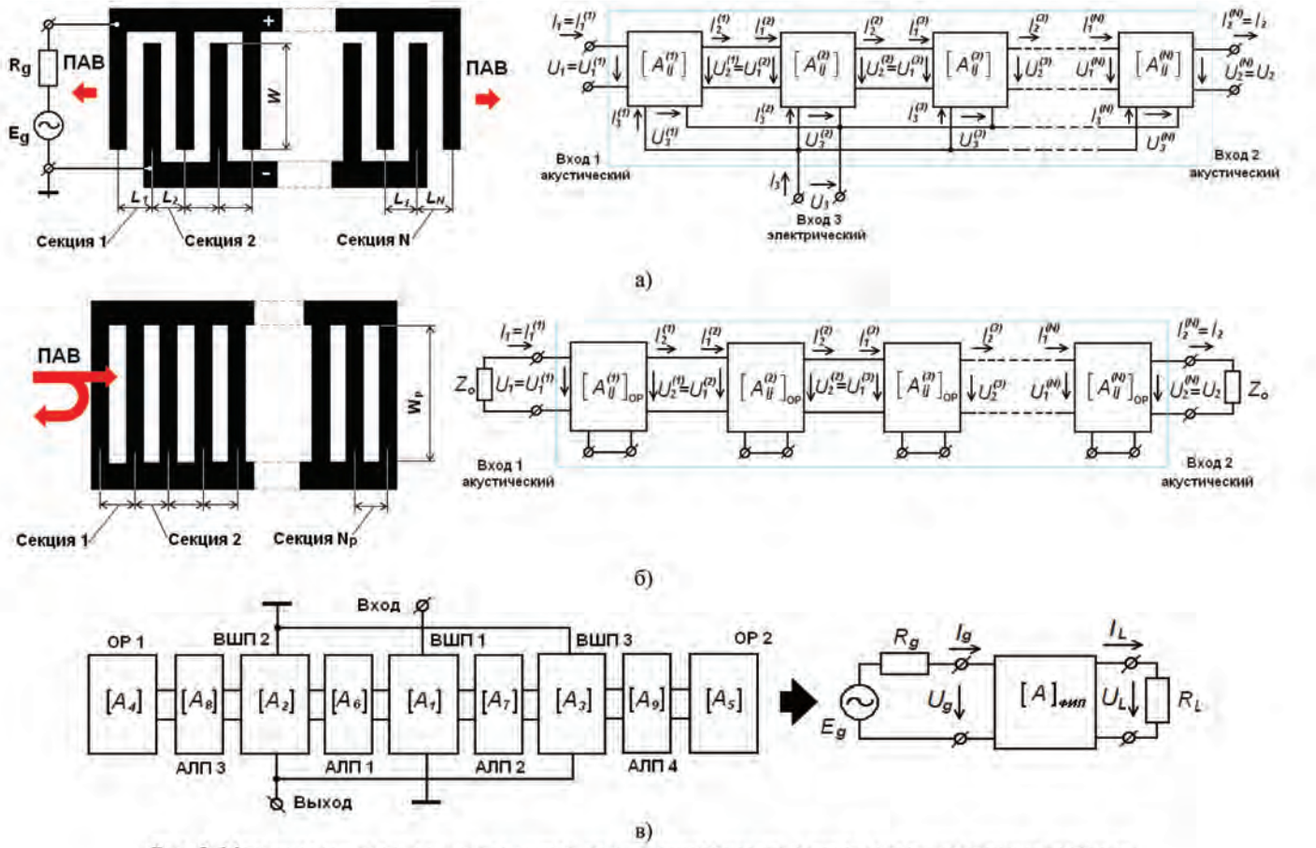


Рис. 3. Моделирование основных элементов акустического тракта с использованием матриц передачи: а – ВШП; б – короткозамкнутой отражательной решетки; в – одного звена двухмодового фильтра

Численные данные, вводимые в программное обеспечение на основе модифицированной модели в качестве исходных (коэффициенты отражения от электродов, коэффициенты накопления энергии и коэффициенты потерь на распространение ПАВ, значения проводимости металлических пленок электродов, характеристики материалов подложек (эффективная диэлектрическая проницаемость, коэффициент электромеханической связи и т.д.) позволяют адаптировать программное обеспечение к конкретной технологии изготовления и используемым материалам. Конечное представление устройства на оттекающих ПАВ в виде четырехполюсника, описываемого макро-матрицей проводимостей, позволяет использовать созданное на основе модифицированной модели программное обеспечение совместно со стандартными симуляторами электрических цепей типа AWR Microwave Office, SPICE, Micro-Sim и т.д. для расчета характеристик радиочастотных трактов аппаратуры, в которой устройства на ПАВ используются.

Моделирование двухмодовых фильтров с неэквидистантными электродами в преобразователях и отражательных решетках резонаторов

В настоящей работе на примере двухкаскадного фильтра с центральной частотой 1310 МГц и полосой пропускания BW=114 МГц (8,7%) проведено исследование различных модификаций структур его звеньев, позволяющих реализовать широкую полосу пропускания фильтра до (9-10)%, близкую к предельно возможной, одновременно с высокой избирательностью 45-55 дБ и малыми вносимыми потерями 3-4 дБ. При этом на последовательных этапах проектирования выполнялась только одна модификация структуры.

Как уже указывалось выше, в двухмодовых фильтрах традиционной конструкции (рис. 1а и 4а) неметаллизированные зазоры как между соседними преобразователями, так и между ВШП и отражательными решетками вследствие скачка акустического импеданса представляют собой акустические неоднородности на пути распространения оттекающих ПАВ, что приводит к искажениям частотных характеристик фильтра вследствие дополнительных отражений ПАВ от зазоров и увеличению вносимых потерь из-за трансформации энергии ПАВ на них в энергию объемных волн [8]. Гибким инструментом, позволяющим сгладить такие акустические неоднородности и существенно улучшить частотные характеристики фильтра, показало себя варьирование пространственного шага (расстояния между центрами) [4, 6, 8] примыкающих к зазору групп электродов (от 3 до 10-15 штук) в соседних ВШП (рис. 4б). При этом распределение пространственного шага таких неэквидистантных электродов может быть выполнено как линейным, например, с целью уменьшения вносимых потерь [10], так и скачкообразным вследствие оптимизации шага по различным алгоритмам, используемым для достижения заданной целевой

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:30 Page 42

функции (минимума потерь, минимума неравномерности АЧХ, минимума КСВ, максимума подавления "плеча" на высокочастотном скате АЧХ или иного параметра) [6, 11, 12].

На рис.4 представлены для сравнения исследуемые топологические схемы одного звена фильтра как с эквидистантными (рис.4а), так и с неэквидистантными (рис.4б) электродами в ВШП1, 2, 3.

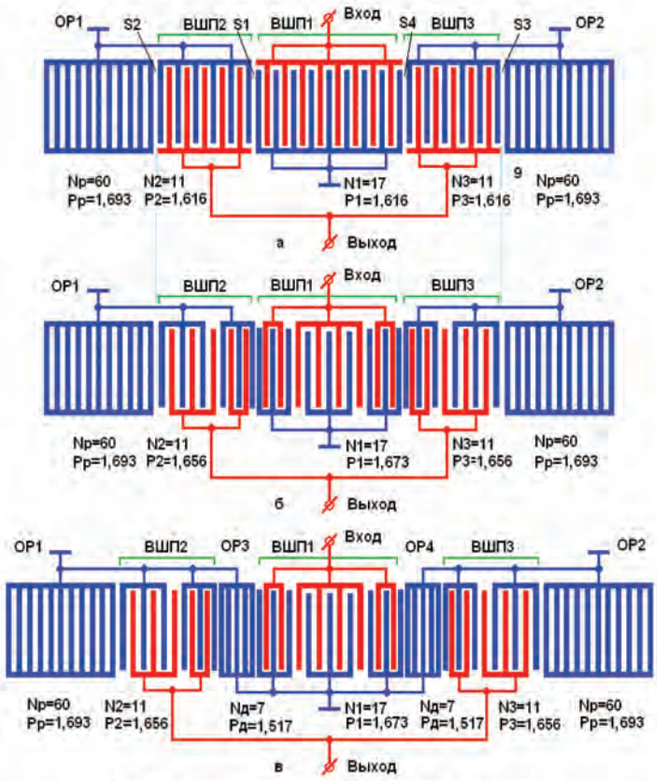


Рис. 4. Топологические схемы звена фильтра:
а – с эквидистантными электродами ВШП1-3 и решеток ОР1, ОР2;
б – с неэквидистантными электродами в ВШП1-3 и эквидистантными электродами решеток ОР1, ОР2; в – с неэквидистантными электродами ВШП1-3 и дополнительных решеток ОР3, ОР4

На этом же рисунке под каждым элементом акустического тракта указано количество N и пространственный шаг P электродов в его регулярной части до проведения процедуры оптимизации. Коэффициент металлизации как в преобразователях ВШП1-3, так и в решетках ОР1, ОР2 был выбран Км=0,53, а относительная толщина алюминиевых электродов во всех ЭАТ составляла h/λ=6,5%, где λ- длина оттекающей ПАВ на средней частоте фильтра. В качестве материала подложки использовался ниобат лития среза $yxl/41^0$, обеспечивающий высокий КЭМС около k^2= 17,2%.

На первом этапе звено двухмодового фильтра на частоту 1310 МГц и с полосой пропускания BW3=114 МГц проектировалось с традиционным эквидистантным расположением электродов в преобразователях ВШП1-3 и в основных отражательных решетках ОР1, ОР2 (рис.4а). На рис. 5а, график 1, показана частотная характеристика *S21* такого традиционного звена (рис. 4а) с эквидистантными электродами как преобразователей ВШП1-3 при их шаге P1=1,616 мкм, так и основных отражательных решеток ОР1, ОР2 с шагом электродов Pр=1,693 мкм. Как видно из рис. 5а, подавление "плеча" на частоте около 1520 МГц составляло всего 11-12 дБ, что явно недостаточно.

На втором этапе проектирования для улучшения избирательности на частотах вблизи 1460-1560 МГц в преобразователях ВШП1-3 были выделены группы по 5 электродов, примыкающих к зазорам между ВШП1,2 и между ВШП1,3 (рис. 4б), а в выделенных группах шаги электродов варьировались в пределах 1,4-1,67 мкм. Чтобы сохранить ширину полосы пропускания традиционной структуры, исходные шаги входного ВШП1 и выходных ВШП2,3 выполнялись различными, т.е. P1=1,673 мкм и P2,3=1,656 мкм. Из-за требуемой широкой полосы пропускания количество электродов в преобразователях и, как следствие, в группах электродов с варьированием пространственного шага, было ограничено (N1=17, $N_д$2,3=11). Это, в свою очередь, ограничило возможности оптимизации, в результате чего увеличить подавление "плеча" на частотах вблизи 1460-1560 МГц каждом звене удалось только на 7-8 дБ, т.е. до 17-22 дБ (рис. 5а, график 2).

Отражательные решетки из короткозамкнутых электродов играют важную роль в работе резонаторных фильтров. Так, основные решетки ОР1 и ОР2 из периодических электродов на рис. 4а формируют резонансную полость, в которой распространяются и резонируют оттекающие ПАВ, возбуждаемые входным преобразователем ВШП1. Дополнительные эквидистантные решетки, иногда вводимые между входным и выходными ВШП, обычно служат для регулировки акустической связи между ними и полосы пропускания фильтра [5,10]. В обоих случаях частотно-зависимые свойства отражательной решетки для оттекающих ПАВ с учетом потерь описываются с помощью коэффициентов отражения, прохождения и рассеяния.

В частотной характеристике коэффициента прохождения отражательной решетки конечной протяженности можно выделить три участка [2, 13]: полосу заграждения, в которой распространение оттекающей ПАВ существенно ограничено вследствие сильных внутренних отражений от периодических электродов; участок ниже полосы заграждения со сравнительно низким затуханием и участок выше полосы заграждения с крутой характеристикой затухания из-за трансформации энергии оттекающих ПАВ в энергию объемных волн. Для образования стоячей оттекающей ПАВ в резонансной полости основные и дополнительные отражательные решетки ОР1, ОР2 в двухмодовом фильтре обычно проектируются таким образом, чтобы полосы заграждения решеток совпадали с полосой пропускания преобразователей [1-3]. Но если полосу заграждения отражающей решетки сместить вниз по частоте за пределы полосы пропускания преобразователей, то она превращается в частотно-избирательный элемент акустического тракта [14, 15].

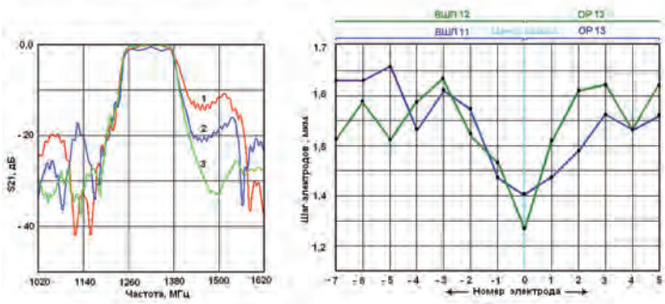
Поэтому на третьем этапе проектирования с целью дальнейшего улучшения избирательности звена рассматриваемого широкополосного фильтра между его преобразователями ВШП1,2 и ВШП1,3 с неэквидистантными электродами были введены дополнительные отражательные решетки ОР3 и ОР4 с исходным шагом электродов $P_д$=1,517 мкм, играющие роль таких дополнительных частотно-селективных элементов (рис.4в), а пространственные шаги дополнительных решеток ОР3 и ОР4 также варьировались в пределах 1,27-1,62 мкм.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:30 Page 43

Распределение шагов в группах неэквидистантных электродов преобразователей ВШП1,2 и дополнительных решеток ОР3,4 после оптимизации показано на рис. 5б. Также как и на предыдущем этапе проектирования, исходные шаги электродов преобразователей ВШП1,2 составили соответственно P1=1,673 мкм и P2=1,656 мкм для сохранения широкой полосы. Структуры преобразователей и решеток в звене двухмодового фильтра в целом симметричны относительно центра входного ВШП1.

В результате введения дополнительных решеток ОР3,4 и варьирования шага их электродов, избирательность звена фильтра на частотах вблизи 1460-1560 МГц увеличилась до 25-33 дБ (рис. 5а, график 3), что уже достаточно для использования такого звена в двухкаскадном фильтре. Однако

дополнительные решетки ОР3,4 увеличивают расстояние между входным ВШП1 и выходными ВШП2,3, что приводит к некоторому росту вносимых потерь звена из-за затухания оттекающих ПАВ на этом увеличенном расстоянии.



а б

Рис. 5. Расчетные характеристики одного звена фильтра (а) и распределение шагов электродов преобразователей и отражательных решеток (1 – структура на рис. 4а; 2 – структура на рис.4.б; 3 – структура на рис. 4в)

Чтобы обеспечить согласование входного и выходного сопротивлений широкополосного фильтра с внешним трактом 50/50 Ом, апертуры его преобразователей пришлось бы увеличить до W=200 мкм или до 64λ из-за малого числа электродов в последних, что привело бы к росту резистивных потерь. Для снижения резистивных потерь в каждом из двух каскадов рассматриваемого фильтра пара парциальных звеньев 1,2 и 2,3 включалась электрически параллельно, а акустически- последовательно, что позволило вдвое уменьшить апертуру преобразователей до W=100 мкм или 32λ. В итоге топологическая схема пьезоэлемента широкополосного фильтра приобрела вид, показанный на рис. 6.

Резистивные потери моделировались путем введения сопротивления *Rm* в элементарную секцию каждого электрода преобразователя (рис. 2в). По сравнению с другими моделями, например, использующими дискретное сопротивление, отображающие резистивные потери в преобразователе в целом [16], модифицированная модель эквивалентных схем позволяет повысить точность расчетов характеристик как отдельных элементов акустического тракта звена, так параллельно включенных звеньев фильтра (рис. 7а). Акустическая изоляция параллельных звеньев 1,2 и 3,4 друг от друга в каждом каскаде фильтра осуществлялась сдвоенной отражательной решеткой ОР12+ОР21. Для уменьшения габаритов пьезоэлемента число электродов в такой сдвоенной решетке было сокращено со 120 до 96 без ухудшения качества акустической изоляции.

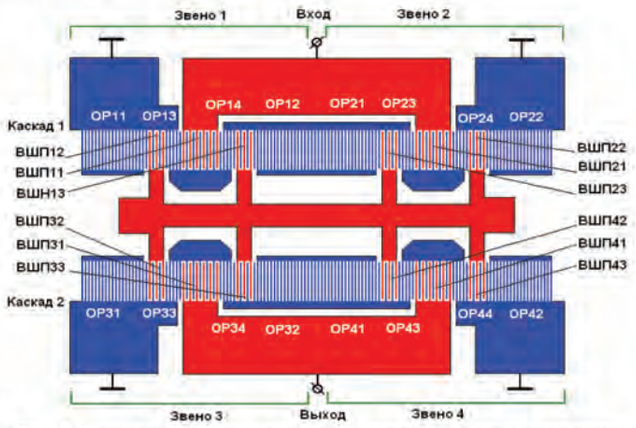


Рис. 6. Топологическая схема четырехзвенного двухкаскадного фильтра с неэквидистантными электродами преобразователей и дополнительных отражательных решеток

Использование заземленных дополнительных решеток ОР13, ОР14 и ОР23, ОР24, соединенных последовательно на пьезоэлементе (рис. 6), позволило отказаться от заземляющих контактных площадок, обычно размещаемых между каскадами, и от соответствующих проволочных перемычек.

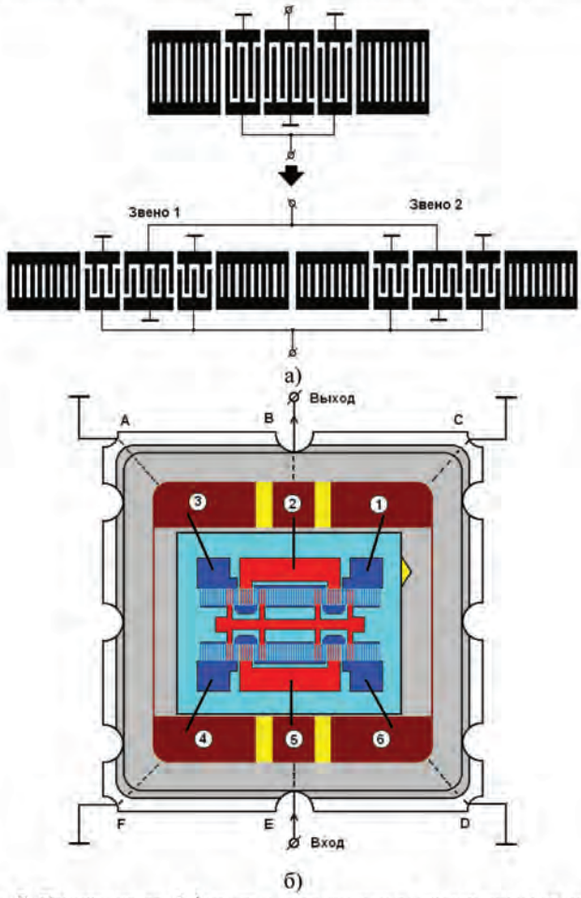


Рис. 7. Двухкаскадный фильтр с параллельным включением звеньев: а – схема включения звеньев в одном канале; б – схема сборки пьезоэлемента в корпус SMD 3,8x3,8x1,4 мм

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:31 Page 44

Это позволило сблизить каскады между собой и дополнительно уменьшить габариты пьезоэлемента. Кроме того, исключение проволочных перемычек снизило электромагнитную наводку со входа на выход фильтра и упростило сборку пьезоэлемента в корпус. Схема сборки пьезоэлемента в миниатюрный корпус типа SMD 3,8x3,8x1,4 мм , KD-V97050, Kyocera, Япония, показана на рис. 7б.

Измеренные частотные характеристики описанного широкополосного двухкаскадного фильтра с параллельным включением звеньев в каждом каскаде приведены на рис. 8, графики 1, и близки к характеристикам, рассчитанным по модифицированной модели эквивалентных схем. Вносимые потери фильтра составили 3,42 дБ при избирательности 52-54 дБ вблизи полосы пропускания и более 43-48 дБ в широкой полосе частот 50-3050 МГц. Практически полное совпадение расчетных и измеренных характеристик наблюдалось даже в широком интервале частот 50-3050 МГц при аппаратном удалении электромагнитного сигнала (ЭМС) с помощью анализатора цепей Agilent 8753E (рис. 8, графики 2).

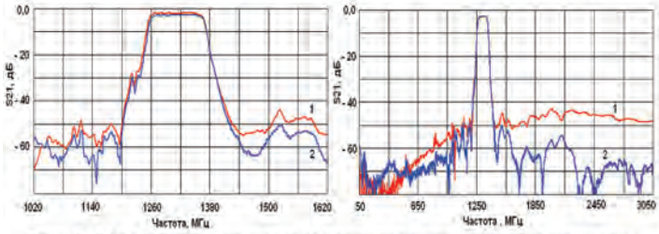


Рис. 8. Измеренные частотные характеристики двухкаскадного фильтра с параллельным включением звеньев:
а – в диапазоне 1020-1620 МГц; б – в диапазоне 50-3050 МГц
(1 – без удаления ЭМС, 2 – с удаленным ЭМС)

Заключение

Описана конструкция СВЧ двухмодового фильтра с широкой полосой пропускания около 8,7% , близкой к предельно возможной, и высокой избирательностью 52-56 дБ. Для достижения указанных параметров исследованы структуры звеньев фильтра, в которых последовательно водились следующие модификации:

-с целью расширения максимально достижимой полосы пропускания до 8,7% в качестве материала подложки использован ниобат лития среза *yxl/41*^{0}, обеспечивающий высокий КЭМС= 17,5%;

-для дополнительного подавления "плеча" на высокочастотном скате АЧХ на 7-8 дБ использовалось варьирование шага электродов входного и выходных преобразователей;

-для улучшения прямоугольности АЧХ и увеличения затухания в полосе заграждения до 52-56 дБ вблизи полосы и до 43-48 дБ в диапазоне до 3,0 ГГц между преобразователями введены дополнительные отражательные решетки также с варьированием шага электродов;

-для снижения резистивных потерь до 3,42 дБ и уменьшения габаритов фильтра, звенья в каждом каскаде включены параллельно.

Указанные параметры получены, в отличии от наиболее близкого аналога [4], с использованием распространенного среза ниобата лития и стандартной технологии изготовления. В результате описанная конструкция может быть рекомендована как базовая для реализации СВЧ фильтров на оттекающих ПАВ с широкими полосами пропускания до 9-10% и малыми вносимыми потерями 3-4 дБ.

Модифицированная модель эквивалентных схем, оперирующая с элементарными ячейками электрода и зазора, включающими дополнительный резистор, позволила с высокой точностью осуществлять расчеты с учетом эффектов второго порядка.

Благодарность

Автор приносит благодарность Крылову А.Б. за проведение необходимых измерений.

Литература

1. *Morita T., Watanabe Y., M. Tanaka M. and Nawazawa Y.* Wide-band Low Loss Double Mode SAW Filters / IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 95-104.

2. *Campbell C. K.* Longitudinal-Mode Leaky SAW Resonator Filters on 64 deg Y-X Lithium Niobate // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 42. No. 5, 1995, pp. 883-888.

3. *Ivanov P.G., Makarov V.M., Orlov V.S., Shvets V.B.* Wideband Low Loss SAW Filters for Telecommunication and Mobile Radio Application / IEEE 1996 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 61-64.

4. *Hashimoto K., Miyamoto T., Shimada K., Omori T. and Yamaguchi M. A* Wideband Multi-Mode SAW Filter Employing Pitch Modulated IDTs on Cu-Grating/15^o YX-LiNbO3- Substrate Structure / IEEE 2009International Ultrasonics Symposium Proc., pp. 915-918.

5. *Sharif M.A., Lambert C., Chen D.P. and Hartmann C.S.* Network Coupled, High Performance SAW Resonator filters / IEEE 1994 Ultrasonics Symposium Proc.1994, pp.135-138.

6.Y. Takamine, Longitudinally Coupled Resonator Type SAW Filter with an IDT having a Narrow Pitch Position . US Patent No.: US 6,583,691 B2 Date of Patent: Jun. 24, 2003. Int. Cl. HO3H 9/64

7. *Орлов В.С.* Модифицированная модель эквивалентных схем для проектирования устройств на поверхностных акустических волнах. 2002 г., 64 стр. / Официальный сайт www.saw-filters.ru Лаборатории акустоэлектронных фильтров МТУСИ . Раздел "Обзоры и Исследования". [Электронный ресурс]. Режим доступа: html://saw-filters/ свободный (дата обращения: 10.01.2019 г.

8. *Meltaus J., Hong S. S., Holmgren O., Kokkonen K., and Plessky V. P.* Double-Resonance SAW Filters // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 54, no 3, 2007, pp. 659-667.

9. *Орлов В.С., Бондаренко В.С.* Фильтры на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

10. *Макаров В.М., Иванов П.Г., Данилов А.Л., Зая В.Г.* Резонаторные фильтры ПАВ на основе дисперсионных преобразователей // Радиотехника и электроника, том 53, №3, 2008. С. 377-382.

11. *Meltaus J., Hämäläinen P., Salomaa M. M. and Plessky V. P.* Genetic Optimization Algorithms in the Design of Coupled SAW Filters / IEEE 2004 International Ultrasonics Symposium Proc., pp. 915-918.

12. *Tagawa K.* Multi-Stage Design of DMS Filters with Free & Freeze Method / 6th WSEAS 2006 International Conference on Applied Computer Science Proc., pp. 508-513.

13. *Rusakov A. N., Orlov V. S., Chao B. and Lee V.* Application of Modified P-Matrix Model to the Simulation of Radio Frequency LSAW Filters / IEEE 2001 Ultrasonics Symposium Proc., pp.7-11.

14. *Wang W., Wu H.* High Selectivity SAW DMS Filter with In-between Shorted-gratings / IEEE 2010 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 1263-1266.

15. *Loseu A.* Double Mode SAW Filters with Improved Selectivity // IEEE 2000 Ultrasonics Symposium Proc., pp.95-98.

16. *Kovacs G., Sauer W., and Bauer T.* DMS Filter with Reduced Resistive Losses / IEEE 2004 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 294-297.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:31 Page 45

WIDEBAND TWO-MODE LEAKY SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTER WITH NON-EQUIDISTANT ELECTRODES OF TRANSDUCERS AND REFLECTING GRATINGS

Victor S. Orlov, *Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, filtrov-pav@yandex.ru*

Abstract

Asymmetric magnitude response with flat high frequency slop and "shoulder" with level -(10-15) dB appears by traditional section of two mode filters because of leaky surface acoustic wave (SAW) internal reflection from transducers electrodes. Additionally, gaps between input and output transducers represent like acoustical heterogeneities for leaky SAW. As result , ripples of magnitude response in pass band are increased and additional losses appear because of transformation of leaky SAWs in balk acoustic waves (BAW). Structure of ultra-high frequency (UHF) two cascade leaky SAW filter is described , which allows to degrease an influence of indicated effects significantly. At frequency 1310 MHz such structure allows to achieve wide pass band width about BW3=8,7%, close to as much as possible, realize high selectivity 52-56 dB near pass band and no less 43-48 dB in wide frequency range before 3.0 GHz. "Shoulder" suppression before 52-54 dB at high frequency slop is obtained it two wais. First , via application of reflection gratings between transducers like additional acoustical frequency selective elements. Second, via modulation of pitches of groups electrodes in transducers and reflecting gratings with next optimization these pitches. Parallel connection of sells in each cascade is used for insertion loss decreasing. In contrast to analogues, standard technology , wafer and electrode materials are used. As result, described structure may be used like basic structure for leaky filters.

Keywords: *leaky surface acoustic wave, two mode filter, sell, cascade, interdigital transducers, reflecting grating, insertion loss, selectivity.*

References

1. Morita T., Watanabe Y., M. Tanaka M. and Nawazawa Y. Wideband Low Loss Double Mode SAW Filters. *IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 95-104.
2. Campbell C.K. (1995). Longitudinal-Mode Leaky SAW Resonator Filters on 64 deg Y-X Lithium Niobate. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 42, No. 5. Pp.883-888.
3. Ivanov P.G., Makarov V.M., Orlov V.S., Shvets V.B. Wideband Low Loss SAW Filters for Telecommunication and Mobile Radio Application. *IEEE 1996 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 61-64.
4. Hashimoto K., Miyamoto T., Shimada K., Omori T. and Yamaguchi M. A Wideband Multi-Mode SAW Filter Employing Pitch Modulated IDTs on Cu-Grating/15o YX-LiNbO3- Substrate Structure. *IEEE 2009International Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 915-918.
5. Sharif M.A., Lambert C., Chen D.P. and Hartmann C.S. Network Coupled, High Performance SAW Resonator filters. *IEEE 1994 Ultrasonics Symposium Proc.*1994. Pp.135-138.
6. Takamine Y. Longitudinally Coupled Resonator Type SAW Filter with an IDT having a Narrow Pitch Position. US Patent No.: US 6,583,691 B2 Date of Patent: Jun. 24, 2003. Int. Cl. HO3H 9/64.
7. Orlov V.S. Modified Model of Equivalent Schemes for Simulation of Surface Acoustic Wave Devices. y2002, Pp.64. Official site www.saw-filters.ru of Acoustoelectronic Filters Laboratory, MTUCI. Item "Reviews and Investigations". Free Access html://saw-filters.ru/. Date of Application: January 2019. (*in Russian*)
8. Meltaus J., Hong S. S., Holmgren O., Kokkonen K., and Plessky V.P. (2007). Double-Resonance SAW Filters. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,* vol. 54, no 3. Pp. 659-667.
9. Orlov V.S., Bondarenko V.S. (1984). *Filters on Surface Acoustic Waves*. Moscow: Radio and Communication. 276 pp. (*in Russian*)
10. Makarov V.M., Ivanov P.G., Danilov A.L., Zaya V.G. (2008). Surface Acoustic Wave Resonator Filters Based on Dispersive Transducers. *Radiotekhnika and Elektronika*, vol. 53, no. 3. Pp.377-382.
11. Meltaus J., Hemeleinen P., Salomaa M.M. and Plessky V.P. Genetic Optimization Algorithms in the Design of Coupled SAW Filters. *IEEE 2004 International Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 915-918.
12. Tagawa K. Multi-Stage Design of DMS Filters with Free & Freeze Method. *6th WSEAS 2006 International Conference on Applied Computer Science Proc.* Pp. 508-513.
13. Rusakov A.N., Orlov V.S., Chao B. and Lee V. Application of Modified P-Matrix Model to the Simulation of Radio Frequency LSAW Filters. *IEEE 2001 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp.7-11.
14. Wang W., Wu H. High Selectivity SAW DMS Filter with In-between Shorted-gratings. *IEEE 2010 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 1263-1266.
15. Loseu A. Double Mode SAW Filters with Improved Selectivity. *IEEE 2000 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 95-98.
16. Kovacs G., Sauer W., and Bauer T. DMS Filter with Reduced Resistive Losses. *IEEE 2004 Ultrasonics Symposium Proc.* Pp. 294-297.

Information about author:
Victor S. Orlov, *Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:32 Page 46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ КГД СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10279

Соколов Павел Алексеевич,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, ***user7824@gmail.com***

Школина Ирина Викторовна,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, ***ira.schkolina@yandex.ru***

Трапезникова Марина Александровна,
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия, ***mtrapez@yandex.ru***

Чечина Антонина Александровна,
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия, ***chechina.antonina@yandex.ru***

Чурбанова Наталья Геннадьевна,
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия, ***nataimamod@mail.ru***

Ключевые слова: *автотранспортный поток, макроскопическая модель, квазигазодинамическая система уравнений, явные конечно-разностные схемы, параллельные вычисления.*

Работа посвящена актуальной проблеме математического моделирования потоков автомобильного транспорта на УДС больших городов и магистралях. Для описания потоков использована модель макроскопического типа, основанная на приближении сплошной среды, а именно, квазигазодинамическая (КГД) система уравнений, адаптированная к специфике транспортных задач. Основными объектами исследования являются поля средней скорости транспортных средств и плотности потока автотранспорта. Рассматривается одномерный вариант КГД-модели, допускающий эффективную реализацию на высокопроизводительных вычислительных системах с помощью логически простых численных методов. Во многих случаях для получения качественно верных результатов моделирования поведения автотранспорта на сложных элементах УДС одномерное описание может оказаться достаточным. В данной работе КГД-модель впервые дополнена источниковыми членами, отвечающими за изменение числа полос магистрали, благодаря чему в рамках одномерного описания решены задачи о движение на дорогах с переменной полосностью. С целью верификации проведено сравнение полученных численных результатов с результатами использования модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса, а также с другими результатами, представленными в литературе. Исследована динамика плотности в случае разреженного и достаточно плотного потока автомобилей. Также представлены результаты моделирования прохождения регулируемых и нерегулируемых Т-образных перекрестков. Расчеты проводились в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН на суперкомпьютере МВС-Экспресс, имеющем архитектуру с распределенной памятью, получено высокое ускорение вычислений. В дальнейшем уравнения КГД-модели будут дополнены функциями, описывающими влияние въездов/съездов на динамику транспортного потока, что позволит моделировать движение на транспортных развязках, предполагающих минимизацию пересечений с целью повышения пропускной способности дорог.

Информация об авторах:
Соколов Павел Алексеевич, *студент магистратуры, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*
Школина Ирина Викторовна, *студентка магистратуры, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*
Трапезникова Марина Александровна, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*
Чечина Антонина Александровна, *младший научный сотрудник, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*
Чурбанова Наталья Геннадьевна, *старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

Для цитирования:
Соколов П.А., Школина И.В., Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование движения автотранспорта на основе КГД системы уравнений с использованием суперкомпьютеров // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 46-52.

For citation:
Sokolov P.A., Shkolina I.V., Trapeznikova M.A., Chechina A.A., Churbanova N.G. (2019). Traffic simulation on the basis of the QGD system of equations using supercomputers. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 46-52. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:32 Page 47

Введение

В настоящее время, несмотря на большое количество работ, посвященных транспортному моделированию, остается актуальной необходимость создания моделей, адекватно, как в качественном, так и в количественном смысле, отражающих реальные дорожные ситуации, в том числе возникающие на сложных развязках при плотных потоках транспорта. С другой стороны, желательно, чтобы эти модели были достаточно просты при численной реализации и могли быть эффективно использованы для расчетов на высокопроизводительных вычислительных комплексах.

Для описания основных закономерностей плотного транспортного потока удобно использовать макроскопические модели [1], основанные на приближении сплошной среды. В отличие от микроскопических моделей [2, 3], основными объектами исследования в таких моделях являются поля средней скорости транспортных средств и плотности потока автотранспорта, то есть количества автомобилей на единицу длины одной полосы дороги. В работах [2, 4] была предложена модель макроскопического типа, основанная на квазигазодинамической (КГД) системе уравнений, предназначенной для описания широкого класса течений сжимаемого газа, в том числе при малых числах Маха [5]. Модель включала в себя понятие переменной боковой скорости как скорости перестроения автомобиля из полосы в полосу, то есть состояла из двумерных уравнений в частных производных, что позволяло исследовать движение по трассе сложной геометрии, не вводя дополнительные члены с источниками в правых частях уравнений для описания сужений или расширений дороги. Однако, при моделировании потоков транспорта на сложных развязках, а особенно при численной реализации, такое описание может вносить дополнительные сложности. При этом во многих ситуациях для исследования особенностей поведения автотранспорта на сложных регулируемых и нерегулируемых перекрестках, развязках различных видов и т.д. может оказаться достаточным одномерное описание. Это позволит избежать излишних вычислительных затрат, но тем не менее получать, по крайней мере качественно, верные результаты.

В данной работе рассматривается одномерный аналог КГД-модели транспортных потоков, позволяющий описывать движение по магистрали с учетом изменения ее полосности, а также прохождение регулируемых перекрестков с учетом различных светофорных режимов. Модель реализована численно с помощью явных конечно-разностных схем и адаптирована к многопроцессорной вычислительной системе с распределенной памятью.

1. Квазигазодинамическая модель транспортных потоков и ее численная реализация

В одномерном случае КГД-система уравнений для описания автотранспортных потоков выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho V}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\frac{\tau}{2}\frac{\partial(\rho V^2+P)}{\partial x}+F_\rho, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t}+\frac{\partial \rho V^2}{\partial x}=f-\mathrm{grad}P+\frac{\partial}{\partial x}\frac{\tau}{2}\frac{\partial(\rho V^3+PV)}{\partial x}+F_V. \qquad (2)$$

Здесь $\rho=\left[\frac{\text{авто}}{\text{км}\cdot\text{полоса}}\right]$ – плотность потока, $V=\left[\frac{\text{км}}{\text{час}}\right]$ – скорость автотранспорта.

Это модель второго порядка [1], включающая два уравнения – для определения плотности (1) и скорости (2), представленные в форме законов сохранения.

В уравнениях использованы перечисленные ниже дополнительные функции, относящиеся именно к специфике транспортных задач.

Аналог давления: $P(\rho)=\frac{\alpha\rho^\beta}{\beta}$. Феноменологические константы $\alpha=60\frac{км^2}{ч^2}$, $\beta=2$ взяты из работ других авторов.

Сила: $f=a\rho$, где ускорение $a=\frac{V_{eq}(\rho)-V}{T}$.

Здесь $V_{eq}(\rho)$ – равновесная скорость, имеющая смысл оптимальной при данных условиях скорости. Она является функцией, зависящей только от плотности, и определяется из фундаментальной диаграммы. В данной работе используется параболический вид фундаментальной диаграммы (см. рис. 1):

$$Q_{eq}(\rho)=\rho V_0\left(1-\frac{\rho}{\rho_{jam}}\right). \qquad (3)$$

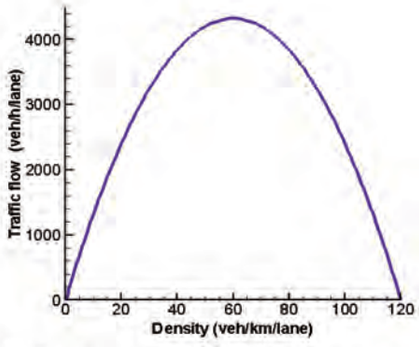


Рис. 1. Параболическая фундаментальная диаграмма

Учитывая, что $Q_{eq}=\rho V_{eq}$, получаем зависимость равновесной скорости от плотности:

$$V_{eq}(\rho)=V_0\left(1-\frac{\rho}{\rho_{jam}}\right).$$

Здесь V_0 – скорость свободного движения, в расчетах использовано значение $V_0=144$ км / час, $\rho_{jam}=120$ авто/(км·полоса) – плотность затора, при которой автомобили стоят в пробке и не двигаются.

Параметр T имеет смысл времени релаксации, а именно, адаптации скорости к равновесной скорости, и тоже зависит от плотности: $T(\rho)=t_0\left(1+\frac{r\rho}{\rho_{jam}-r\rho}\right)$, где $t_0=50$ с и $r=0.95$ – параметры данной модели.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:33 Page 48

Функции источников F_ρ и F_V, стоящие в правых частях уравнений (1) и (2), равны нулю, если дорога однородна, то есть количество полос на ней не меняется. Если есть изменение полосности, то по аналогии с [1] вводится понятие действительной (не целочисленной) функции количества полос I, которая не меняется скачком, а является, например, кусочно-линейной или может иметь более сложный вид. Если происходит, например, изменение числа полос с трех до двух, то вклад каждой из двух продолжающихся полос в функцию I равен единице, а вклад закрывающейся полосы на некотором расстоянии (соответствующем расстоянию, на котором автомобили начинают перестраиваться с закрывающейся полосы в соседнюю) изменяется с единицы до нуля. Таким образом, в соответствии с [1], функции источников имеют вид:

$$F_\rho(x,t) = -\frac{\rho V}{I}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}, \quad (4)$$

$$F_V(x,t) = -\frac{\rho V^2}{I}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}. \quad (5)$$

В некоторых задачах бывает целесообразным наряду с плотностью считать искомой переменной не скорость, а поток $Q = \left[\frac{\text{авто}}{\text{час}\cdot\text{полоса}}\right]$. Тогда уравнения (1)-(2) примут следующий вид:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\frac{\tau}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{\rho} + P\right) + F_\rho^Q, \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{\rho}\right) = f - \mathrm{grad}P + \frac{\partial}{\partial x}\frac{\tau}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^3}{\rho^2} + P\frac{Q}{\rho}\right) + F_V^Q, \quad (7)$$

а источники в правых частях вместо (4) и (5) будут выглядеть следующим образом:

$$F_\rho^Q(x,t) = -\frac{Q}{I}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x},$$

$$F_V^Q(x,t) = -\frac{Q^2}{\rho I}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}.$$

В правые части уравнений неразрывности (1) и (6), как и в правые части уравнений сохранения импульса (2) и (7), вводятся дополнительные потоки, обеспечивающие сглаживание решения на некотором характерном расстоянии [2, 4]. Малый параметр τ интерпретируется как характерное время, в качестве которого в задачах о транспортных потоках можно взять временной интервал, за который данную точку дороги пересекут несколько автомобилей. Минимальные характерные масштабы вводятся для того, чтобы удовлетворить приближению сплошной среды.

Для численного решения системы уравнений (1)-(2) используется явный конечно-разностный метод. Для аппроксимации конвективных членов применяются центральные разности [6]:

$$\frac{\rho_i^{n+1}-\rho_i^n}{\Delta t} + \frac{(\rho V)_{i+1}^n - (\rho V)_{i-1}^n}{2h} = \\ = \frac{\tau}{2}\frac{(\rho V^2 + P)_{i+1}^n - 2(\rho V^2 + P)_i^n + (\rho V^2 + P)_{i-1}^n}{h^2} + F_{\rho\,i}^n, \quad (8)$$

$$\frac{(\rho V)_i^{n+1}-(\rho V)_i^n}{\tau} + \frac{(\rho V^2)_{i+1}^n - (\rho V^2)_{i-1}^n}{2h} = \\ = f_i^n - \frac{P_{i+1}^n - P_{i-1}^n}{2h} + \frac{\tau}{2}\frac{(\rho V^\partial + PV)_{i+1}^n - 2(\rho V^\partial + PV)_i^n + (\rho V^\partial + PV)_{i-1}^n}{h^2} + F_{V\,i}^n, \quad (9)$$

где Δt и h – шаги расчетной сетки по времени и пространству соответственно. Устойчивость схем (8), (9) обеспечивается наличием диффузионных членов.

2. Верификация с помощью тестовой задачи об аварии

Для верификации приведенной выше модели использовались тестовые задачи. Первая задача – это задача о временном закрытии полосы. Рассматривается транспортный поток на участке двухполосной магистрали между заданными точками, длина рассматриваемого участка – 20 км. Через 5 минут после начала движения на первой полосе в точке 10 км происходит авария, вследствие чего участок в 2 км этой полосы перекрывают на 15 минут. Число полос в данном случае задается функцией, изображенной на рис. 2. В рассматриваемый промежуток времени объем трафика (входной поток в точке x = 0) постоянный. После ликвидации аварии возобновляется движение по обеим полосам.

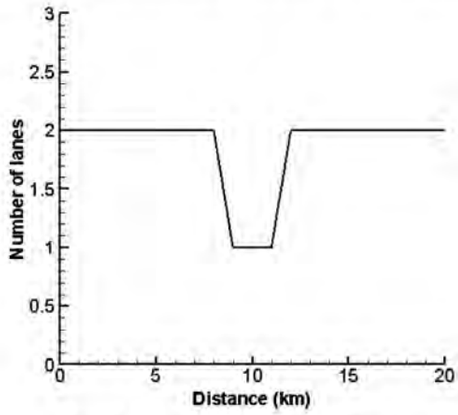


Рис. 2. Функция *I(x)* в задаче об аварии

Для сравнения, помимо КГД-модели, использовались результаты расчетов по известной макроскопической модели первого порядка – модели Лайтхилла-Уизема-Ричардса (модель LWR) в ее простейшей форме [7]:

$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = F(x,t)$, $Q(x,t) = Q_e(\rho(x,t))$ – параболическая фундаментальная диаграмма (3). Источник в правой части, описывающий изменение числа полос:

$$F(x,t) = -\frac{Q_e(\rho)}{I}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}.$$

Для численной реализации модели LWR применялся двухшаговый метод Мак-Кормака, дополненный диффузионным членом [1].

Результаты расчетов по обеим моделям для разреженного в начальный момент времени потока с плотностью $\rho(x,0) = 30\,\text{авто}/(\text{км}\cdot\text{полоса})$ представлены на рис. 3 и 4 в виде пространственно-временных диаграмм плотности. На диаграммах здесь и далее красный цвет обозначает максимум величины, а синий – минимум. В результате перекры-

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:33 Page 49

тия полосы возникает уплотнение, которое движется вверх по потоку, после открытия полосы пробка постепенно рассасывается. Можно видеть, что результаты согласуются качественно, хотя КГД модель благодаря возможности ускорений и торможений дает более сглаженную картину. Известно, что скорость распространения возмущений в моделях первого и второго порядка различна, что наблюдается в расчетах. Численные результаты согласуются с аналитическим решением аналогичной задачи из работы [1], полученным для простого случая треугольной фундаментальной диаграммы.

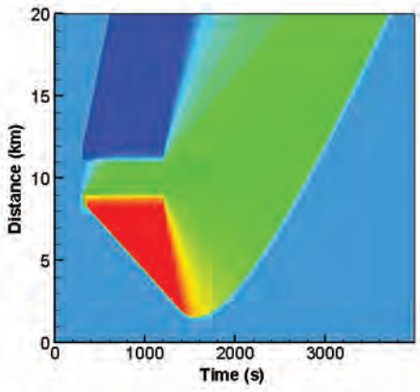


Рис. 3. Пространственно-временная диаграмма плотности (модель LWR)

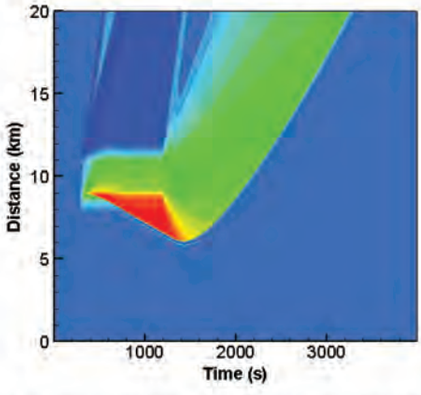


Рис. 4. Пространственно-временная диаграмма плотности (КГД-модель)

3. Задача о локальном расширении дороги

Тестирование КГД-модели также проводилось на примере задачи о локальном расширении дороги.

Рассматривается транспортный поток на участке двухполосной магистрали длиной 7 км. В некоторый момент времени в точке 3 км открывается третья полоса – локальное расширение дороги длиной 2 км, соответствующая функция числа полос приведена на рис. 5. В рассматриваемый промежуток времени объем трафика постоянный.

Проведены расчеты как для разреженного потока автомобилей, соответствующего начальной плотности $\rho(x,0)=30\,\text{авто}/(\text{км}\cdot\text{полоса})$, так и для достаточно плотного потока при $\rho(x,0)=70\,\text{авто}/(\text{км}\cdot\text{полоса})$.

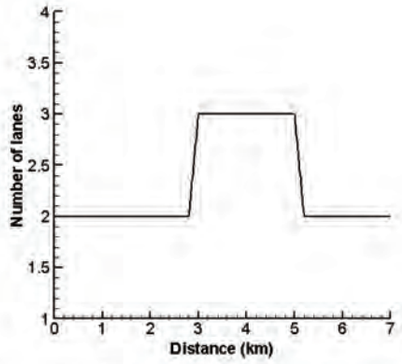


Рис. 5. Функция *I(x)* в задаче о локальном расширении дороги

Результаты в виде трехмерных пространственно-временных диаграмм плотности представлены на рис. 6, 7. В обоих случаях с открытием дополнительной полосы возникает разрежение в начале расширения и уплотнение в конце расширения, где автомобили встраиваются в двухполосную магистраль. Однако в случае разреженного потока уплотнение продвигается по направлению движения, влияя на поток после расширения дороги, и достаточно быстро рассасывается, хотя плотность за расширением остается несколько выше, чем перед расширением (см. рис. 6).

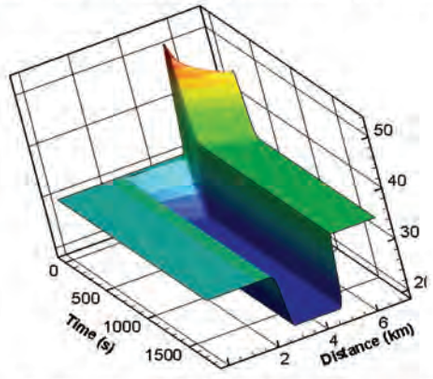


Рис. 6. Пространственно-временная диаграмма плотности для разреженного потока

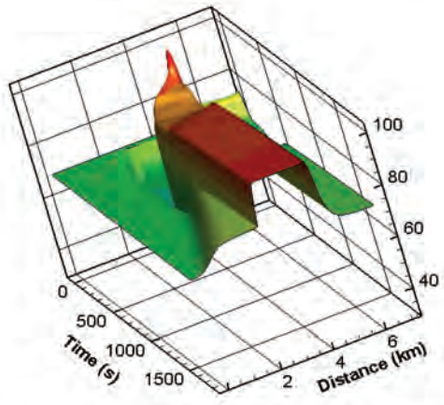


Рис. 7. Пространственно-временная диаграмма плотности для плотного потока

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:34 Page 50

При плотном движении наблюдается другая динамика: уплотнение распространяется вверх по потоку (против направления движения) и выходит за область расширения дороги, влияя в основном на поток до расширения (см. рис. 7). Наличие расширения при достаточно плотном потоке приводит к формированию затора и ухудшению ситуации по сравнению с дорогой без расширения. Результаты расчетов согласуются с результатами, полученными по другим моделям и представленными в литературе [2].

4. Параллельная реализация КГД-модели транспортных потоков

Поскольку численная реализация КГД-модели основана на явных вычислительных алгоритмах, ее параллельная реализация может быть выполнена с высокой эффективностью. Алгоритм распараллеливания ориентирован на использование распределенной памяти.

Для взаимодействия параллельных процессов в программе используется технология MPI – Message Passing Interface (интерфейс передачи сообщений). Эта технология предназначена для передачи информации между несколькими процессами, выполняющими одну задачу. Основным механизмом MPI является передача и приём сообщений. В сообщении содержится информация и признак, обозначающий тип сообщения для осуществления выборочного приёма.

Распараллеливание основано на принципе геометрического параллелизма. Для расчетов транспортных потоков естественно использовать разбиение расчетной области, а именно дорожной сети, на подобласти, каждая из которых представляет собой один отрезок сети, соединяющий два соседних сетевых узла, то есть перекрестка. В узлах сети происходит обработка и обмен данными между соседними отрезками. Разбиение проводят таким образом, что у двух соседних участков две расчетные точки являются общими для правильной реализации граничных условий в приграничных точках подобластей. Таким образом, каждый участок дороги просчитывается на отдельном процессоре, передавая и синхронизируя данные с помощью функций MPI_Send (для отправки данных), MPI_Recv (для получения данных) и MPI_Barrier (для синхронизации вычислений). Для эффективной работы необходимо, чтобы количество расчетных участков было меньше либо равно количеству доступных процессоров вычислительной системы.

Дальнейшие расчеты производились в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН на суперкомпьютере МВС-Экспресс, имеющем архитектуру с распределенной памятью [8].

5. Задача о движении на нерегулируемом и регулируемом перекрестках

Задача о движении на перекрестке формулировалась для условного перекрестка, состоящего из двух входящих и одного выходящего участков дороги (см. рис. 8).

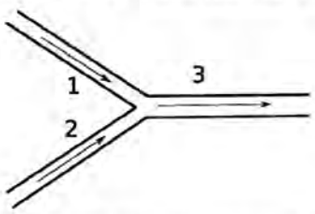


Рис. 8. Расчетная область задачи о движении на перекрестке

Все расчетные участки идентичны, имеют одинаковую длину, одинаковое количество расчетных точек. Целью расчетов является проверка адекватности моделирования прохождения потока через сетевой узел.

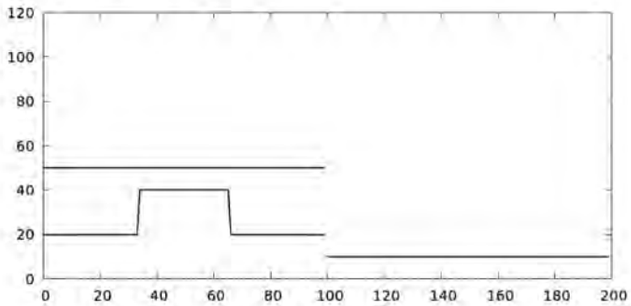
В случае нерегулируемого перекрестка на границе между въезжающими и выезжающим потоками граничные условия задавались следующим образом. Плотность на границе выезжающего потока равнялась сумме плотностей въезжающих потоков:

$$\rho_{out}\left(x_G,t\right)=\sum_{i=1}^{2}\rho_{in\,i}\left(x_G,t\right).$$

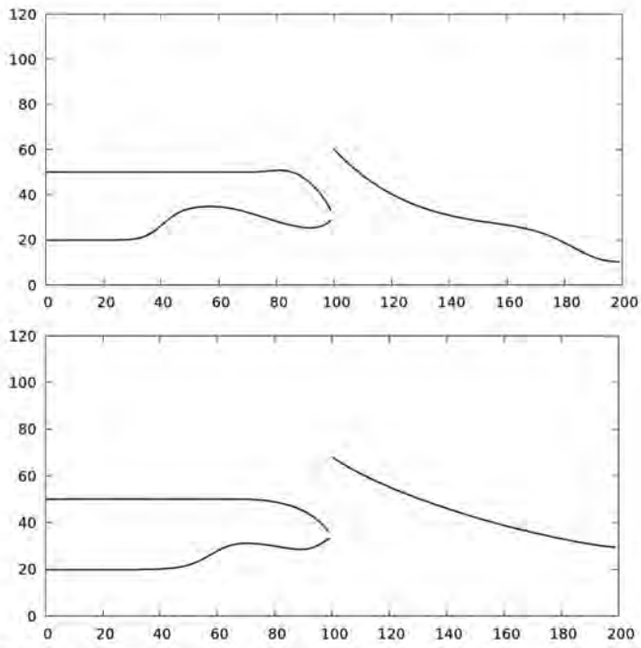
Для скоростей использовалась формула "с весами":

$$V_{out}\left(x_G,t\right)=\sum_{i=1}^{2}w_i V_{in\,i}\left(x_G,t\right),\quad w_i=\frac{\rho_{in\,i}\left(x_G,t\right)}{\rho_{out}\left(x_G,t\right)}.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 9 (а, б), где показаны первоначальные профили плотностей на всех трех участках, а также профили, полученные на два последовательных момента времени. Автомобильный поток в расчетах направлен слева направо.



а) Начальные профили плотности на двух въездных и одной выездной дороге



б) Профили плотности на два последовательных момента времени

Рис. 9. Результаты расчетов задачи о нерегулируемом перекрестке

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:35 Page 51

На рисунках видно, что выходящий поток меняется в соответствии с величиной входящих потоков (его плотность равна сумме плотностей входящих потоков).

Задача о регулируемом перекрестке отличается тем, что в узле ставится светофор, который попеременно пропускает через перекресток то один, то другой въездной поток. При этом для того потока, для которого горит зеленый свет, на границе с выездным потоком ставятся условия согласования – происходит простой обмен граничными значениями плотностей и скоростей. Для потока, для которого горит красный свет, граничные условия меняются следующим образом.

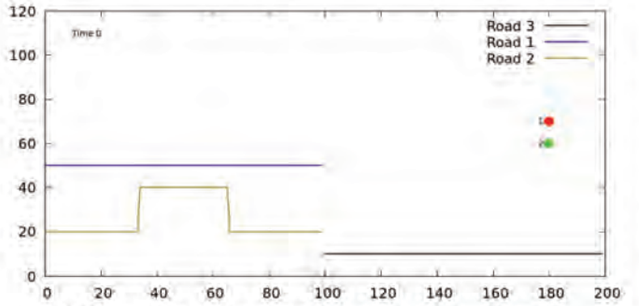
Для въездного потока на правой границе:

$$\rho_N^{n+1} = \rho_{N-1}^n + \frac{\Delta t}{h}(\rho V)_{N-2}^n, \quad V_N^{n+1} = 0.$$

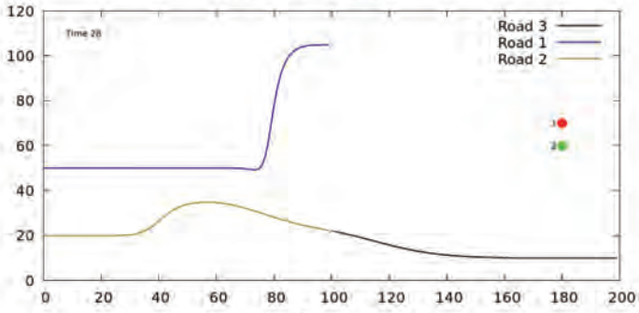
Для выездного потока на левой границе:

$$\rho_0^{n+1} = \rho_0^n - \frac{\Delta t}{h}(\rho V)_1^n, \quad (\rho V)_0^{n+1} = (\rho V)_0^n - \frac{\Delta t}{h}(\rho V^2)_1^n.$$

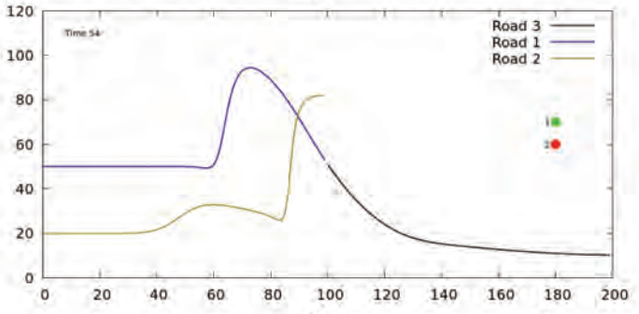
Результаты расчетов задачи о регулируемом перекрестке представлены на рис. 10 (а-в). Движение автомобилей, как и в предыдущих расчетах, происходит слева направо.



а) Начальные профили плотности на въездах (слева) и выезде (справа)



б)



в)

Рис. 10. Результаты расчетов задачи о регулируемом перекрестке

На рис. 10 (а) показаны начальные профили плотности на всех трех дорогах. Рисунок 10 (б) демонстрирует профили плотности на момент времени, когда красный свет светофора горит для дороги 1 и на ней справа, перед светофором, образуется волна уплотнения, которая движется в направлении, обратном движению автомобилей. На дороге 2 поток автомобилей свободно перетекает на дорогу 3 при зеленом сигнале светофора.

На рис. 10 (в) показана противоположная ситуация: красный сигнал горит для дороги 2 и теперь на ней образуется скачок плотности перед светофором, а на дороге 1 (для нее горит зеленый свет) уплотнение постепенно исчезает, не переставая при этом двигаться назад. Видно хорошее согласование значений плотности на границе между первой и третьей дорогами. Наконец, следует отметить, что расчеты показали высокую эффективность распараллеливания. Было получено ускорение практически в три раза на трех процессорах при разбиении расчетной области на три подобласти.

Заключение

Проведенные расчеты на простых тестовых задачах продемонстрировали адекватность макроскопической КГД-модели второго порядка. Несмотря на простоту, тесты имеют прямое отношение к расчетам на дорожных сетях. Следовательно, при переходе к более сложной структуре улично-дорожной сети можно ожидать высокой эффективности при параллельной реализации. В дальнейших исследованиях уравнения КГД-модели будут дополнены функциями, описывающими влияние въездов/съездов на динамику транспортного потока, что позволит моделировать движение на транспортных развязках, предполагающих минимизацию пересечений потоков с целью повышения пропускной способности дорог.

Литература

1. *Treiber M., Kesting A.* Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation. Springer, Berlin-Heidelberg, 2013, 503 p.

2. *Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Поляков Д.Б.* Математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микроскопических подходов // Вестник АГТУ Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 130-139.

3. *Buslaev A.P., Tatashev A.G., Yashina M.V.* On cellular automata, traffic and dynamical systems in graphs // International Journal of Engineering & Technology. 2018. V. 7. No. 2.28, pp. 351-356.

4. *Сухинова А.Б., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г.* Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // Математическое Моделирование. 2009. Т. 21. № 2. С. 118-126.

5. *Четверушкин Б.Н.* Кинетические схемы и квазигазодинамическая система уравнений. М.: МАКС Пресс, 2004. 332 с.

6. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.

7. *Lighthill M.H., Whitham G.B.* On kinematic waves: A theory of traffic flow on long crowded roads // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, physical and engineering sciences. 1955. V. 229, No. 1178, pp. 317–345.

8. Официальный сайт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Гибридный вычислительный комплекс МВС-Экспресс [Электронный ресурс] // URL: http://www.kiam.ru/MVS/resourses/mvse.html (дата обращения: 26.02.2019).

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:35 Page 52

TRAFFIC SIMULATION ON THE BASIS OF THE QGD SYSTEM OF EQUATIONS USING SUPERCOMPUTERS

Pavel A. Sokolov, *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,* ***user7824@gmail.com***

Irina V. Shkolina, *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,* ***ira.schkolina@yandex.ru***

Marina A. Trapeznikova, *Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia,* ***mtrapez@yandex.ru***

Antonina A. Chechina, *Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia,* ***chechina.antonina@yandex.ru***

Natalia G. Churbanova, *Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia,* ***nataimamod@mail.ru***

Abstract

The work is devoted to the relevant problem of mathematical modeling of vehicular traffic flows on road networks of large cities and on highways. To describe the flows, a macroscopic model based on the continuous medium approximation is used. The quasi-gas-dynamic (QGD) system of equations is adapted to the specifics of traffic problems. Main objects of the study are fields of the average vehicle speed and the density of vehicle flow. A one-dimensional version of the QGD model, that allows efficient implementation on high-performance computing systems using logically simple numerical methods, is considered. In many cases, a one-dimensional description may be sufficient to obtain qualitatively correct results of simulation of vehicles' behavior on complex elements of road networks. In this paper, the QGD model was first supplemented by source terms that represented changes in the number of lanes, due to which traffic on roads with the variable lane number was predicted within the framework of a one-dimensional description. For the purpose of verification, the obtained numerical results are compared with results given by the Lighthill-Whitham-Richards model and with other results presented in the literature. The density dynamics was studied in the case of rarefied as well as fairly dense flow of vehicles. The results of modeling of the passage of regulated and unregulated T-shaped intersections are also presented. The calculations are carried out in KIAM at the MVS-Express supercomputer, which has a distributed memory architecture; a high speed-up of computations has been achieved. In the future, the QGD model equations will be supplemented with functions describing the influence of entrances/exits on the dynamics of traffic flow. Consequently it will be possible to simulate traffic at road junctions that imply minimization of intersections in order to increase the traffic capacity of roads.

Keywords: *Traffic flow, macroscopic model, quasigasdynamic system of equations, explicit difference schemes, parallel computing..*

References

1. Treiber, M. and Kesting, A. (2013), *Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation*, Springer, Berlin-Heidelberg.

2. Trapeznikova, M.A., Chechina, A.A., Churbanova, N.G. and Polyakov, D.B. (2014), "Mathematical simulation of traffic flows based on the macro- and microscopic approaches", *Vestnik of Astrakhan state technical university, Series "Management, computer science and informatics*", no. 1, pp. 130-139.

3. Buslaev, A.P., Tatashev, A.G. and Yashina, M.V. (2018), "On cellular automata, traffic and dynamical systems in graphs", *International Journal of Engineering & Technology,* vol. 7, no. 2.28, pp. 351-356.

4. Sukhinova, A.B., Trapeznikova, M.A., Chetverushkin, B.N. and Churbanova, N.G. (2009), "Two-Dimensional Macroscopic Model of Traffic Flows", *Mathematical Models and Computer Simulation,* vol. 1, no. 6, pp. 669-676.

5. Chetverushkin, B.N. (2004), *Kineticheskie skhemy i kvazigazodinamicheskaya sistema uravnenij* [Kinetic schemes and quasigasdynamic system of equations]. Moscow: MAKS Press.

6. Samarskij, A.A. (1983), *Teoriya raznostnyh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka.

7. Lighthill, M.H. and Whitham, G.B. (1955), "On kinematic waves: A theory of traffic flow on long crowded roads", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 229, no. 1178, pp. 317-345.

8. The official site of Keldysh Institute of applied mathematics, "Hybrid computational cluster MVS-Express" available at: http://www.kiam.ru/MVS/resourses/mvse.html (Accessed 26 February 2019).

Information about authors:

Pavel A. Sokolov, *master student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia*

Irina V. Shkolina, *master studentMoscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia*

Marina A. Trapeznikova, *Senior Researcher, Ph.D., Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia*

Antonina A. Chechina, *Junior Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia*

Natalia G. Churbanova, *Senior Researcher, Ph.D., Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:35 Page 53

СЖАТИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ТРЕХМЕРНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Хасан Язид Абдулхамид,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия, ***Midocom@mail.ru***

Рыжов Николай Геннадьевич,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия, ***ngryzhov@mail.ru***

Соколов Юрий Михайлович,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия, ***yura.sokolov.45@mail.ru***

Фахми Шакиб Субхиевич,
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия, ***shakeebf@mail.ru***

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10280

Ключевые слова: *сжатие, восстановление, квантование, трехмерное косинусное преобразование, транспортная видеоинформации, адаптивность, сканирование.*

Предложен метод сжатия и восстановления транспортной видеоинформации, полученной из различных камер видеонаблюдения на транспорте, основанный на использовании адаптивного трехмерного дискретного косинусного преобразования. Кодирование и декодирование видеопоследовательностей, как правило, преследует две цели: уменьшить пространственную избыточность между элементами изображения с учетом внутрикадровой корреляции и временную избыточность между последовательными кадрами с учетом межкадровой корреляции. При этом принятые всех известные стандартны видеокодеков (H. 26-х и MPEG-х.) для снижения избыточности по времени используют принцип предсказания и компенсации движения по интерполированным позициям сэмплов в опорном кадре. Предложенный метод основан на использовании адаптивного косинусного преобразования в пространстве сигнала и по времени, и отличается произвольными размерами кубов в зависимости от пространственных и временных статистических характеристик сигнала изображений. Полученные результаты показывают, что предложенный алгоритм может улучшить эффективность сжатия и восстановления видеоинформации с учетом специфики транспортных сюжетов. Высокая производительность достигается при малой и средней интенсивности движения транспортных средств. При этом вычислительная сложность алгоритма уменьшается более, чем в 6 раз при сохранении качества восстановленных видеопотоков по сравнению с стандартными кодеками. Предложенные алгоритмы на основе адаптивного косинусного преобразования позволяют: во-первых, уменьшить скорость передачи транспортных видеопоследовательностей в 2-3 раза по сравнению с классическим косинусным преобразованием с размером кубов (8 8 8). Во-вторых, существенно сокращение вычислительных затрат при реализации транспортных видеоинформационных систем наблюдения реального времени по сравнению со стандартными кодеками. Результаты работы могут быть рекомендованы специалистам в области кодирования и декодирования видеоинформации для обеспечения необходимой скорости передачи при заданном уровне искажений. Получены результаты тестирования алгоритма и приведен сравнительный анализ предложенного метода с известными методами MPEG2 и MPEG4.

Информация об авторах:
Хасан Язид Абдулхамид, *аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*
Рыжов Николай Геннадьевич, *к.т.н., доцент, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*
Соколов Юрий Михайлович, *к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*
Фахми Шакиб Субхиевич, *д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

Для цитирования:
Хасан Я.А., Рыжов Н.Г., Соколов Ю.М., Фахми Ш.С. Сжатие и восстановление транспортной видеоинформации на основе адаптивного трехмерного косинусного преобразования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 53-59.

For citation:
Hasan Y.A., Ryzhov N.G., Sokolov Yu.M., Fahmi Sh.S. (2019). Compression and restoration of transport video information on the basis of adaptive three-dimensional cosine transformation. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 53-59. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:35 Page 54

Введение

Методы кодирования и декодирования изображений за последние десятилетия стали весьма актуальной областью исследований [1]. Главной задачей обработки видеоинформации является сокращение избыточности на изображениях и построения компактных форм представления изображений для хранения и передачи визуальных данных по каналу связи [2]. Важная объединяющая характеристика большинства изображений заключается в том, что имеются локальные области, где соседние пиксели сильно коррелированны и следовательно, имеют избыточную информацию. Для более компактного и экономного представления изображения можно используются различные схемы декорреляции, которые разделяются на два класса: пространственные [3] и спектральные [4].

Суть спектрального кодирования изображений часто заключается в применении дискретного косинусного преобразования (ДКП) [5,6], обеспечивающего хороший компромисс между способностью сжатия видеоинформации и вычислительной сложностью. Наиболее распространенным стандартом является JPEG [7] – известная технология сжатия, использующая ДКП и достигающая высокой степени сжатия с меньшей потерей данных. Другим стандартом сжатия видео является MPEG [8], обеспечивающий лучший коэффициент сжатия видео с низкой скоростью передачи при высоком качестве восстановления.

В данной статье предлагается новый адаптивный метод кодирования и декодирования изображений на основе адаптивного трёхмерного ДКП (АДКП-3D) с использованием модифицированной таблицы квантования для кубов различного размера [9].

В работе предложена методика оценки информационных показателей качества устройств сжатия изображений с использованием ДКП-3D. Предложенная методика использует модифицированную таблицу квантования и метод преобразования куба трехмерного изображения в одномерный массив (1D), обеспечивающая лучшую эффективность кодирования путём изменения размера куба для ДКП с учетом пространственной корреляции в пределах одного кадра и временной межкадровой корреляции по времени. Для повышения производительности алгоритма сжатия изображений используется пирамидально-рекурсивный метод [10,11] для определения неравномерной сетки, которая в дальнейшем и определяет размер кубов в последовательности кадров видеопотока. Результирующее 2D-изображение преобразуется в 3D-кубики, размеры которых определяются на основе типа изображения (низкая или высокая детализация). Затем ДКП-3D применяется к полученным кубам.

Параллельная реализация предложенного алгоритма используется для увеличения времени вычислений двумя способами: первый использует процесс распараллеливания вычислений с использованием SPMD (одна программа с несколькими данными), а другой метод использует графический процессор. Программирование с языком CUDA. Производительность предложенного алгоритма оценивается с использованием некоторых из наиболее часто используемых тестовых изображений в литературе по сжатию. Результаты тестирования показывают, что предложенный алгоритм превосходит известных методов по информационным показателям качества видеосистем: степени искажения, коэффициента сжатия и сложности устройств кодирования.

Постановка задачи исследования

Проблема сжатия изображений, которой десятилетиями занимается большое количество организаций и специалистов, имеет множество решений в связи с разнообразием часто не формализованных критериев качества, априорной информации о сигналах (статистики наблюдаемых сюжетов) и имеющихся ограничений. При этом часто остается открытым вопрос об оптимальности того или иного метода кодирования. Чаще всего используются критерии достигаемого сжатия при заданной ошибке передачи, или приближения к эпсилон-энтропии источника.

Существующие многочисленные методы кодирования чаще всего решают не столько проблему оптимизации сжатия, сколько проблему преодоления априорной неопределённости о статистике сигналов в совокупности с нечётко сформулированными требованиями к сложности кодера. Это часто переводит решение проблемы оптимизации сжатия из ранга статистического синтеза в ранг эвристического синтеза (изобретательства). Вне зависимости от типа синтеза кодера традиционно целью кодирования источника (эффективного кодирования или сжатия видеосигналов) считается экономия пропускной способности каналов связи. При этом наблюдается определенный разрыв между формализацией внешних характеристик кодера – сжатия и потери информации, и его внутренних характеристик, в первую очередь, вычислительной сложности.

Объединение этих внешних и внутренних характеристик необходимо осуществлять на основе методологии векторного синтеза систем, известного в теории систем и радиотехнике [12]. В работе, в отличие от существующих подходов решения задач кодирования, развивается новая концепция учета не только степени приближения к эпсилон-энтропии источника, но и специфику транспортной видеоинформации с учетом ограничения вычислительных ресурсов транспортных видеосистем наблюдения.

Конструктивным шагом на пути применения методологии векторного синтеза кодера источника непрерывных зашумленных сигналов явилось введение критерия качества кодера источника, включающего взвешенную сумму потери полезной информации, скорости передачи и вычислительной сложности кодера.

Возможность широкого использования предложенного критерия эффективности кодирования обусловлена разнообразием весовых коэффициентов (векторов концепции системы по терминологии академика Н. Н. Моисеева [12]), соответствующих различным прикладным системам передачи зашумленных изображений. В частности, существенное различие в векторах концепции телевизионных, транспортерных и специальных бортовых системах приводят к обоснованию применения в них принципиально различных классов кодера источника, например, с использованием или без использования адаптации к статистическим характеристикам сигналов. В отличие от распространенного на ранних этапах развития теории синтеза оптимальных видеосистем передачи и обработки информации критерия эффективность–стоимость [13].

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:36 Page 55

Предложенная в работе развитая концепция векторного синтеза кодеров непрерывных источников опирается исключительно на информационные показатели качества транспортных видеосистем: точность, скорость и сложность. Это позволило с единых позиций рассмотреть и определить потенциальные сферы применения различных классов кодеров непрерывных источников – в том числе, и использующих спектральные преобразования изображений, и обрабатывающих непосредственно входные сигналы.

Оценка движения играет ключевую роль в каждом видеокодере. Например, в гибридном кодировании с компенсацией движения в известных кодеках, как семейства MPEGx и H.26x движение напрямую влияет на временную точность прогнозирования и является основным фактором эффективности кодера [4, 14].

В предложенной методе сжатия, на основе адаптивного косинусного преобразования, движение также играет решающую роль, поскольку оно напрямую влияет на способа определения размера кубов и соответствующие способа и коэффициента сканирования. Однако в АДКП-3D движение может быть представлено явно в пространственно-временной области в виде вектора или неявно через параметры ориентации расположения доминантной энергии в пространственно-временном частотном пространстве. Эта двойственность представления движения позволяет разработать два различных подхода к оценке вектора параметров ориентации, необходимых для оптимального размера кубов и способа сканирования коэффициентов ДКП.

Появление в последнее время технологии «система на кристалле» и современных САПР на базе репрограммируемых логических интегральных схемах привело к формализованному учёту сложности устройств кодирования и декодирования изображений. Формализация, стимулированная созданием и развитием новой элементной базы вычислительной техники в виде сложно-функциональных блоков в составе видеосистем на кристалле [12,13].

Оптимизация алгоритмов сжатия и восстановления видеоинформации должна выполняться с учетом, не только точность восстановления (среднеквадратического отклонения - СКО) и скорости создания кода (R - числа бит на пиксель), как принято в большинстве реализуемых на сегодняшней день алгоритмах, но и с учетом сложности устройств (W) [15,16].

Эти три величины взаимосвязаны и выбор оптимальных параметров устройств сжатия и восстановления необходимо осуществлять по критерию минимума целевой функции (P), включающей весовые коэффициенты $\{c_i\}$ этих трёх информационных показателей качества: степени искажения восстановленных изображений (ΔI), скорости передачи (R) и сложности устройств кодирования (W) [16].

Таким образом, задача оптимизации при синтезе видеосистем на кристалле в целом и, транспортных в частности, сводится к поиску оптимальных значений информационных показателей качества при заданных соответствующих весовых коэффициентах, в то же время, обеспечивающих минимум целевой функции [16]:

$$P = c_0\Delta I(\varepsilon) + c_1 R(\varepsilon) + c_2 W_к(\varepsilon) + c_3 W_д(\varepsilon) \rightarrow \min.$$

Заметим, что определение множества решений с учетом ограничений для данной функции является труднейшим этапом всего процесса оптимизации при проектировании видеосистем из-за антагонистических и конфликтных ситуаций, в условиях вероятностной и нечеткой неопределенности статистических характеристики нестационарного источника изображений.

В данной работе решаются задачи:

– разработки адаптивного метода спектрального косинусного преобразования изображений, учитывающего пространственно-временной корреляции видеопотоков, полученных из различных камер наблюдения на транспорте;

– определения информационных показателей качества системы сжатия изображений: точность, как среднеквадратического отклонения (СКО), скорости передачи (R) и сложность кодирующих устройств (W);

– сравнения результатов исследований с известными методами кодирования и декодирования изображений (MPEG2 и MPEG4) для различных классов изображений транспортной системы наблюдения.

Описание предложенного адаптивного метода ДКП-3D

Адаптивное трёхмерное ДКП (АДКП-3D). ДКП представляет собой важный инструмент декорреляции из-за симметричности функции косинуса и осуществляет уплотнение энергии путём извлечения только необходимых коэффициентов частотной области сигнала. Другими словами ДКП позволяет четко разделить исходное изображение на две области – высокочастотную (DC – коэффициенты ДКП) и низкочастотную (AC – коэффициенты ДКП) [1,4].

Процесс сжатия и восстановления изображений включает четыре этапа (рис. 1).

Этап 1. Формирование неравномерной сетки ДКП.

Важным этапом при реализации адаптивного метода спектрального кодирования транспортной видеоинформации является формирование неравномерной сетки для выполнения ДКП.

Для определения оптимальных размеров кубов, подвергающихся в дальнейшем АДКП-3D производится анализ пространственной корреляции локальных областей первого кадра куба и анализ временной корреляции для определения числа кадров куба.

Анализ пространственной корреляции и разбиение изображения на полигоны различной квадратной формы и размера на основе пирамидально-рекурсивного метода (ПРМ) сжатия видеоинформации (рис. 1). Подробное описание данного метода можно найти в работах [10,11].

Алгоритм сжатия видео АДКП-3D, основанный на трехмерном ДКП берет цифровой транспортный видеопоток полного движения и делит его на группы по N кадров.

Каждая группа рассматривается как трехмерное изображение, где X и Y-пространственные компоненты, а Z-временная составляющая. Первый кадр изображения разделенный на предыдущем этапе на полигоны размером (например, JPEG полигон имеет размер 8x8), образующих NxNxN (где N четное) кубов.

Анализ временной корреляции выполняется на основе сравнения спектральных коэффициентов ДКП кубов размера 4×4×4 в пределах кубов большего 32×32×32 или 64×64×64.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:36 Page 56

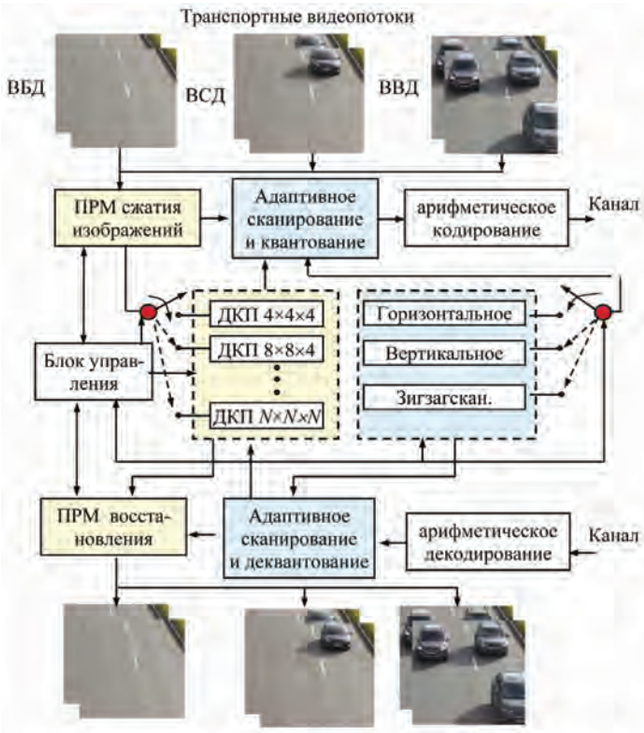


Рис. 1. Структурная схема видеосистемы сжатия и восстановления транспортной видеоинформации

Для определения типа движения и соответствующего количества кадров в кубе задаются значения порогов (ρ_i), которые определяют скорости движения объектов (в нашем случае, транспортных средств) на дорогах путём сравнения значений коэффициентов ДКП. Далее вычисляется разность коэффициентов первого кадра и последнего (Δ) и сравнивается с заданными порогами:

– при $\Delta \le \rho_1$ – движение отсутствует и ДКП по времени не выполняется;

– при $\rho_1 \le \Delta \le \rho_2$ – движение слабое и размер куба устанавливается равным 16×16×16;

– при $\rho_2 \le \Delta \le \rho_3$ – движение среднее и размер куба равен 8×8×8;

– при $\Delta \ge \rho_3$ – движение сильное и размер куба равен 4×4×4.

Этап 2. ДКП-3D

В кодеке на основе АДКП-3D видеопоследовательность делится на несколько кубов $M \times N \times L$, где $M \times N$ – это размеры матрицы пикселей изображения, а L, – количество последовательных кадров.

АДКП-3D представляется как:

а) для прямого АДКП-3D:

$$F(u,v,w)=\alpha(u,L)\alpha(v,N)\alpha(w,M)$$
$$\sum_{x=0}^{L-1}\sum_{y=0}^{N-1}\sum_{z=0}^{M-1} f(x,y,z)\cdot\frac{\cos(2x+1)v\pi}{2L}\cdot\frac{\cos(2y+1)u\pi}{2N}\cdot\frac{\cos(2z+1)w\pi}{2M},$$

где F – значение коэффициента прямого косинусного преобразования, x,y,z- координаты пикселя в трёхмерном пространстве куба размером $M \times N \times L$, u,v,w – координаты коэффициента преобразования, $\alpha(i,j)=\begin{cases}\sqrt{1/j}, & \text{при } i=0\\ \sqrt{2/j}, & \text{при } i\neq 0\end{cases}$, при этом j принимает значение M, N или L.

б) для обратного АДКП-3D определяется по формуле:

$$f'(x,y,z)=$$
$$\sum_{w=0}^{T-1}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}\alpha(u,L)\alpha(v,N)\alpha(w,M)F(u,v,w)\cos\left(\frac{(2t+1)v\pi}{2L}\right)\times$$
$$\times\cos\left(\frac{(2m+1)u\pi}{2M}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)w\pi}{2N}\right)$$

где $f'(x,y,z)$- значение яркости пикселя с координатами (x,y,z) в пределах куба после обратного ДКП.

Параллельная архитектура для вычисления АДКП-2D основана на методе декомпозиции фреймов строк и столбцов и использует один и тот же одномерный АДКП-1D модуль для всех трех измерений.

Этап 3. Адаптивное сканирование и квантования.

Эффективное сканирование в любой схеме сжатия- это оптимальное упорядочивание квантованных коэффициенты ДКП в вектор, подходящий для последующего энтропийного кодирования и передачи по каналу связи.

В известных работах по ДКП-3D кодированию были предложены различные порядки сканирования коэффициентов ДКП, такие как плоскостное сканирование, 3D расширение зигзагообразного сканирования [17] и более сложное, параболическое сканирование [18]. Однако ни один из этих паттернов сканирования не приспосабливается к движению в кодируемой видеопоследовательности, т.е. все они игнорируют тот факт, что важные элементы имеют тенденцию группироваться вдоль плоскости, ориентация которой определяется доминирующим движением в видеопоследовательности. Это приводит к неоптимальному упорядочению коэффициентов и более коротким нулевым сериям, что, в свою очередь, снижает эффективность кодирования длин серии и в конечном счете на общего коэффициента сжатия.

Данное обстоятельство четко демонстрируется при анализе геометрических форм транспортных средств (рис. 2).

Предложенный порядок сканирования коэффициентов позволяет оптимально обеспечить порядок сканирования коэффициентов ДКП и тем самим увеличить общий коэффициент сжатия.

Процесс адаптивного сканирования транспортного видеопотока характеризуется следующими свойствами:

1) обход квантованных коэффициентов должен быть по результату определения анизотропии (направления) в пределах каждого кадра (например, зигзагообразное сканирование в JPEG / MPEG) и работе, в отличие от известных косинусных преобразований, используются следующие обходы (рис. 2):

– горизонтальное сканирование;

– вертикальное сканирование;

– зигзагообразное сканирование.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:37 Page 57

2) порядок сгруппирован на нулевые и ненулевые коэффициенты для последующего кодирования длин серии;

3) обеспечение максимальной длинны нулевых серий коэффициентов ДКП, чтобы завершающий кодер канала мог сохранить большего количества битов.

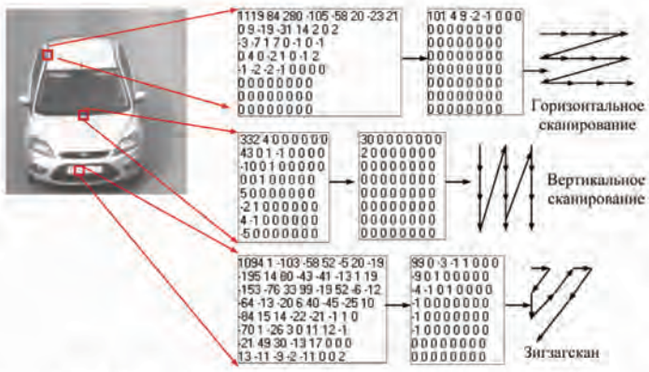


Рис. 2. Способы сканирования блоков ДКП изображений

В работе в качестве исходных визуальных данных были взяты видеопотоки из различных камер наблюдения на дорогах мегаполиса. Все транспортные видеоинформации разделены на три группы в зависимости от типа движения и интенсивности транспортных средств (рис. 1).

В результате исследования большого объема видеоданных были сформулированы три класса видеопотоков: а) видеопоток без движения (ВБД), б) видеопоток со средним движением (ВСД) и в) видеопоток с высоким движением (ВВД) (рис. 1).

Адаптивное квантование выполнялось с порогами, полученные с учетом статистических характеристик распределения спектральных коэффициентов и уровнями – в серединах интервалов квантования [5, 6].

Следует отметить важную особенность предложенного метода и заключающего в том, что при высокой степени пространственной корреляции в пределах кадра ДКП не выполняется и на этапе восстановления всем пикселям присваиваются среднее значение яркости. При высокой степени межкадровой корреляции (отсутствие движения), то ДКП по времени также не выполняется и обработка куба в ограничивается ДКП для первого кадра.

Этап 4. Арифметическое кодирование

Завершающим этапом процесса кодирования является энтропийное кодирование. Подобно сжатию неподвижных изображений [19], используется кодирование Хаффмана. После квантования и адаптивного сканирования все ненулевые коэффициенты подвергаются кодированию длин серии рядом с предшествующими нулевыми коэффициентами, т. е. используется кодирование длин серий [20,21]. Для АДКП-3D коэффициентов были получены новые словари кодов (таблица).

Следует отметить, интервал DC-коэффициента составляет от 0 до 4095. Весь интервал разделен на 13 подинтервалов, первый из которых содержит только значение 0, второй – значения 1 и 1, Третий – значения 3, 2, 2, 3 и т. д.

Каждый DC-коэффициент сначала определяется его интервал, а затем кодируется его положением в интервале. Для каждого подинтервала предлагается уникальное кодовое слово. Пусть интервал |2 –3| представлен кодовым словом 001, тогда код энтропии для значения DC = 3 будет 00100, а для DC= 2 будет 00101 и т.д. Как упоминалось выше, в пределах одного блока (куба) коэффициенты переменного тока переупорядочиваются с помощью адаптивного сканирования), затем кодирование длин серий и заканчивается идентификатором endof-block (EOB). Предполагая, что N = 4,8,16 и 32, кубы содержат от 255 до 32767 AC-коэффициентов. Подобно AD-коэффициентам, весь интервал возможных значений делится на 11 подинтервалов и теоретически значения длины пробега варьируются от 0 до 32767. Таким образом, предлагаемый словарь кодов для AC-коэффициентов содержит (511-32767)× 11+EOB=(5,622-360437) уникальных кодовых слов [22].

Согласно обширному словарю кодов, менее распространенные значения AC представлены широкими кодовыми словами (см. таблицу). Например, кодовое слово для субинтервала (256-511) имеет ширину 15 бит, для (512-1,023) 26 бит и для субинтервала (1,024-2,047) необходимо 27 бит.

В выходном битовом потоке за каждым кодовым словом следует число, определяющее значение коэффициента в подинтервале. Очевидно, что при условии различных временных измерений в видеокубе словарь кодов Хаффмана для AC-коэффициентов, типа и порядка сканирования должны быть изменены.

Таблица кодовых слов ДКП-3D

Интервал	Новое кодовое слово	Число бит
[EOB]	001000	6+0
[1]	01	2+1
[2-3]	000	3+2
[4-7]	110	3+3
[8-15]	1001	4+4
[16-31]	10100	5+5
[32-63]	0010011	7+6
[64-127]	10111000	8+7
[128-255]	00110001100	11+8
[256-511]	00110101001..	15+9
[512-1,023]	00110001101..	26+10
[1024-2047]	001100011010…	26-11

Результаты исследований различных транспортных видеопотоков

Эксперименты проводились над тремя различными транспортными видеопотоками: а) видеопоток с малым движением, б) со средним движением и в) с высоким движением.

Главным преимуществом использования косинусного преобразования с переменным размером кубов, как в пространстве сигнала, так и по времени является:

б) существенное снижение вычислительной сложности (в среднем более, чем в 6 раз) по сравнению с стандартом MPEG и в среднем 2-3 раза больше по сравнению с известным косинусным преобразованием фиксированного размера блоков (рис. 3).

а) значительное уменьшение среднеквадратического отклонения СКО по сравнению с известными ДКП-3D и MPEGx. При этом скорости передачи видеоинформации почти не отличаются для всех кодеков и равна R=0,01 бит/пиксель (рис. 4). А коэффициент сжатия предложенного

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:38 Page 58

метода, в среднем, в 2-3 раза больше для случаев видеопотока со слабым и средним движением.

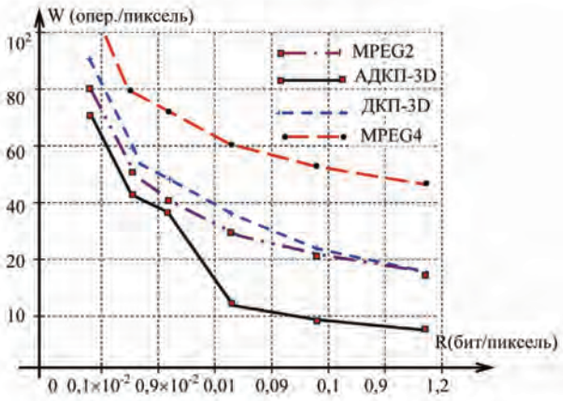


Рис. 3. Зависимость сложности алгоритма от скорости передачи

Потенциальным применением предлагаемого трехмерного адаптивного ДКП подхода могут быть портативные цифровые устройства, такие как мобильный телефон, беспилотники, интеллектуальные камеры наблюдения и др.

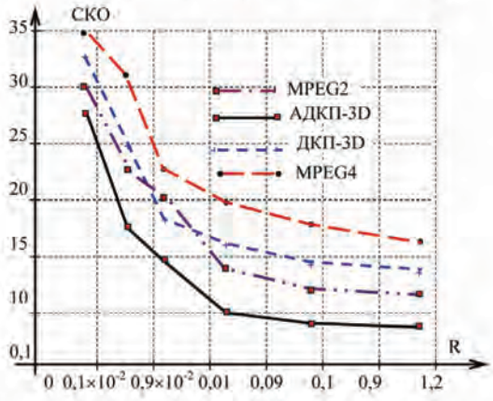


Рис. 4. Зависимость СИГ/ШУМ от скорости передачи передачи

Заключение

Сжатие изображений является чрезвычайно важной частью современных интеллектуальных транспортных видеосистем наблюдения. Имея возможность сжимать видеоинформации до доли их исходного размера, можно сэкономить ценное и дорогое дисковое пространство памяти. С появлением технологии «система на кристалле», передача изображений с мест чрезвычайных ситуации и аварий в диспетчерский центр управления в реальном времени становится возможным в современных транспортных видеосистемах на кристалле.

Из вышеприведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1) предлагаемый метод на основе адаптивного косинусного преобразования принимает меньше значение среднеквадратического отклонения, чем методы MPEG2, MPEG4 и классический метод косинусного преобразования без адаптации размеров кубов в 2-2,5 раза;

2) применение адаптивного способа определения размеров кубов для косинусного преобразования позволило увеличить коэффициента сжатия в среднем в 3 раза при сохранении субъективного качества по сравнению с вышеуказанными методами;

3) полученные статистические характеристики и зависимости количества блоков различного размера, подвергающихся косинусному преобразованию, от степени однородности областей изображений позволяют уменьшить вычислительную сложность устройств кодирования и декодирования видеоинформации в транспортных системах наблюдения более, чем в 6 раз при сохранении качества видеоинформации.

Литература

1. *Gonzalez R.C. and Woods R.E.* Digital Image Processing, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2008, pp. 547-635.

2. *Sayood K.* Introduction to Data Compression, 3rd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2006, pp. 6-10.

3. *Крюкова М.С., Фахми Ш.С.* и др Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145-155.

4. *Ричардсон Ян.* Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368 с.

5. *Фахми Ш.С.,* Зубакин И.А. Адаптивный алгоритм кодирования видеоинформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 1. С. 49-54.

6. *Фахми Ш. С., Ибатуллин С. М.и др.* Патент РФ № 2375838. Способ кодирования и декодирования видеоинформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования. Опуб. 10.12. 2009, Б. И. № 34.

7. *Wallace G.K.* "The JPEG still picture compression standard // IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 38, no. 1, pp. 18-34, Feb. 1992.

8. *Sikora T.* MPEG digital video-coding standards // IEEE Signal Processing Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 82-100, Sep. 1997.

9. Mulla A., Baviskar J., Baviskar A and Warty C. Image compression scheme based on zig-zag 3D-DCT and LDPC coding // Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, 2014, pp. 2380-2384.

10. *Фахми Ш.С., Альмахрук М. М., Соколов Ю. М., Бобровский А. И., Еид М. М., Салем А.* Точность, скорость и сложность устройств кодирования изображений по опорным точкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Том 16. № 4. С. 678-689.

11. *Фахми Ш. С., Альмахрук М., Салем А., Бобровский А. И., Еид М.М.* Информационные показатели качества устройств кодирования по опорным точкам // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2016, вып. 3. С. 86-91.

12. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.

13. *Левин Б.Р., Шварц В.* Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. М., Радио и связь, 1985. 312 с.

14. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. Сойфера В.А. уч. для ВУЗов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

15. *Фахми Ш.С., Цыцулин А.К., Колесников Е.И., Очкур С.В.* Функционал взаимообмена сложности и точности систем кодирования непрерывного сигнала // Информационные технологии. 2011. № 4. С.71-77.

16. *Фахми Ш.С.* Концепция проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем на основе технологии «система на кристалле» // Журнал университета водных коммуникации. 2013. Вып. II (XVIII). С. 79-88.

17. *B. Yeo, B. Liu,* Volume rendering of DCT-based compressed 3D scalar data, IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics 1 (1) (1995) 29-43.

18. *M. Lee, R. Chan, D. Adjeroh,* Quantization of 3D-DCT coe_cients and scan order for video compression, J. Vis. Commun. Image Represent. 8 (4) (1997) 405-422.

19. *Lee M.C., Chan K.W., Adjeroh D.A.* Quantization of 3D-DCT coefficients and Scan Order for Video Compression // Journal of visual communication and image representation, Vol. 8. No. 4, Dec., 1997, pp. 405-422.

20. *Bozinovic N., Konrad J.* Scan order and quantization for 3D-DCT coding. S&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc., Jul. 8-11, 2003.

21. *Mehanna A., Aggoun A., Abdulfatah O., Swash M.R. and Tsekleves E.* Adaptive 3D-DCT based compression algorithms for integral images // Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, pp. 1-5, 2013.

22. *Priyadarshini K.S. and Sharvani G.S.* A survey on parallel computing of image compression algorithms // Proc. International Conference, Computational Systems for Health & Sustainability, April 2015, pp. 178-183.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:38 Page 59

COMPRESSION AND RESTORATION OF TRANSPORT VIDEO INFORMATION ON THE BASIS OF ADAPTIVE THREE-DIMENSIONAL COSINE TRANSFORMATION

Hasan Yazeed A., *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia,* ***Midocom@mail.ru***
Ryzhov Nikolai G., *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia,* ***ngryzhov@mail.ru***
Sokolov Yuri M., *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia,* ***yura.sokolov.45@mail.ru***
Fahmi Shakeeb S., *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences;*
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia, ***shakeebf@mail.ru***

Abstract
The method of compression and restoration of transport video information obtained from various surveillance cameras in transport, based on the use of adaptive three-dimensional discrete cosine transformation. Encoding and decoding of video sequences, as a rule, pursues two goals: to reduce the spatial redundancy between image elements taking into account intra-frame correlation and temporal redundancy between successive frames taking into account inter-frame correlation. At the same time, all known video codecs (H. 26-x and MPEG-x) to reduce time redundancy, the principle of predicting and compensating the motion of interpolated sample positions in the reference frame is used. The proposed method is based on the use of adaptive cosine transformation in the signal space and time, and is characterized by arbitrary cube sizes depending on the spatial and temporal statistical characteristics of the image signal. The results show that the proposed algorithm can improve the efficiency of compression and recovery of video information, taking into account the specifics of transport subjects. High performance is achieved at low and medium traffic. In this case, the computational complexity of the algorithm is reduced by more than 6 times while maintaining the quality of the restored video streams compared to standard codecs. The proposed algorithms based on the adaptive cosine transformation allow: first, to reduce the transmission speed of transport video sequences by 2-2.5 times compared to the classical cosine transformation with the size of cubes (8 8 8). Secondly, significantly reducing the computational cost of the implementation of transport video surveillance systems in real time compared to standard codecs. The results of the work can be recommended to specialists in the field of encoding and decoding of video information to provide the necessary transmission speed at a given level of distortion. The results of testing the algorithm and a comparative analysis of the proposed method with the known methods MPEG2 and MPEG4.

Keywords: *compression, reconstruction, quantization, three-dimensional cosine transform, the transport of video information, the adaptive scanning.*

References
1. Gonzalez R.C. and Woods R.E. (2008). *Digital Image Processing, 3rd ed. Upper Saddle River*, N.J: Prentice Hall, pp. 547-635.
2. Sayood K. (2006). *Introduction to Data Compression*, 3rd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier, pp. 6-10.
3. Kryukov M.S. Fahmi S.S. etc. (2019). Methods, algorithms of coding and classification of images of sea vessels. *Marine intelligent technologies*. No. 1 (43). Vol. 3, pp. 145-155.
4. Richardson Ian. Video coding. H. 264 and MPEG-4 - new generation standards. Moscow: Technosphere, 2005. 368 p.
5. Fahmi sh. S., Zubakin I. A. (2010). Adaptive algorithm of video information coding based on three-dimensional discrete cosine transformation. *Izv. University of Russia. Ser. Radionics*. Issue. 1, pp. 49-54.
6. Fahmi S. S., Ibatullin S. M. et al. Patent RF № 2375838. Method of encoding and decoding video based on three-dimensional discrete cosine transformation. Pub. 10.12. 2009, B. I. № 34.
7. Wallace G.K. (1992). The JPEG still picture compression standard. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 18-34, Feb. 1992.
8. Sikora T. (1997). MPEG digital video-coding standards. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 14, no. 5, pp. 82-100, Sep. 1997.
9. Mulla A. Baviskar J., Baviskar A., and Warty C. (2014). Image compression scheme based on zig-zag 3D-DCT and LDPC coding. *in Proc. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, pp. 2380-2384.
10. Fahmi Sh.S., Almagro M.M., Sokolov Yu.M., Bobrowski A.I., Eid, M.M., Salem A. (2016). Precision, speed and complexity of the device coding of images using control points. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics.* Vol. 16. No. 4, pp. 678-689.
11. Fahmi Sh. S., Almagro M., Salem, A., Bobrovsky A. I., Eid, M. M. (2016). An Information measure of the quality of encoders at the pivot points. *Questions of radio electronics, ser. Television engineering,* vol. 3, pp. 86-91.
12. Moiseev N.N. (1981). *Mathematical problems of system analysis*. Moscow: Science. 488 p.
13. Levin B.R., Schwartz V. (1985). *Probabilistic models and methods in communication and control systems*. Moscow: Radio and communication. 312 p.
14. *Methods of computer image processing*. Edited by V.A. Soifer academic year for Universities. Moscow: FIZMATLIT, 2003, 784 p.
15. Fahmi Sh.S., Sycolin A.K., E.I. Kolesnikov, S.V. (2011). Occur the functionality of the interchange complexity and accuracy of coding systems a continuous signal. *Information technology*. No. 4, pp. 71-77.
16. Fahmi Sh.S. (2013). The Concept of designing intelligent transport video systems based on the technology "system on a chip". *Journal of the University of water communications*. Issue. II (XVIII), pp. 79-88.
17. Yeo B., Liu B. (1995). Volume rendering of DCT-based compressed 3D scalar data. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics 1* (1), 29-43.
18. Lee M., Chan R., Adjeroh D. (1997). Quantization of 3D-DCT coe_cients and scan order for video compression, J. Vis. Commun. Image Represent. 8 (4), 405-422.
19. Lee M.C., Chan K.W., Adjeroh D.A. (1997). Quantization of 3D-DCT coefficients and Scan Order for Video Compression. *Journal of visual communication and image representation*, Vol. 8. No. 4, Dec, pp. 405-422.
20. Bozinovic N., Konrad J. (2003). Scan order and quantization for 3D- DCT coding. *S&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc.*, Jul. 8-11, 2003.
21. Mehanna A., Aggoun A., Abdulfatah O., Swash M.R., and Tsekleves E. (2013). Adaptive 3D-DCT based compression algorithms for integral images. *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, pp. 1-5.
22. Priyadarshini K.S. and Sharvani G.S. (2015). A survey on parallel computing of image compression algorithms. *Proc. International Conference, Computational Systems for Health & Sustainability,* April 2015, pp. 178-183.

Information about authors:
Yazeed A. Hasan, *postgraduate of Computer Aided Design, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia*
Nikolai G. Ryzhov, *PhD, Associate Professor, head of Computer Aided Design, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia*
Yuri M. Sokolov, *PhD, Associate Professor of Computer Aided Design, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia*
Shakeeb S.Fahmi, *Dr.Tech.Sc, docent, Leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences;*
Professor of Department of Computer Aided Design Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:38 Page 60

A METHOD FOR IDENTIFYING LDPC CODES FOR ADAPTIVE COMMUNICATIONAL SYSTEMS

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10281

Nikita Yu. Rumenko,
Moscow technical university of communication and informatics, Moscow, Russia, ***mtuci@mtuci.ru***

Alexander V. Kostyuck,
Moscow technical university of communication and informatics, Moscow, Russia, ***tigran 201094@ mail.ru***

Keywords: *identification, error-correcting codes, LDPC, systems of equations.*

Ever-increasing requirements for high-quality and high-speed communications lead to more and more sophisticated, noise-tolerant waveforms and communication protocols. Recent advances in power control, adaptive coding and modulation now makes it possible to transmit signal under much worse channel conditions than as far as twenty years ago. In cognitive radio systems, as well as in non-cooperative communication channels, the parameters of error-control code often are not known a priori at the receiver. Hence, the development of blind code recognition systems is essential for future cognitive communications.

Among other known error-correcting codes one of the most important class is iteratively decodable codes, especially low-density parity check ones. Excellent error-correcting performance of LDPC made them part of several communicational standards, including Wi-Fi, DVB-S2(x) and DVB-T2. Accordingly, there exist a lot of works considering LDPC blind identification methods, all of which being in fact methods of solving systems of linear equations [1-5].

In this work, we will study one special case, namely, we will consider a code with relatively dense parity checks used in a good, but rather low-rate channel. Note that in this case exhaustive search techniques including "birthday" algorithms cannot be used due to high computational complexity, and information set decoding algorithms will not have enough codewords. To handle this problem we adapt information-set decoding to few-codewords scenario and show, that for good enough channels even parity checks of weight larger than 10 can be relatively easy to find. Although all the results of this paper are not limited to the binary case, we will mainly focus on systems of boolean equations, due to the fact that most of LDPC in modern communications are binary.

Information about authors:
Nikita Yu. Rumenko, *Moscow technical university of communication and informatics, research engineer, Moscow, Russia*
Alexander V. Kostyuck, *Moscow technical university of communication and informatics, PhD, senior research engineer, Moscow, Russia*

Для цитирования:
Руменко Н.Ю., Костюк А.В. Метод распознавания LDPC-кодов для адаптивных систем связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 60-64.

For citation:
Rumenko N.Yu., Kostyuck A.V. (2019). A method for identifying LDPC codes for adaptive communicational systems. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 60-64. (*in Russian*)

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:39 Page 61

Previous results

Just like turbo-codes, LDPC allow for efficient iterative decoding. Decoding LDPC is based on the different versions of "belief-propagation" algorithm, which works on a graph built from the parity-check matrix of the code. Its good performance for LDPC accounts for a special structure of parity check matrix, that has to be sparse, according to the name of the code. Note that this relaxed definition lets one consider many codes having sparse parity checks as LDPC, so all the results of this paper are not limited to LDPC proper. Technically, LDPC belong to the class of linear block codes.

Let us call parity check matrix some matrix $H \in F_2^{(n-k)n}, rank(H) = n-k$, which defines a code $C(n,k)$ as vector space of $c \in F_2^n$ satisfying $Hc = 0$.

Linear combinations of rows of H are called parity checks of $C(n,k)$. Define $\|x\|$ the Hamming weight of x. Now, LDPC can be defined as codes having $(n-k)$ linearly independent parity checks h_i satisfying $\|h_i\| \le w, i \in \overline{1,(n-k)}$, $w << n$.

Since LDPC are linear, their codewords represent linear equations with respect to parity checks, i.e. every parity check makes a solution for any $c \in C(n,k)$. From that, finding $(n-k)$ linearly independent solutions allows one to form parity check matrix of the code, i.e. identifying LDPC is equivalent to solving a system of linear equations, every equation being a codeword.

In practice, when solving these systems of equations, several problems can occur, mainly channel distortions and low channel rate. In this case we can use exhaustive search techniques [1], which can handle large probabilities of distortion, but for rather small w. In case of bigger w one can use information-set decoding [1], which does variable substitution to change initial unknowns for unknowns defined by errors and therefore change the weight of the solution. However, in its existing form information-set decoding requires a large number of codewords for variable substitution, which in many cases is just impossible, for instance with low-rate channels.

From that we see that for low levels of distortion and large enough solution weight we cannot use existing methods to identify a code, so let us focus on solving this problem.

We study systems of linear Boolean equations consisting of codewords received from a memoryless binary symmetric channel with crossover probability p. Note that for a code $C(n,k)$ any such system represents $(n-k)$ different systems with the same left-hand side, so without loss of generality one can consider just one of these systems and assume single parity check.

It would be also convenient to consider all the distortions concentrated in the right-hand side of the system. With this simplification we do not change the solution and only increase the probability of distortion [7].

Suppose m codewords have been received. Let's form a system of linear Boolean equations

$$Ax_0 = \xi, \qquad (1)$$

where A is a random Boolean rectangular matrix of size $m \times n$, $rank(A) = m$, $\xi^T = (\xi_1, \ldots, \xi_m)$ is the unknown Boolean distortion vector with independent elements taking its values with probabilities

$$\Pr(\xi_i = 1) = 1 - \Pr(\xi_i = 0) = p, p \in [0;1/2), i \in [1;m].$$

Systems like (1) are called systems with corrupted right-hand side and vector x_0 is called the **true solution**. It is assumed that $\|x_0\| \le w, \|\xi\| \le t$, where t depends on m and p, w is fixed.

Now let us pass on to our method. Form a homogeneous system

$$Xe = 0, \qquad (2)$$

where $X = [I \mid A]$, $e^T = [\xi \mid x_0]$ and I is identity matrix.

Clearly, with this structure finding e allows one to find x_0 and solve system (1). However, since system (2) is even more undetermined than (1), we still don't have not enough equations to make full variable substitution. Instead, we substitute as many variables as possible, updating variables with random permutations. For accelerating the search, we additionally use "meet-in-the-middle" approach with low memory requirements on the right-hand side of the system.

Let us denote $V^{(w)} = \{v \in F_2^n, \|v\| = w\}$ the set of all binary vectors of length n and weight w. We propose an algorithm based on [6], with numeric parameters (m,n,w,q,t):

***Algorithm* 1**

Assign $q_1 = \lceil q/4 \rceil$, $q_2 = \lfloor q/4 \rfloor$, $l = \left\lceil \log_2 \binom{n}{q/2} \right\rceil$,

$l_1 = \left\lceil \log_2 \binom{n}{q_2} \right\rceil$, $l_2 = l - l_1$.

1) form system X according to (2)

Procedure 1

– choose random permutation P of length $(m+n)$

– assign $X \leftarrow XP$

– bring X to the form $X = [I \mid A]$

Procedure 2

– choose submatrix L formed by l first rows of matrix A

– form lists $Q^{(1)} = \{(a,y) \mid a = Ly, y \in V^{(q_1)}\}$ and $Q^{(2)} = \{(b,z) \mid b = Lz, z \in V^{(q_2)}\}$

Procedure 3

for all $s \in [0;2^{l_1} - 1]$

– form a list

$Q^{(3)} = \{(c,v) \mid c = a \oplus b, v = y \oplus z, (a,y) \in Q^{(1)}, (b,z) \in Q^{(2)}\}$

of pairs (c, v), s.t. $c = s$ on the first l_1 bits for all $r_i, r_j \in Q^{(3)}, c_i = c_j, i \ne j$

– calculate vector $x \in V^{(q)}, x = v_i \oplus v_j$

– **if** $\|Ax\| > w + t$ go to Procedure 1

– **else** assign $e = [Ax \mid x] \cdot P^{-1}$ and return $x_0 = [e_{m+1}, \ldots e_{n+m}]$.

Let us estimate for this algorithm the probability of success.

Theorem 1.

Proposed algorithm finds right solution for system (1) *with probability not less than* $(1-\delta)$, *where*

$$\delta \le \left| \widetilde{V}^{(w+t)} - 1 \right| e^{-m \ln 2} + e^{-mF(p, t/m)} + e^{-m},$$

$$F(x,y) = x \ln \frac{x}{y} + (1-x) \ln \frac{(1-x)}{(1-y)} \text{ and}$$

$$\widetilde{V}^{(w+t)} := \{v \in F_2^n : \|v\| \le w + t\}.$$

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:39 Page 62

Proof

Note that ones in vector ξ are Bernoulli variables with parameter p, and ones in any "wrong" sum of columns of X are Bernoulli variables with parameter 1/2.

Let us calculate the probability of success from its complement A: {not finding the right solution}.

The A event represents a union of three compatible events

1) A_1 – all the I permutations were bad;

2) A_2 – weight of e is more than $(w+t)$;

3) A_3 – at least one of $\left(\left|\widetilde{V}^{(w+t)}\right|-1\right)$ wrong sums $\tilde{x}$ of olumns X has weight not more than $(w+t)$.

Since probability of compatible events is not greater than the sum of their probabilities, we have

$$P(A) \le P(A_1) + P(A_2) + P(A_3)$$

and

$$P(A_3) \le \left(\left|\widetilde{V}^{(w+t)}\right|-1\right) P\{\|\tilde{x}\| < w+t\}.$$

The probability of a good permutation is mainly defined by the threshold t, thus, after I iterations, we have

$$P(A_1) \le \left(1-\binom{m-l}{w+t-q}\binom{n}{q}\binom{n+m}{w+t}^{-1}\right)^{I}.$$

Denoting $z = \binom{m}{w+t-q}\binom{n}{q}\binom{n+m}{w+t}^{-1}$ and choosing $I = \lceil m/z \rceil$, one gets

$$P(A_1) \le (1-z)^{-I} \le e^{-m}.$$

According to the Chernoff bound, probability of A_2 satisfies

$$P(A_2) \le e^{-mF(p,t/m)}.$$

Likewise, for A_3 we have

$$P(A_3) \le \left(\left|\widetilde{V}^{(w+t)}\right|-1\right)\cdot 2^{-m} = \left(\left|\widetilde{V}^{(w+t)}\right|-1\right)\cdot e^{-m\ln 2}.$$

Finally,

$$P(A) \le \left|\widetilde{V}^{(w+t)}-1\right|\cdot e^{-m\ln 2} + e^{-mF(pt/m)} + e^{-m}$$

Substituting $P(A) = \delta$, one gets the statement of the theorem □

Let us now estimate computational complexity of the algorithm according to the number of iterations defined in the proof of Theorem 1.

Following iterative structure of the algorithm, its computational complexity W has to be a product of the computational complexity of one iteration $W_{(1)}$ and the number of iterations.

Theorem 2.

Choosing $I = \left\lceil \binom{n}{q/2} \right\rceil$ *and* $q \ge 6$ *computational complexity of the proposed algorithm is not greater than*

$$W \le \exp\left\{(w+t)\ln\left(\frac{n+m}{m-l-w+t+q}\right) + q\ln\left(\frac{q(m-l-w-t+q)}{(w+t-q)(n-q)}\right) + q/2\ln n + 2\ln m\right\}$$

Proof

Every iteration consists of three stages:

1) elimination

2) lists calculation

3) weight checking.

Thereby, following [6], computational complexity of one iteration equals

$$W_{(1)} = \frac{(n+m)^3(n-m)}{2} + l\binom{n}{q/2} + 2(w+t)\cdot\binom{n}{q/2}^2 / 2^l.$$

Since we better choose $q \ge 6$ because of the elimination step, minimum complexity for one iteration will be of order $O(n^3)$. From that, the complexity is defined by the two last terms, hence choosing $I = \left\lceil \binom{n}{q/2} \right\rceil$ we will have

$$W_{(1)} \le m\cdot\binom{n}{q/2}$$

and for overall complexity

$$W \le m^2\cdot\binom{n}{q/2}\cdot\frac{\binom{n+m}{w+t}}{\binom{n}{q}\binom{m-l}{w+t-q}}.$$

Let us estimate $\binom{n+m}{w+t}\binom{n}{q}^{-1}\binom{m-l}{w+t-q}^{-1}$. Following inequality chain holds:

$$\frac{\binom{n+m}{w+t}}{\binom{n}{q}\binom{m-l}{w+t-q}} = \frac{(w+t-q)!(n-q)!(n+m)!(m-l-w-t+q)!q!}{(w+t)!n!(n+m-w-t)!(m-l)!} \le$$

$$\le \left(\frac{n+m}{m-l-w+t+q}\right)^{w+t}\left(\frac{q(m-l-w-t+q)}{(w+t-q)(n-q)}\right)^{q}$$

Taking logarithm, we get an estimate on the computational complexity of the algorithm as

$$W \le \exp\left\{(w+t)\ln\left(\frac{n+m}{m-l-w+t+q}\right) + q\ln\left(\frac{q(m-l-w-t+q)}{(w+t-q)(n-q)}\right) + q/2\ln n + 2\ln m\right\}.$$ □

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:39 Page 63

Performance evaluation

We implemented our algorithm in C++. Since it is usually advised to use "meet-in-the-middle" approach for identifying LDPC in our scenario, we compared proposed algorithm (Algorithm 2) with [1] (Algorithm 1).

All the systems were modeled using pseudo-random number generators from <random> file in Visual Studio 13.

Table 1

SLE $n = 256$, $m = 128$, $w = 8$, $q = 2$

p	Mean time, sec	
	Algorithm 1	Algorithm 2
0.001	144,284	0,062
0.005	164,131	0,120
0.010	191,219	0,355
0.020	305,235	1,625

Table 2

SLE $n = 512$, $m = 256$, $w = 10$, $q = 2$

p	Mean time, sec	
	Algorithm 1	Algorithm 2
0.001	>7200	12,100
0.005	>7200	49,021
0.010	>7200	109,960
0.020	>7200	576,460

Experiments were carried out on the personal computer with Intel Core i7 (2,8 GHz) and DDR3 RAM of size 8 Gb. Mean computational time for the two competing algorithms is presented in the tables. Note that sampling reliability of solution for all experiments had not gone below 0,99.

Conclusion

The problem of blind parameters identification is essential for future cognitive radio systems. Here we study the problem of identifying LDPC codes using a sample of a small number of noise-corrupted codewords. We have presented a method for identification those codes and an efficient algorithm, which outperforms previously known ones.

References

1. Cluzeau M., Finiasz M. (2009). *Recovering length and synchronization from a noisy intercepted bitstream.*

2. Chabot C. (2007). Recognition of a code in a noisy environment. In *IEEE Conference, ISIT'07*, pp. 2210-2215.

3. Cluzeau M. (2006). Block code reconstruction using iterative decoding techniques. In *IEEE Conference. ISIT'06*, pp. 2269-2273, Seattle, USA. IEEE Press.

4. Sicot G. and Houcke S. (2005). Blind detection of interleaver parameters. In *ICCASP05*.

5. Valembois A. (2001). Detection and recognition of a binary linear code *Discrete Applied Mathematics*, 111(1-2):199-218, July 2001.

6. May A., Meurer A. and Thomae E. (2011). Decoding Random Linear Codes in $O(2^{0.054n})$ In Asiacrypt 2011. Springer, 2011.

7. Balakin G.V. (1997). Introduction to the theory of random systems of equations, (In Russian). *Transactions in applied discrete mathematics*. Vol. 1, pp. 1-18.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:39 Page 64

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ LDPC-КОДОВ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Руменко Никита Юрьевич, *Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия,* ***mtuci@mtuci.ru***
Костюк Александр Владимирович, *Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Аннотация
Непрерывное повышение требований к качеству связи и скорости передачи информации стимулирует постоянное совершенствование используемых сигнально-кодовых конструкций, повышение их помехозащищенности. Произошедшее в последние годы внедрение систем регулировки мощности ретранслятора, технологий адаптивной модуляции и кодирования позволяет сегодня осуществлять радиосвязь в значительно более сложных условиях передачи информации, чем это было еще около двадцати лет назад. Одним из наиболее важных отличительных признаков развития современных систем радиосвязи является так называемая концепция "когнитивного радио", которая основывается на идее подстройки одного или нескольких параметров сигнала в зависимости от качества радиолинии. В таких "когнитивных" системах неизвестным параметром сигнала может выступать помехоустойчивый код, поэтому для перспективных систем "когнитивного радио" важное значение имеет разработка методов "слепой" оценки параметров помехоустойчивого кодирования. Среди используемых на практике помехоустойчивых кодов особое место занимают коды, допускающие эффективную итерационную процедуру декодирования, особенно коды с малой плотностью проверок на четность, LDPC (англ. low-density parity check codes). Высокая исправляющая способность LDPC-кодов обусловила их включение во многие стандарты радиовещания, использующие адаптивную систему кодирования и модуляции, среди которых Wi-Fi, DVB-S2(x) и DVB-T2. В связи с этим большое количество публикаций посвящено вопросу распознавания LDPC по выборке кодовых слов, принятых из канала связи, которые по сути представляют собой различные методы решения искаженных систем линейных уравнений [1-5]. В данной статье нами будет исследован следующий частный случай: мы будем рассматривать LDPC-код со сравнительно плотными проверочными соотношениями, который используется в достаточно хорошем, но низкоскоростном канале связи. Для идентификации кода в таких условиях переборные алгоритмы и алгоритмы на основе парадокса "дней рождения" не подходят ввиду их слишком большой вычислительной сложности, а для применения алгоритмов декодирования по информационным множествам недостаточно кодовых слов. Для решения поставленной задачи в статье предлагается новый метод на основе информационных множеств и показывается, что для достаточно хороших каналов проверочные уравнения даже сравнительно большого веса могут быть найдены достаточно легко. Несмотря на то, что полученные результаты не ограничиваются двоичным случаем, в настоящей статье рассматриваются только системы булевых уравнений, ввиду того что в подавляющем большинстве современных систем связи применяются двоичные низкоплотностные коды.

Ключевые слова: *распознавание, помехоустойчивые коды, LDPC, системы линейных уравнений.*

Литература

1. *Cluzeau M., Finiasz M.* Recovering length and synchronization from a noisy intercepted bitstream, 2009.
2. *Chabot C.* Recognition of a code in a noisy environment. In IEEE Conference, ISIT'07. C. 2210-2215.
3. *Cluzeau M.* Block code reconstruction using iterative decoding techniques // In IEEE Conference, ISIT'06, Seattle, USA IEEE Press, 2006. C. 2269-2273.
4. *Sicot G. and Houcke. S.* Blind detection of interleaver parameters. In ICCASP05, 2005.
5. *Valembois A.* Detection and recognition of a binary linear code Discrete Applied Mathematics, 111(1-2):199-218, July 2001.
6. *May A., Meurer A. and Thomae E.* Decoding Random Linear Codes in O(20.054n) In Asiacrypt 2011. Springer, 2011.
7. *Балакин Г.В.* Введение в теорию случайных систем уравнений // Труды по дискретной математике. М.: ТВП, 1997. Т. 1. С. 1-18.

Информация об авторах:
Руменко Никита Юрьевич, *Московский технический университет связи и информатики, аспирант, Москва, Россия.*
Костюк Александр Владимирович, *Московский технический университет связи и информатики, к.т.н., старший научный сотрудник, Москва, Россия*

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:39 Page 65

THE METHOD OF EFFICIENT CODING OF COLOR IMAGES UNDER THE CONDITION OF PERMISSIBLE AND FORBIDDEN VALUES OF COLOR GAMUT

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10282

Anastasiya Y. Kudryashova,
Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,
asykka@bk.ru

Keywords: *binary code, effective coding, error-correcting coding, gamma-correction, RGB signal.*

In modern communication systems, when transmitting a color image, the issues of ensuring the required transmission quality are highly relevant. In turn, intercompatible coding is an important factor in ensuring the necessary noise immunity of communication systems. When transmitting signals, several color models are used, for example, RGB or YCrCb. At the same time, an important role is played by the fact that the color gamut has several forbidden values that can be discarded when encoding the transmitted image. R, G and B channels use gamma correction, which is not optimal from the point of view of minimizing the number of quantization levels when visually observing an image, and on the other hand, these models do not have the same contrast, i.e. change, for example, color tone or saturation at a certain value will differ significantly depending on the choice of the initial values of the coordinates of the selected color. The paper proposes to optimize the choice of code combinations for color image transmission. An algorithm for estimating the efficiency of coding a color image is proposed, taking into account the derivation from acceptable values of chromaticity, the estimation algorithm takes into account indicators of risks or distortions when coding with a binary code, and also takes into account the types of errors that occur in a digital signal. This approach allows us to identify more and less efficient methods for coding a color image. It was found that, depending on the type of errors in the digital signal, different coding options provide significantly different distortions in the restored signal.

Для цитирования:
Кудряшова А.Ю. Метод адаптации психоакустической модели к вейвлетному пространству на основе матрицы шумов квантования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 65-70.

For citation:
Kudryashova A.Yu. (2019). A method of efficient coding of color images under the condition of permissible and forbidden values of color gamut. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 65-70.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:40 Page 66

Introduction

An analogue factor to be taken into account when operating a video signal is the understanding that the video display accurately reproduces the brightness of each picture element. A cathode ray tube (CRT) – based display is basically a non-linear device, and as a result, the light output at the output is a non-linear dependence on the voltage applied to the display. This dependence is called the gamma device indicator. In order for this relationship to have a linear appearance, a correction factor must be introduced into the television system.

For this reason, the RGB signals in a video camera are gamma-corrected using the inverse CRT function. Gamma-corrected signals are designated R, G and B. New LCD and plasma displays have recently become more common, so some may think that gamma correction will no longer be needed in the future. However, human vision also has a non-linear characteristic of the perception of light intensity, which is described by a power function with an exponent of approximately 1/3. To ensure the best image contrast and signal-to-noise ratio (S / N), the video signal is encoded using the same power function. This is called abstract coding.

Gamma correction

The gamma correction required for CRT-based displays is practically optimal for abstract correction. For this reason, in the framework of the use of methods with gamma correction, it is necessary to especially carefully evaluate systems that use correction factors.

Figures 1 and 2 show the gamma correction, presented as a power function with an exponent equal to 0.45, as defined by ITU-R BT.709, the main standard for high-definition digital video. This gamma correction is used in video cameras to eliminate non-linear distortions in CRT-based displays and to conduct abstract coding. Nonlinearities in CRT displays are described by a power function with an exponent that lies in the range from 2.2 to 2.6, for most CRTs it is about 2.5.

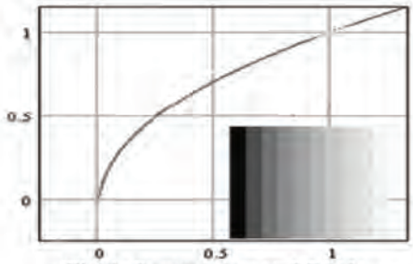


Fig. 1. Gamma curve on BT.709

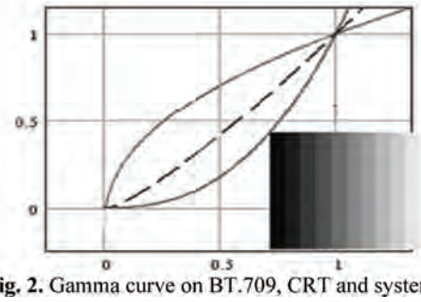


Fig. 2. Gamma curve on BT.709, CRT and systems

The resulting gamma value for the entire system is approximately 1.2, which is almost ideal for typical viewing conditions. This characteristic introduces an approximate correction. On the human perception of the brightness of the image, which, in turn, reduces the number of bits that are required when converting a video signal into digital form for its transmission.

Converting an R'G'B 'signal to a luminance signal and color difference signal

Red, green, and blue video components are characteristic of video signal capture devices, and they are almost always used by operators to control the video color. The RGB color rendering system, however, is not the most efficient, in terms of bandwidth, method of transmitting an image during video processing, because all three components must have the same bandwidth. Human vision is more sensitive to changes in brightness levels than to changes in color.

Therefore, we can improve bandwidth efficiency by allocating the full bandwidth of the luminance information and providing any part of the remaining available frequency band under the color difference information. Converting video components to luminance and color difference values reduces the amount of information transmitted. With one luminance channel (Y') with full frequency band, which provides information about the brightness of the image and the signal fragment, two color difference channels (R' – Y' and B' – Y') can be almost twice the frequency band smaller than the luminance channel bandwidth, and yet still provide sufficient color information.

Some types of equipment, especially in the past, distributed RGB signals outside the camcorder (or camera control unit), while video signals were almost always converted or encoded to other formats for recording, interconnection or long-distance transmission, and then decoded for display on the display. Another way of describing the primary colors – red, green, and blue – is to present it using the three-dimensional R'G'B 'color cube. As shown in Figure 3, all colors can be displayed inside the edges of the RGB color cube.

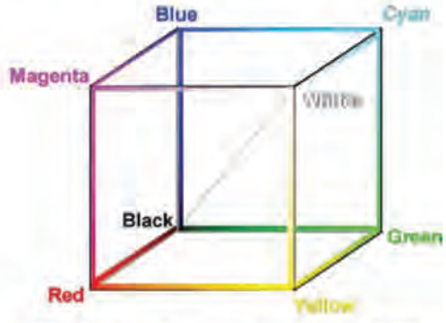


Fig. 3. Three-dimensional color cube RGB

In the development of color television systems, special attention was paid to the problem of compatibility with the black-and-white television receivers that existed at that time. The gamma-corrected luminance signal, Y ', is created from the red, green, and blue channel signals received from a video camera in order to transmit to a black and white or color television receiver in the form of a monochrome image. Knowing the difference

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:41 Page 67

between a monochrome signal or a luminance channel signal, and signals from either of the two color channels, you can easily restore red, green and blue components for kinescope feed.

Since the sensitivity of human vision to green color is most relevant to the perception of brightness, most of the information of this color signal is used to obtain the brightness signal, and the remaining red and blue color difference signals can be transmitted in a narrower bandwidth.

The luminance signal and two color difference signals contain all the information necessary to display any color from the entire color spectrum of the original image. The main set of three components (R', G' and B') by a simple matrix transformation is transformed into a new set of three components (Y', R' – Y', B' – Y'). The color difference form of signal representation has two advantages compared to R'G'B '.

First, a narrower bandwidth is required to transmit the necessary information: the color difference system needs only one broadband channel, because the fine details of the image are carried by the luminance signal. In the R'G'B 'system, on the other hand, high bandwidth is required for all three channels. Secondly, the set of color difference components is less susceptible to distortion of the gain compared to the components of the R'G'B '.

A low level in any of the color difference channels can cause only minor changes in hue or color saturation. And a low level in any of the R'G'B 'components can lead to a noticeable distortion of the image color. The idea of converting R'G'B 'signals into one luminance signal and two color difference signals was very useful. Currently, such signals, with relatively minor changes, are the basis of all existing component video formats, as well as composite broadcasting standards around the world.

Among the professionals involved component video, component R'G'B 'signals are often called «G'B'R'», because most of the information carried by the luminance signal, consists from the green channel information. Therefore, there is some analogy between Y'P'bP'r and G'B'R' formats.

To simplify the processing of color difference signals in different systems, their values are first scaled so that they have the same dynamic range of ± 350 mV. Such an analog component signal is referred to as Y'P'bP'r. In the digital component system, an offset has been made to the color difference signals, allowing for the same processing ranges for the luminance signals Y and the color difference signals. Such a system is referred to as Y'C'bC'r.

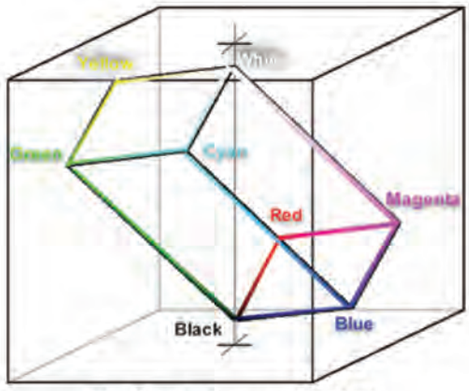


Fig. 4. 3D color space Y'C'bC'r

Performing matrixing and scaling prevents possible damage to the Y'C'bC'r signals when they are converted back to RGB. As shown in Figure 4, only about 25% of all possible signal values in the Y'C'bC'r region are used to represent the full spectrum of colors in the RGB region. In this regard, when transferring signals to other formats, care must be taken to ensure that the dynamic range does not exceed the established limits during the conversion process.

Color spectrum - allowed and valid values.

The term «color gamut» is used to designate a range or palette of colors reproduced by a television system when the subject of the photograph is illuminated with a reference white (standard light source D65 for NTSC/PAL). The color gamut is determined by the value of the chromaticity or chromaticity coordinates of the ICE for this system. This range of colors with variable saturation is reproduced on the video monitor screen with the values of red, green and blue signals or R'G'B' signals. When the values of the components are equal (i.e., R'= G' = B'), the image becomes colorless to the extent necessary to display shades of gray on a properly adjusted video monitor. Otherwise, for nonzero saturation values, a color hue will appear. All reproducible colors in the palette are available with independent setting of the values of the signals R'G'B'.

Since the values of the R'G'B 'signals directly embody these colors, the term «color gamut» is often used to denote the range of colors represented by all combinations R'G'B' signals that lie within the allowed limits from 0 to 700 mV. R'G'B 'signals that go beyond this voltage range can create the desired color on this video monitor, but they are outside the permissible color gamut. They can be cut or compressed during post-processing of signals, which will lead to color distortion when displayed on another video monitor, but they are out of the permissible color range. They can be cut or compressed during post-processing of signals, which will lead to color distortion when displayed on another video monitor.

The same happens in the R'G'B 'color space. Any signal that goes beyond the upper or lower bounds is unacceptable because the color falls out of the permissible color gamut. In addition, it is also unresolved, since one or more components exceed the allowed limits.

Allowed signals are those signals that do not violate the voltage limits of the signal set for a particular format, i.e. allowed signals limits for this format. Similarly, a resolved signal in a color difference format, such as Y'C'bC'r, may be invalid in a format in which it represents a signal that goes beyond the permissible color gamut. Such an invalid signal will always generate an unresolved signal when converted to the R'G'B 'format.

A valid signal is a signal that is in the color gamut and remains allowed when converting to any other format. Valid signal will be always allowed, but the allowed signal is not necessarily valid. The latter most often happens with color-difference component signals, the levels of which not independent, unlike RGB systems.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:41 Page 68

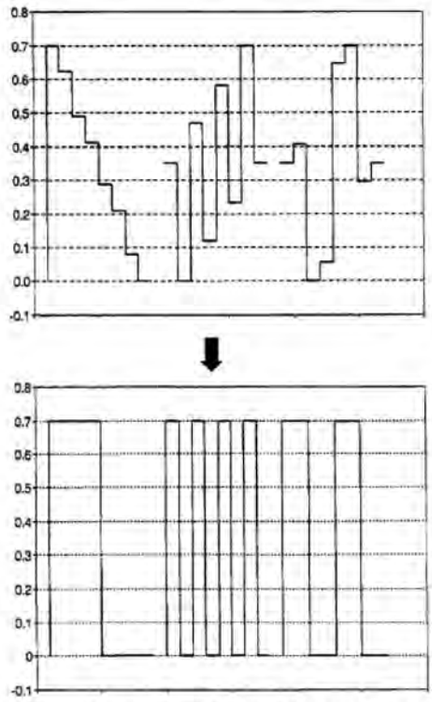


Fig. 5. Allowed and allowable color difference signal (top) converted to an allowed RGB signal (bottom)

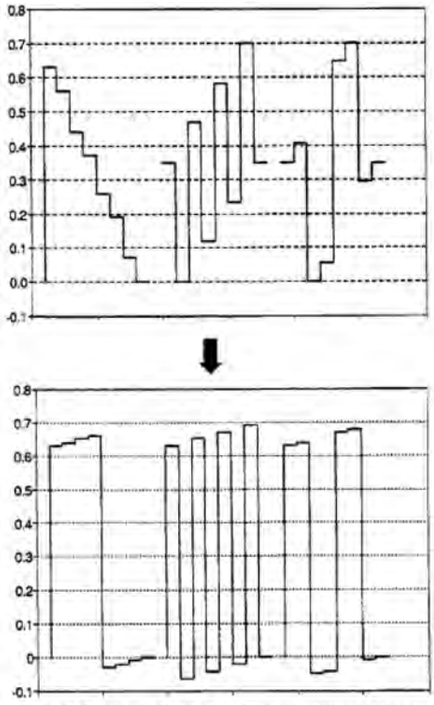


Fig. 6. Distorted color difference signal (top) and signal converted to RGB format (bottom)

Figures 5 and 6 show how a simple distortion of the gain in the color difference component signal can make the signal unacceptable, but it still remains resolved. Figure 5 shows the allowed and allowed color difference signal (top) converted to an allowed RGB signal (bottom).

Figure 6 shows the color difference signal (above), which has distortions in the brightness channel: in it, the relative gain is only 90% of the desired one. When this distorted signal is converted to the RGB format (below), the result is an unresolved signal: in it all three components lie below the minimum acceptable level. signal. Since a distorted color difference signal cannot be converted to an allowed RGB signal, it is invalid. Note that other types of distortion contribute to the formation of unacceptable signals. Valid signals can be converted, encoded and entered into any part of the video system without causing amplitude problems.

If we consider two color image coding standards for digital transmission – ITU 525 / 59.94 and ITU 625/50, then the number of samples in both standards for the luminance signal is 720, and the number of samples for color difference signals is 360 each. The number of bits per sample is 8, the quantization levels from 1 to 254 are reserved for the video signal, the levels 0 and 255 are reserved for synchronization.

Based on the above, we can assume that it is possible to choose the variant of encoding the image in such a way as not to take into account the forbidden values of the color gamut. To assess the quality of signal transmission, it is necessary to introduce some measures of error due to the effect of interference, if a signal value different from the transmitted value is accepted. Let us name these errors as risks, and for their display we introduce the matrix form of the record.

To quantify this, we introduce a risk matrix:

$$R = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,j} & \cdots & r_{1,N} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,j} & \cdots & r_{2,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{N-1,1} & r_{N-1,2} & \cdots & r_{N-1,j} & \cdots & r_{N-1,N} \\ r_{N,1} & r_{N,2} & \cdots & r_{N,j} & \cdots & r_{N,N} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$r_{i,j}$ is the magnitude of the errors (risks, losses), if instead of the transmitted value of the signal s_i, the recipient accepts the value s_j.

However, we must understand that every risk must arise with some probability. For the convenience of reflecting the probabilities of occurrence of each risk, we introduce a matrix of probabilities. We take into account that the sum of the probabilities in each row of the matrix must be equal to one.

In general, the probability matrix will look like:

$$P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,j} & \cdots & p_{1,N} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,j} & \cdots & p_{2,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{N-1,1} & p_{N-1,2} & \cdots & p_{N-1,j} & \cdots & p_{N-1,N} \\ p_{N,1} & p_{N,2} & \cdots & p_{N,j} & \cdots & p_{N,N} \end{pmatrix} \quad (2)$$

In addition to the likelihood of distortion, it is necessary to take into account the probability of a symbol appearing in the transmission channel. To record these probabilities, we use the probability vector of the signal value appearing in the channel. In general, the vector looks like:

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:42 Page 69

$$P_k = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

After the introduction of all coding characteristics, it is necessary to calculate the distortion risk factor and variance (considering that) $M(R) = K$:

$$K = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (r_{i,j} \cdot p_{i,j}) \cdot P_i \quad (4)$$

$$D(R) = M(R^2) - (M(R))^2 \quad (5)$$

It should be noted that these calculations must be carried out for all possible coding options, their total number can be found by the formula:

$$N = (2^n)! \quad (6)$$

n is the number of characters in the code pattern.

After calculating the risk coefficient and variance for all possible coding options, it can be concluded about the "best" coding method. To search for it, it is necessary to determine the coding method with the smallest distortion coefficient and the smallest variance value.

Conclusion

Thus, we were able to propose an algorithm for choosing the most "effective" version of the coding of a color image, taking into account the discarding of the "forbidden" values of the color gamut. The algorithm is based on the method of average risks. It takes into account the risk values when a transfer element is transferred to another one and itself, as well as the likelihood of these risks occurring.

References

1. Adzhemov A.S. Code Distance Table and its Application. *In proceedings of the IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF).* S. Petersburg, 2018. pp. 1-5.

2. Adzhemov A.S., Adzhemov S.A. On some features of binary code combinations. *In proceedings of the IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (ON BOARD).* Moscow, 2019. pp. 1-7.

3. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Features of assessing the quality of signal transmission in various metric spaces. *Fundamental problems of radio-electronic instrument-making.* 2017. Vol. 17. No. 4. pp. 886-888. (*in Russian*)

4. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. About features of evaluation of the quality of generation and signal processing at stage transformations in wiring and optical communication systems. *In proceedings of the IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (ON BOARD).* Moscow, 2018. pp.1-4.

5. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Features rate estimation options binary codewords with the digitalization of the signal. *In proceedings of the IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* Minsk, 2018, pp. 1-5.

6. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Building an Algorithm for Estimating the Effective Coding of a Source when Converting Signals in Various Metric Spaces. *In proceedings of the IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF).* S.-Petersburg, 2018, pp.1-4.

7. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. On the peculiarities of the evaluation of the quality of signal conversion under successive transformations in various metric spaces. *In proceedings of the XII International Industrial Scientific and Technical Conference Information Society Technologies*, 2018. pp. 211-213. (*in Russian*)

8. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Features of estimating the power of a set of choices for binary code combinations when digitizing a signal. *Synchronization systems, signal generation and processing.* 2018. Vol. 9. No. 1. pp. 5-8. (*in Russian*)

9. Kudryashova A.Y. Features of encoding evaluation in various source space configurations. *DSPA: Issues of application of digital signal processing*, 2018. Vol. 8. No. 3 pp. 228-232. (*in Russian*)

10. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Features of estimating the power of multiple choices of binary code combinations. *Fundamental problems of radio-electronic instrument-making.* 2018. Vol. 18. No. 4, pp. 926-929. (*in Russian*)

11. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y. Evaluation program of an efficient source coding algorithm under the condition of converting metric spaces. *In proceedings of the IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF).* S. Petersburg, 2019, pp. 1-5.

12. Adzhemov A.S., Kudryashova A.Y., Vlasyuk I.V. Application of Weber-Fechner Law in Image Transmission in the Field of Onboard Communications. *In proceedings of the IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (ON BOARD).* Moscow, 2019, pp. 1-6.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:42 Page 70

МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ УСЛОВИИ ДОПУСТИМЫХ И ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЦВЕТОВОЙ ГАММЫ

Кудряшова Анастасия Юрьевна,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, ***asykka@bk.ru***

Аннотация
В современных системах связи при передаче цветного изображения вопросы обеспечения требуемого качества передачи являются весьма актуальными. В свою очередь помехоустойчивое кодирование является важным фактором в обеспечении необходимой помехоустойчивости систем связи. При передаче сигналов используются несколько цветовых моделей, например, RGB или YCrCb. В то же время важную роль играет тот факт, что цветовая гамма имеет несколько запрещенных значений, которые могут быть отброшены при кодировании передаваемого изображения. В каналах R, G и B используется гамма-коррекция, которая не является оптимальной с точки зрения минимизации количества уровней квантования при визуальном наблюдении за изображением, а с другой стороны, эти модели не имеют одинаковой контрастности, то есть изменение, например, цветового тона или насыщенности на определенное значение будет заметно отличаться в зависимости от выбора начальных значений координат выбранного цвета. В работе предлагается оптимизировать выбор кодовых комбинаций для передачи цветного изображения. Предложен алгоритм оценки эффективности кодирования цветного изображения с учетом вывода из допустимых значений цветности, алгоритм оценки учитывает показатели рисков или искажений при кодировании двоичным кодом, а также учитывает виды возникающих ошибок в цифровом сигнале. Данный подход позволяет выявить более и менее эффективные методы кодирования цветного изображения. Было выявлено, что в зависимости от вида ошибок в цифровом сигнале различные варианты кодирования обеспечивают существенно отличные искажения в восстанавливаемом сигнале.

Ключевые слова: *двоичный код, эффективное кодирование, кодирование с исправлением ошибок, гамма-коррекция, сигнал RGB.*

Литература

1. *Аджемов А.С.* Таблица кодовых расстояний и ее применение / В материалах Международной конференции "Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах" (WECONF). С.-Петербург, 2018. С. 1-5.
2. *Аджемов А.С., Аджемов С.А.* О некоторых особенностях комбинаций двоичного кода / В материалах Международной научно-практической конференции IEEE "Системы формирования и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций" (ON BOARD). Москва, 2019. С. 1-7.
3. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Особенности оценки качества передачи сигналов в различных метрических пространствах // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 4. С. 886-888.
4. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Об особенностях оценки качества генерации и обработки сигналов на этапных преобразованиях в системах электропроводки и оптической связи / В материалах Международной научно-практической конференции IEEE "Системы формирования и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций" (ON BOARD). Москва, 2018. С.1-4
5. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Особенности оценки скорости вариантов двоичных кодовых слов с оцифровкой сигнала / В материалах Международной научной конференции IEEE "Системы синхронизации, генерации и обработки сигналов в телекоммуникациях" (SYNCHROINFO). Минск, 2018. С. 1-5.
6. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Построение алгоритма оценки эффективного кодирования источника при преобразовании сигналов в различных метрических пространствах" / В материалах Волновой электроники IEEE и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах (WECONF). С.-Петербург, 2018. С. 1-4.
7. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Об особенностях оценки качества преобразования сигналов при последовательных преобразованиях в различных метрических пространствах" / В материалах XII Международной промышленной научно-технической конференции "Технологии информационного общества", 2018. С. 211-213.
8. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Особенности оценки мощности набора вариантов для комбинаций двоичного кода при оцифровке сигнала // Системы синхронизации, генерация и обработка сигналов. 2018. Том. 9. № 1. С. 5-8.
9. *Кудряшова А.Ю.* Особенности оценки кодирования в различных конфигурациях исходного пространства // DSPA: проблемы применения цифровой обработки сигналов, 2018. Т. 8. № 3. С. 228-232.
10. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Особенности оценки мощности множественного выбора комбинаций двоичных кодов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 4. С. 926-929.
11. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю.* Программа оценки эффективного алгоритма кодирования источника в условиях преобразования метрических пространств" / В материалах Международной конференции IEEE "Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах" (WECONF). С.-Петербург, 2019. С. 1-5.
12. *Аджемов А.С., Кудряшова А.Ю., Власюк И.В.* Применение закона Вебера-Фехнера при передаче изображений в области бортовых коммуникаций / В материалах Международной научной конференции IEEE "Системы генерации и обработки сигналов в области бортовых коммуникаций" (ON BOARD). Москва, 2019. С. 1-6.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:42 Page 71

INNOVATIVE SAFETY SYSTEMS FOR MODERN VEHICLES

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10283

Stanislav S. Evtukov,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia,
ese-89@yandex.ru

Egor V. Golov,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia,
egorgoloff@yandex.ru

Nikita A. Ivanov,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia,
nikita19962323@gmail.com

Keywords: *security system, accident rate, costs, traffic accidents, autopilot vehicles.*

The paper considers the innovative security system of modern vehicles V2X (Vehicle-to-Everytning), its possible use and partial implementation on public roads, as well as the sub-system Vehicle-to-Everytning: Vehicle-to-Infrastructuret (V2I), Vehicle-to-Vehicle (V2V,), Vehicle-to-network (V2N). This system is a promising direction for the study of engineers, programmers, communications workers from around the world. The purpose of this article is: to acquaint the reader with the V2X technology and to show the possible application of this technology on the territory of the Russian Federation on major highways with a dedicated road lane for the movement of autopilot vehicles. A new systematic approach to the organization of road safety in the future will significantly reduce accidents on public roads, the cost of eliminating the consequences of road traffic accidents, the cost of transporting goods and increase the capacity of existing road networks. The creation of such dedicated road lanes will initiate the gradual introduction of unmanned vehicles into the daily life of society, which will allow the Russian Federation to keep up with global trends and the prospect of significantly reducing road mortality by reducing the human factor's influence on the situation on public roads. The obtained data and experience in the exploitation of the above technologies on the dedicated road lane will allow in the future to modernize, change and improve the whole industry of autopilot vehicles around the world.

Information about authors:
Stanislav S. Evtukov, *Ph.D., Associate Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia*
Egor V. Golov, *assistant Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia*
Nikita A. Ivanov, *student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia*

Для цитирования:
Евтюков С.С., Голов Е.В., Иванов Н.А. Инновационные системы безопасности современных транспортных средств // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №6. С. 71-76.

For citation:
Evtukov S.S., Golov E.V., Ivanov N.A.(2019). Innovative safety systems for modern vehicles. *T-Comm*, vol. 13, no.6, pp. 71-76.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:43 Page 72

Introduction

Modern vehicles have an advanced passive safety system that provides reliable protection for the driver and passengers in the event of a traffic accident. But passive safety is not enough, because it is easier to prevent the occurrence of a traffic accident than to eliminate possible damage. To this end, the engineers of leading automotive companies in cooperation with leading IT companies each year introduce new technological solutions to provide drivers and passengers with active safety systems.

At the moment, modern cars are equipped with such active safety devices: anti-lock braking system or ABS, traction control or ASC, course stability or ESP, braking force distribution system or EBD, differential lock, lifting and lowering assistance system, parking sensors, car detection system "Blind zones", a preventive system of emergency braking [1].

The above active safety systems are constantly being improved, improved and modernized, thereby gradually reducing the number of accidents on public roads. Nevertheless, the situation remains dramatic, according to the World Health Organization, about 1.35 million people die annually as a result of road traffic accidents (186 thousand of them are children), more than 3 thousand people die every day and about 100 thousand are seriously injured. This indicator has remained almost unchanged since 2007 [2].

The main culprit in most road accidents is usually not the condition of the vehicle or the road, but the driver himself, who for various reasons did not follow the rules of the road, violated work and rest schedules or did not use the provided means of protection. In addition to common causes, there are many purely individual factors that contribute to deliberate violation of the rules and an increase in the number of accidents. This is the so-called "human factor". By the way, an analysis of transport incidents shows that up to 80% of them are related to the human factor [3].

Referring to the official statistics on road traffic accidents for January – December 2018 in the Russian Federation. A total of 168099 traffic accidents occurred during this period, which is 0.8% less than in the same period of 2017 [4].

In view of the above information, it becomes obvious that the measures taken to organize traffic are not enough to ensure safety on public roads, the trend towards a reduction in road mortality is changing too slowly, and the approach must be radically changed.

Based on the data that the human factor is the main cause of accidents, it is logical to consider options to reduce the significance of the driver error behind the driving wheel.

At the moment, attempts are being made to introduce autopilot systems for modern vehicles, but these systems do not work perfectly due to the limited functionality of the equipment and software installed on the vehicle. The sophisticated and constantly improving autopilot algorithms have one significant limitation, namely, the range and accuracy of onboard sensors, such as lidars, radars and video cameras. [5]

Innovative technologies and examples of their implementation

In order to complement the onboard sensors, to expand the ability of the vehicle to navigate and even communicate with other participants on the road in the world are researching innovative technology Vehicle-to-Everything (V2X).

Vehicle-to-Everything (V2X) technology is an intelligent transport system that allows you to create a single network of vehicle-controlled and, most importantly, safe vehicle traffic, taking into account information provided by the vehicles themselves, transport and urban infrastructure facilities, weather stations, and traffic control centers.

The Vehicle-to-Everything (V2X) system consists of the following subsystems: Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-network (V2N).

Vehicle-to-vehicle, V2V is a system of interaction of one vehicle with another by a wireless connection, which allows you to exchange the necessary information about the location of the vehicle, the speed of movement, the expected trajectory of movement. The scope of this technology is great. For example, sensors of blind zones are installed in the car, but this sensor does not always work correctly, and in this situation V2V technology comes to the driver's help, which with great accuracy will notify the driver about the vehicle following him in the blind zone and prevent a possible dangerous situation on the road. Another example of application is that a car column moves at an equal speed at an equal safe distance from each other (using V2V technology), the car recognizes a potentially dangerous situation ahead (an accident, an emergency stop in front of a vehicle) and a column going from behind is informed of the need for braking, the entire column and nearby cars stop. As well as help when changing lanes on the principle of a blind zone, but with a large number of parameters, a warning about the danger of overtaking, warning of a possible collision at intersections, warning of movement on the opposite lane, cooperative adaptive cruise control (convoy).

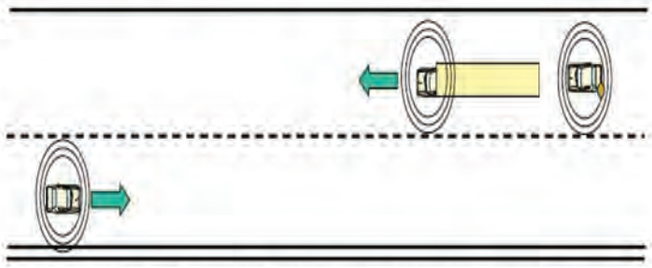


Fig. 1. The truck warns about going to overtake a passenger car about the dangers of such a maneuver

Vehicle-to-Infrastructure, V2I is a vehicle interaction system with road and transport infrastructure. This system assumes that vehicles can exchange information with road signs, billboards, traffic lights, road markings and other types of road and transport infrastructure. Wireless devices along public roads will be able to notify the on-board computer of the car and the driver about possible dangers, road works, speed limits, and prevent speeding violations, road marking instructions [6].

The use of Vehicle-to-Infrastructure, V2I in the concept of "smart intersection":

Within the framework of this concept, each vehicle constantly informs those around its exact GPS coordinates, and the computer at the intersection receives this information and calculates the speed with which each approaching vehicle must be followed so as not to encounter perpendicular flow, maintaining the maximum throughput of this intersection (Fig. 2).

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:43 Page 73

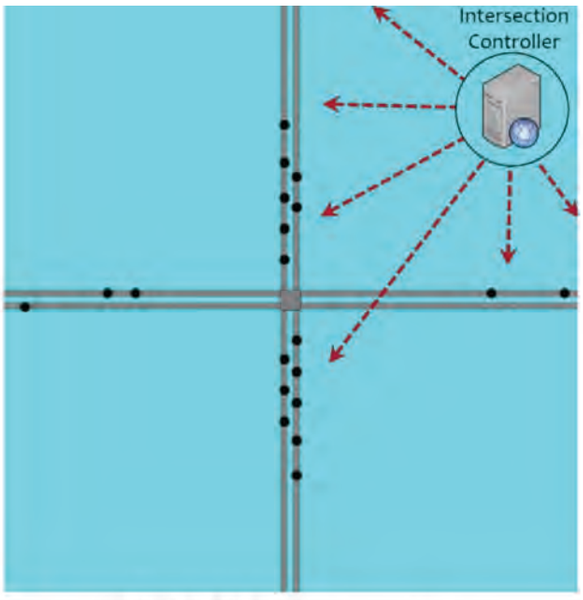


Fig. 2. Model of "smart intersection"

The concept assumes that a "smart intersection" can provide such throughput, where instead of a thousand cars, only ten vehicles per hour will have to slow down to zero, and more often when the intersection is not high and medium loaded, the vehicles will not stop at all [7].

In early October 2018, the Japanese automaker Honda demonstrated the work of the "smart intersection", built on the basis of V2X communications under the working name Smart Intersection. The "smart intersection" prompted road users about the dangers at the intersection. A "smart intersection" was deployed in the US city of Marysville, Ohio, as part of a pilot project 33 Smart Mobility Corridor, aimed at expanding the functionality of automotive sensors in order to prevent accidents [8].

In 2007, in the United States of America there were about 2.4 million accidents related to intersections, which is 40% of all registered accidents and 21.5% of accidents on roads. Intersections represent a disproportionate share of road safety issues and are a national, state, and local priority in the United States [9].

In the first nine months of 2018, 119 thousand road accidents occurred, and 105 thousand due to traffic violations, of which the most common was non-compliance with the order of travel at intersections (20 thousand cases – 17% of the total), the report says traffic Ministry of Russia.

Vehicle-to-Network, V2N is a system that collects and processes information in a single traffic control center from all vehicles, transport infrastructure, satellites and weather stations, giving all participants and organizers accurate and up-to-date information about the situation on public roads. Information received in a single traffic control center allows you to analyze and organize all processes occurring on public roads with the greatest degree of automation, safety and efficiency (Fig. 3).

According to the information provided by the Reuters news agency, the European Union approved the allocation of 1.75 billion euros from the state budgets of France, Germany, Italy and the UK for the development of the Connected Car technology and microelectronics related to the Internet thing (IoT). The main goal is to research and develop innovative technologies, chips and sensors that can be embedded in devices, automatic unmanned vehicles, commercial and industrial devices. The project is expected to stimulate research and development in the field of the Internet of Things and "connected cars" [10].

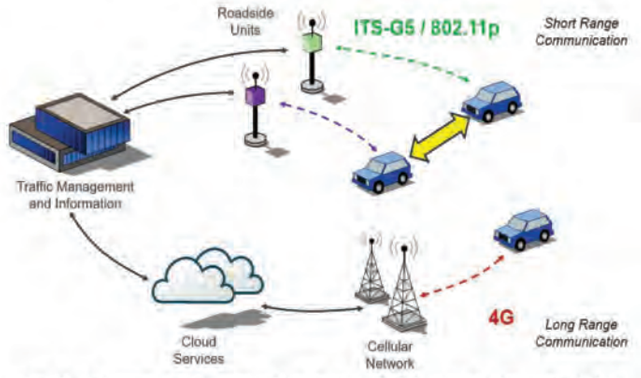


Fig. 3. Schematic diagram of the work of Vehicle-to-Network, V2N

Based on the information provided by the magazine "Vestnik GLONASS" in Russia, the implementation of a pilot project to develop V2V and V2X technologies on the M11 highway, which was scheduled to start at the end of 2018, has not yet begun. Meanwhile, by delaying the start of this project, Russia risks becoming a "white spot" on whose territory the advanced functions of modern cars will not work. This was stated to journalists by the president of the non-profit partnership "Promoting the development and use of navigation technologies" and co-head of the Avtonet scientific-technical activity working group Alexander Gurko [11].

Autonomous vehicles, "connected" and electric cars should go along the M11. GLONASS NP completed draft design and is ready to implement the project. In Russia, this will be the first pilot project to develop technologies V2V ("car-car"), V2I ("car-infrastructure"). In Europe, there are about 12 such pilots being implemented. Already a survey of a 15 km section on the M11 highway has been carried out, the corresponding infrastructure has been made in cooperation from a dozen companies from various segments. The test scenario that should be worked out in this project was approved: a warning to the driver about an obstacle ahead of traffic, a warning about road works, blind zones when turning at an intersection, speed when approaching an intersection. The "first day" scenario is standardized. Currently there is a standardization of other scenarios related to traffic management and road safety [12].

The purpose of this article is to acquaint the reader with the V2X technology and the application of this technology on major highways with a dedicated lane for the movement of autopilot vehicles.

Technologies and algorithms of autopilot vehicles are currently not perfect, but only go through the next stage of their formation and development. Therefore, at the initial stages of even partial introduction of V2X technology, it will be hard to avoid distrust and sound skepticism on the part of users and other road users. Based on this idea, it can be assumed that the introduction of the V2X system in well-regulated areas could reduce the level of mistrust of users and road users.

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:44 Page 74

At the initial stage, the V2X technology can show the efficiency and safety of its work at the airport, large warehouses and logistics points, where a clear and consistent schedule of successive actions of the operator who drives vehicles, such as a bus for transporting people from the ramp to terminal and back, luggage trolleys at the airport, forklift in stock, etc.

Proposed model

It is proposed to consider the implementation of the V2X system in a specific and limited area between two large populated cities of Russia, where there are a large number of logistics centers. As an example, take the cities of Moscow and St. Petersburg and the new expressway M-11 Moscow-St. Petersburg that runs between them, which stretches from the Moscow ring road to the junction to the Ring Road around St. Petersburg. The total length of the route is 669 km. Technical parameters of the highway M-11: the category of the road is 1A (highway), the estimated speed is 150 km/h, the number of lanes is 4, 6, 8, 10 (depending on the section), the width of the lane is 3.7 m, the width of the dividing line is 6 m, the illumination along the entire motorway [13].

Motorway M – 11 is perfect for introducing dedicated lanes for unmanned vehicles on it, as it has a sufficient number of lanes, a prepared and developed infrastructure with the possibility of further modernization.

It is assumed that on the dedicated and prepared lanes for the movement of unmanned vehicles will move both cars and loaded wagons.

In total, it is proposed to allocate two lanes on each side for the movement of autopilot vehicles and separate the "New Jersey" type from the main stream with barrier fencing. (Fig. 4) The use of fences of this type on the roads is due to the need to reduce accidents and prevent road incidents that can lead to serious injuries and deaths of road users, especially drivers of vehicles and their passengers.

The track along its entire length must be equipped with a special type of marking, sensors, control and monitoring cameras according to the V2X technology described above.

Special markup means that granules are added to the standard markup, which enhance detection of the markup with ultrasonic sensors when driving in low visibility conditions or when the road is snowy, which eliminates the possibility of error reading the markers by autopilot algorithms. This decision solves one of the main problems in safety when driving on autopilot vehicles [14].

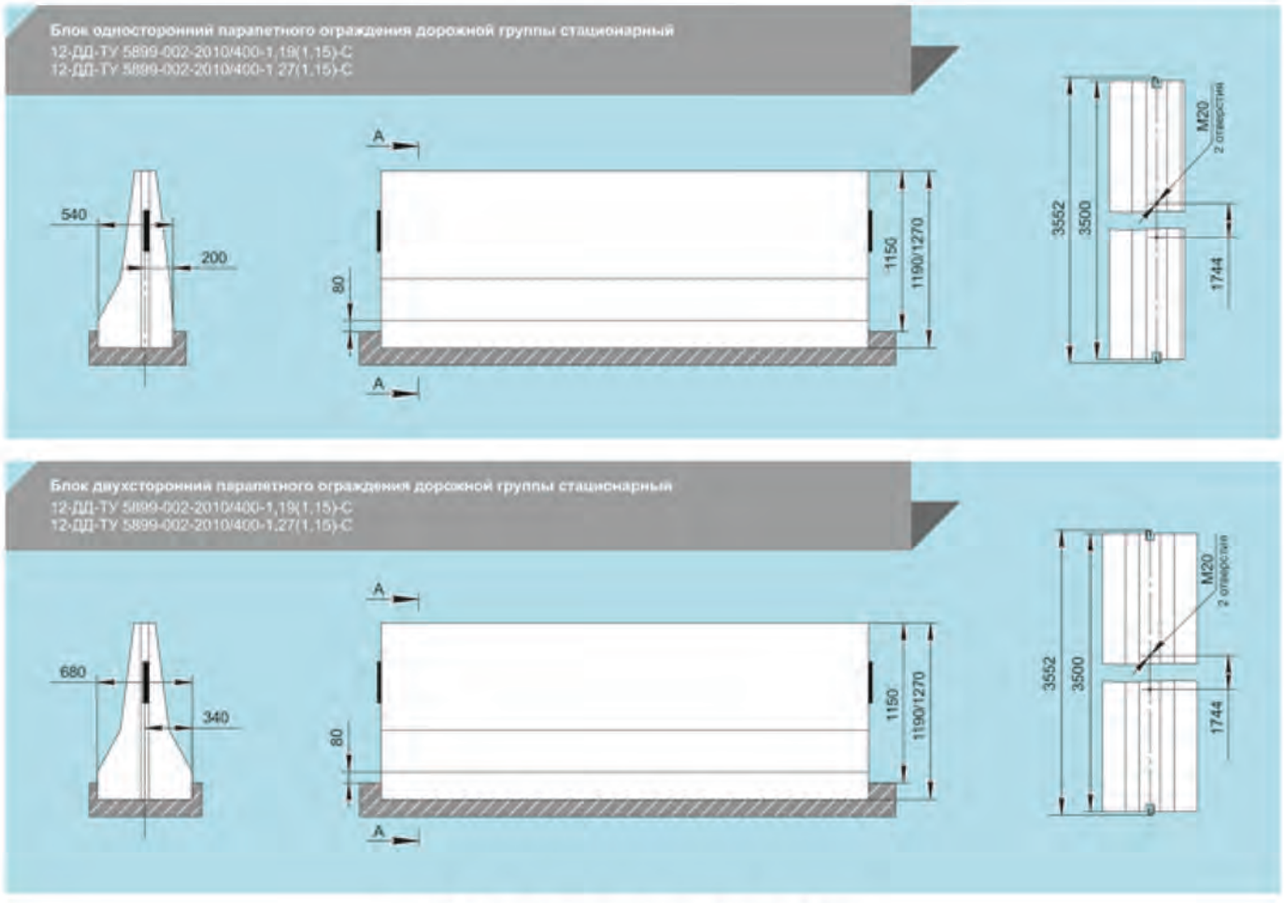


Fig. 4. Parapet fencing scheme. Type "New Jersey"

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:45 Page 75

An automatic checkpoint (AC) should be provided at the entrance and exit from the designated area for autopilot transport (of the "Western High-Speed Diameter" type). Vehicles (car, truck, bus) with autopilot function must be equipped with a special transponder, which would notify the system that this vehicle is indeed autopilot and can be admitted to a dedicated road lane for autopilot vehicles.

In theory, such a project can be made more financially profitable. For example, for drivers of a vehicle that is equipped with autopilot technology, can be provided special conditions on a dedicated road lane. Such a privilege can serve as increased maximum speed on the selected road lane. Of course, in this case, the above-mentioned transponder will also serve as a means of fee collection from the driver of a vehicle with autopilot.

Thanks to monitoring CCTV cameras, an emergency commissioner is ensured at the designated site - a person authorized to travel to the areas of the designated lanes in case of emergency situations (vehicle breakdowns, cargo drops, etc.).

Also, for safety and continuity of traffic flow, it is necessary to provide pockets for emergency stop. In the event of the slightest malfunction of the vehicle, the autopilot or driver will bring the vehicle to the nearest emergency stop pocket [15].

To designate dedicated lanes for an autopilot vehicle (ATS), it is proposed to adopt the road signs below. The original version of the sign belongs to the design studio of Artem Lebedev [16]. The following images is a revised version for dedicated lanes for unmanned vehicles. (Fig. 5 and 6).

Fig. 5. Road sign "Attention, Dedicated road for AV"

Fig. 6. Road sign "End of a dedicated road section for AV"

Conclusion

In perspective, the described model of a dedicated road lane for autopilot transport can be used for test implementation and testing. A dedicated lane for autopilot vehicles will reduce risks when using the autopilot, reduce costs for shipping goods to logistics companies, and increase the comfort and safety of ordinary drivers.

The creation of such dedicated road lanes will initiate the gradual introduction of unmanned vehicles into the daily life of society, which will allow the Russian Federation to keep up with global trends and the prospect of significantly reducing road mortality by reducing the human factor's influence on the situation on public roads.

References

1. Tyul'kin E.V., Evtyukov S.A., Stepina P.A. (2017). Fizicheskaya model' frontal'nogo naezda avtomobilya na peshekhoda [Physical model of the front car hitting the pedestrian]. *Vestnik Grazhdanskih Inzhenerov*. No. 3(62), pp. 259-264.
2. World Health Organization (2019). URL: https://www.who.int/ru (Accessed 10 April 2019).
3. Evtyukov S.S., Golov E.V. *Rekonstrukciya dorozhno-transportnyh proisshestvij* [Reconstruction of traffic accidents]. Izdatel'skij dom "Petropolis", Sankt-Peterburg. 204 p.
4. State Traffic Inspectorate (2019) - URL: https://гибдд.рф/ (Accessed 10 April 2019).
5. Evtyukov S.A., Terent'ev A.V., Ginzburg G. (2017). Metodologiya upravleniya racional'nym srokom sluzhby avtomobilya [Methodology for managing a rational car life]. *Mir Transporta i Tekhnologicheskih Mashin*. No.1(56), pp. 3-10.
6. Evtyukov S.S., Kurakina E.V. (2014). Vliyanie parametrov dorogi na opredelenie skorosti dvizheniya pri ekspertnom issledovanii DTP [The influence of road parameters on the determination of the speed of movement during an expert study of an accident]. *Vestnik Grazhdanskih Inzhenerov*. No.1(42), pp. 103-108.
7. Mixed Integer Linear Programming (MILP) for Optimal Scheduling of Autonomous Vehicle Intersection Crossing (2019) - URL: http://www.alirezafayazi.com/projects.html (Accessed 10 April 2019).
8. Creating new ideas (2019) - URL: http://www.hondaresearch.com/research.php (Accessed 10 April 2019).
9. Federal Highway Administration (2019) - URL: https://safety.fhwa.dot.gov/intersection (Accessed 10 April 2019).
10. European Commission. Press Release Database (2019) - URL: http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-18-6866_en.htm (Accessed 10 April 2019).
11. EURASIA News. The human factor is the basis of traffic safety (2019) - URL: http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2017-05a23 (Accessed 10 April 2019).
12. Interindustry Journal of Navigation Technologies. GLONASS Bulletin (2019) - URL: vestnik-glonass.ru/~ZOgud (Accessed 10 April 2019).
13. AVTODOR Toll roads (2019) - URL: https://avtodor-tr.ru/ru/platnye-uchastki/m11/ (Accessed 10 April 2019).
14. Kurakina E.V. (2017). Povyshenie effektivnosti nazemnyh transportno-tekhnologicheskih mashin v zimnih usloviyah [Improving the efficiency of ground transport and technological machines in winter conditions]. *Vestnik Grazhdanskih Inzhenerov*. No.2(61), pp. 205-212.
15. Kurakina E.V. (2019). Issledovanie parametrov tormozheniya transportnyh sredstv [Investigation of vehicle braking parameters]. *Vestnik Grazhdanskih Inzhenerov*. No.2(43), pp. 127-134.
16. Artemy Lebedev Art-Studio (2019) - URL: https://www.artlebedev.ru/ (Accessed 10 April 2019).

Nom-6-2019.qxd 29.06.2019 1:45 Page 76

ИННОВАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Евтюков Станислав Сергеевич, *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,* ***ese-89@yandex.ru***
Голов Егор Викторович, *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,* ***egorgoloff@yandex.ru***
Иванов Никита Антонович, *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,* ***nikita19962323@gmail.com***

Аннотация
Рассматривается инновационная система безопасности современных транспортных средств V2X (Vehicle-to-Everytning), а также её подсистемы: автомобиль – инфраструктура (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), автомобиль – автомобиль (V2V, Vehicle-to-Vehicle), автомобиль – сеть (Vehicle-to-network, V2N). Данная система является перспективным направлением для изучения специалистами из разных стран мира. Целью данной статьи является ознакомление читателя с технологией V2X и возможным применением этой технологии на территории РФ на крупных магистралях с выделенной полосой для движения автопилотируемых транспортных средств. Новый системный подход к организации безопасности дорожного движения в перспективе позволит существенно снизить аварийность на дорогах общего пользования, затраты на устранение последствий дорожно-транспортных происшествий, стоимость перевозок грузов и повысить пропускную способность уже существующих дорожных сетей. Создание таких выделенных дорожных полос приведет к постепенному внедрению беспилотных транспортных средств в повседневную жизнь общества, что позволит Российской Федерации идти в ногу с глобальными тенденциями и перспективой значительного снижения смертности на дорогах за счет уменьшения влияния человеческого фактора на ситуацию на дорогах общего пользования. Полученные данные и опыт использования вышеуказанных технологий на выделенной полосе движения позволят в будущем модернизировать, изменить и усовершенствовать всю индустрию автопилотных транспортных средств по всему миру.

Ключевые слова: *система безопасности, аварийность, затраты, дорожно-транспортные происшествия, автопилотируемые транспортные средства.*

Литература

1. *Тюлькин Е.В., Евтюков С.А., Степина П.А.* Физическая модель фронтального наезда автомобиля на пешехода // Вестник Гражданских Инженеров. 2017. №3(62). С. 259-264.
2. Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]. URL: https://www.who.int/ru.
3. *Евтюков С.С., Голов Е.В.* Реконструкция дорожно-транспортных происшествий (монография) // Издательский дом "Петрополис", Санкт-Петербург. 204 с.
4. Государственная инспекция дорожного движения [Электронный ресурс]. URL: https://гибдд.рф.
5. *Евтюков С.А., Терентьев А. ., Гинзбург Г.* Методология управления рациональным сроком службы автомобиля // Мир Транспорта и Технологических Машин. 2017. №1(56). С. 3-10.
6. *Евтюков С.С., Куракина Е.В.* Влияние параметров дороги на определение скорости движения при экспертном исследовании ДТП // Вестник Гражданских Инженеров. 2014. №1(42). С. 103-108.
7. Mixed Integer Linear Programming (MILP) for Optimal Scheduling of Autonomous Vehicle Intersection Crossing [Электронный ресурс]. - URL: http://www.alirezafayazi.com/projects.html.
8. Creating new ideas [Электронный ресурс]. - URL: http://www.hondaresearch.com/research.php.
9. Federal Highway Administration [Электронный ресурс]. - URL: https://safety.fhwa.dot.gov/intersection.
10. European Commission. Press Release Database [Электронный ресурс]. - URL: http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-18-6866_en.htm.
11. ЕВРАЗИЯ Вести. Человеческий фактор - основа безопасности движения [Электронный ресурс]. - URL: http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2017-05a23.
12. Межотраслевой журнал навигационных технологий Вестник ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. - URL: vestnik-glonass.ru/~ZOgud.
13. АВТОДОР Платные дороги [Электронный ресурс]. - URL: https://avtodor-tr.ru/ru/platnye-uchastki/m11.
14. *Куракина Е.В.* Повышение эффективности наземных транспортно-технологических машин в зимних условиях // Вестник Гражданских Инженеров. 2017. №2(61). С. 205-212.
15. *Куракина Е.В.* Исследование параметров торможения транспортных средств // Вестник Гражданских Инженеров. 2014. №2(43). С. 127-134.
16. Студия Артемия Лебедева [Электронный ресурс]. - URL: https://www.artlebedev.ru.

Информация об авторах:
Евтюков Станислав Сергеевич, *к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
Голов Егор Викторович, *аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
Иванов Никита Антонович, *студент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*