

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблишер"

*Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет*

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблишер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2020

Адрес редакции и издателя

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная,

д. 8, стр. 1, офис 512-514

e-mail: t-comm@media-publisher.ru

Тел.: +7 (495) 957-77-43

Адрес типографии

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

Индексация журнала:

Ulrich's Periodicals Directory; elibrary.ru (ПИНЦ)

Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);

Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;

Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Journal is registered by Federal Service for monitoring compliance with cultural heritage protection law

Media Registration Certificate

PI No. FS77-55956. Date of issue: November 7, 2013

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2020

Editorial and Publisher Address

111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str. 8, bloc 1, office 512-514

e-mail: t-comm@media-publisher.ru.

Tel.: +7 (495) 957-77-43

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

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

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

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 Detefon International 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 Detefon), 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

Ибрагимов Байрам

(д.т.н., профессор Азербайджанского технического университета, АзТУ), Азербайджан

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

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., Европейский институт стандартизации – ETSI), Великобритания

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Сычук А.Н., Варданян В.А.

Искажение импульсных сигналов в многоканальных системах передачи с когерентным детектированием, вызванное явлениями фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне

4

Коршунов В.Н., Овчинникова И.А., Шишова Н.А.

Пространственный параллелизм высокоскоростной передачи информации по оптическим волокнам

13

СВЯЗЬ

Моисеев В.И.

Экспериментальное исследование структуры пакетного буфера Ethernet коммутатора

18

ИНФОРМАТИКА

Винограденко А.М., Будко Н.П.

Адаптивный контроль технического состояния автономных сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий

25

ТРАНСПОРТ

Поляков А.С., Трескинский Д.В.

Дорожные контроллеры - прошлое, настоящее, будущее

36

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Мохаммед О.А.А.

Разработка подходов к обеспечению надежной экстренной связи в условиях чрезвычайных ситуаций

42

Липилина Л.В.

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения линдли и связанные с ним численные методы

49

ИНФОРМАТИКА

Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Статьев В.Ю.

Классификация угроз безопасности персональных данных в информационных системах

56

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Sychuk A.N., Vardanyan V.A.**
Pulsed signals distortions in multichannel coherent detection transmission systems caused by self-phase modulation and cross-phase modulation in optical fiber 4
- Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shishova N.A.**
Spatial parallelism of high-speed transmission of information over optical fibres 13

COMMUNICATIONS

- Moiseev V.I.**
Experimental evaluation of Ethernet switch packet buffer structures 18

COMPUTER SCIENCE

- Vinogradenko A.M., Budko N.P.**
Adaptive control of technical condition of autonomous complex technical objects on the basis of intelligent technologies 25

TRANSPORT

- Polyakov A.S., Truscinski D.V.**
Road controllers – past, nowadays, future 36

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Mohammed O.A.A.**
Development of approaches to ensure reliable emergency communications in emergencies 42
- Lyudmila V.L.**
The spectral decomposition method for solving the lindley integral equation and related numerical methods 49

COMPUTER SCIENCE

- Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu.**
Classification of personal data security threats in information systems 56

T•C o m m

Telecommunications and transport

Volum 14. №1-2020

Release date: 20.01.2020

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

Founder: "Media Publisher", Ltd.

Publisher: Svetlana S. Dymkova
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*

Dulkeyts Eric

Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, *USA*

Golovachyov Julius

Managing Consultant Detecon International GmbH, *Germany*

Grebennikov Andrey

Ph.D., Sumitomo Electric Europe, *United Kingdom*

Ibrahimov Bayram

Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU),
Azerbaijan

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*

Sharpe Michael

PhD, 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*

www.media-publisher.ru

ИСКАЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С КОГЕРЕНТНЫМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ, ВЫЗВАННОЕ ЯВЛЕНИЯМИ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ И ФАЗОВОЙ КРОСС-МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-4-12

Сычук Анатолий Николаевич,
ФГБОУ ВО СибГУТИ, г. Новосибирск, Россия,
tolya030394@mail.ru

Варданын Вардгес Андраникович,
ФГБОУ ВО СибГУТИ, г. Новосибирск, Россия,
vardgesvardanyan@mail.ru

Ключевые слова: нелинейные явления, фазовая кросс-модуляция, фазовая самомодуляция, спектральное разделение каналов, когерентный прием, помехозащищенность сигнала.

Исследуется влияние эффектов фазовой самомодуляции (ФСМ) и фазовой кросс-модуляции (ФКМ) на помехоустойчивость передаваемых импульсных сигналов в многоканальной системе передачи со спектральным уплотнением в зависимости от параметров системы передачи: уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне и типа линейных кодов. На приемной стороне, после когерентного фотодетектирования импульсных сигналов анализируются полученные глаз-диаграммы. Критерием оценки влияния ФСМ и ФКМ на помехоустойчивость передаваемых сигналов принят Q-фактор, который вычисляется графическим способом с помощью глаз-диаграммы. Имитационная модель многоканальной волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов реализована в среде моделирования MathCAD. Влияние явлений ФСМ и ФКМ на передаваемый сигнал имитируется как искажение фазы этого сигнала при его распространении по стандартному одномодовому волокну и преобразование этих искажений в амплитудные при фотодетектировании. Показано, что из-за влияния ФСМ и ФКМ при увеличении уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне происходит ухудшение показателя качества сигнала. В 128-канальной системе передачи с канальной скоростью передачи данных 40 Гбит/с, увеличение суммарной мощности с 2 до 30 мВт приводит к снижению величины Q-фактора при использовании линейного кода передачи NRZ в 8 раз и при использовании кода RZ в 9 раз. В работе показано, что по сравнению с линейным кодом NRZ, использование кода RZ позволяет уменьшить влияние ФСМ и ФКМ и увеличить Q-фактор в среднем в 1.7 раза. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов для оценки потенциального вклада явлений ФСМ и ФКМ в снижение помехоустойчивости системы.

Информация об авторах:

Сычук Анатолий Николаевич, аспирант, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ФГБОУ ВО СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия

Варданын Вардгес Андраникович, профессор кафедры многоканальной электрической связи и оптических систем, д.т.н., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики" (ФГБОУ ВО СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия

Для цитирования:

Сычук А.Н., Варданын В.А. Искажение импульсных сигналов в многоканальных системах передачи с когерентным детектированием, вызванное явлениями фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 4-12.

For citation:

Sychuk A.N., Vardanyan V.A. (2020) Pulsed signals distortions in multichannel coherent detection transmission systems caused by self-phase modulation and cross-phase modulation in optical fiber. *T-Comm*, vol. 14, no.1, pp. 4-12. (in Russian)

Введение

Технологии спектрального уплотнения (WDM – wavelengths division multiplexing), применяемые в современных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП), позволяют передавать одновременно большое количество спектрально разделенных каналов (dense WDM – DWDM), что позволяет существенно повысить пропускную способность систем связи [1]. Однако увеличение количества каналов передачи неизбежно приводит к тому, что уровень суммарного оптического излучения от всех каналов передачи, вводимых в оптоволокно, будет возрастать. В процессе распространения оптического излучения через среду передачи происходит взаимодействие материала среды передачи и оптического излучения. Как результат – увеличение мощности оптического излучения приводит к изменению показателя преломления среды передачи – появляется нелинейная составляющая показателя преломления, зависящая от интенсивности оптического излучения [2, 3]. В результате, увеличение уровня суммарной мощности неизбежно приводит к возникновению различных нелинейных явлений, два из которых – фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кроссмодуляция (ФКМ), которые значительно ухудшают помехоустойчивость современных ВОСП-DWDM [4, 5]. Явление ФСМ возникает вследствие самовоздействия интенсивности распространяющегося оптического сигнала на эффективный показатель преломления среды передачи и, следовательно, всегда возникает при распространении оптического излучения через оптоволокно. Явление ФКМ возникает при совместном распространении двух и более спектральных каналов в оптоволокне и связано с тем, что на эффективный показатель преломления для каждого спектрального канала оказывает воздействие, как интенсивность излучения самого спектрального канала, так и интенсивность излучения от соседних спектральных каналов. Явление ФКМ всегда сопровождается явлением ФСМ [6, 7].

Целью данной работы является исследование ухудшения помехоустойчивости ВОСП-DWDM, вызванного явлениями ФСМ и ФКМ, возникающими в оптоволокне. Критерием оценки качества импульсных сигналов принят Q -фактор, определяемый на приемной стороне, после когерентного (гомодинного) приема. Для этого в среде MathCAD реализована имитационная модель для оценки влияния явлений ФСМ и ФКМ на показатели качества передаваемых оптических импульсных сигналов.

Структурная схема

На рисунке 1 представлена структурная схема многоканальной ВОСП-DWDM с гомодинным приемом. На передающей стороне, в каждом канале при помощи лазерных диодов (ЛД) формируются оптические несущие с заданной длиной волны и уровнем выходной мощности оптического излучения. В модели предусмотрена возможность изменения уровня выходной мощности лазерного диода, а так же длины волны оптической несущей. Следует отметить, что лазерные диоды генерируют оптические несущие с длинами волн, близкими друг к другу, из диапазона «С» для стандартного одномодового волокна (SSMF – standard single mode fiber) [8].

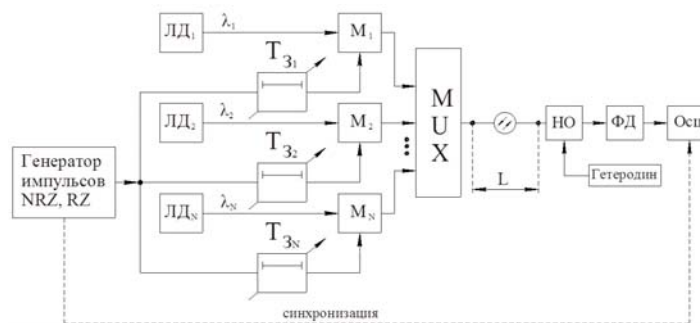


Рис. 1. Структурная схема многоканальной ВОСП-WDM с когерентным детектированием

Оптические несущие поступают на один из входов оптических модуляторов (М). На другой вход соответствующих оптических модуляторов подаются модулирующие сигналы, формируемые при помощи генератора импульсов NRZ, RZ, при этом логической «1» модулирующего сигнала соответствует наличие оптического излучения на выходе модулятора, а логическому «0» – отсутствие оптического излучения. Так же в работе учитывается межсимвольная интерференция сигналов в соседних тактовых интервалах. В модели предусмотрена возможность изменения длительности модулирующих импульсов в генераторе импульсов NRZ, RZ.

Рассматриваются сигналы со скоростью передачи 40 Гбит/с в каждом канале. Модулированные оптические несущие поступают на вход соответствующих оптических линий задержки (T_3). Линии задержки вносят временные задержки импульсов от нуля до двух тактовых интервалов. Рассматриваются также два режима работы всех линий задержки. В первом режиме работы генерируется фиксированный интервал задержки. Данный режим работы реализует наилучший случай передачи, при котором явления ФСМ и ФКМ оказывают наибольшее влияние на показатели качества импульсных сигналов. Во втором режиме работы линии задержки вносят случайные временные задержки, величина которых находится в диапазоне от нуля до удвоенной длительности тактового интервала бита модулирующей последовательности. В дальнейшем, систему передачи, функционирующую в первом режиме работы линии задержек, будем называть синхронной, а функционирующую во втором режиме – асинхронной.

В реальных ВОСП-DWDM синхронная модуляция всех модуляторов – маловероятный процесс, так как в качестве генераторов импульсов используются реальные, независимые друг от друга источники импульсных последовательностей. При асинхронной передаче оптические сигналы в каждом канале передачи возникают в случайные моменты времени, соответствующие интервалам задержек. Выходные оптические сигналы модуляторов поступают на вход оптического мультиплексора (MUX), объединяются и поступают на вход оптоволокна. На приемной стороне мультиплексированный сигнал с выхода оптического волокна поступает на один из входов направленного ответвителя (НО). На другой вход оптического ответвителя поступает оптическое излучение, генерируемое гетеродином. В данной работе предполагалось, что частота излучения гетеродина совпадает с частотой детектируемого оптического сигнала, что соответствует гомодинному типу когерентного детектирования.

Оптическое излучение с выхода НО поступает на фотодетектор (ФД) при помощи которого выполняется детектирование принимаемого оптического сигнала. На выходе фотодетектора формируется фототок, повторяющий огибающую детектированного оптического сигнала. Далее фототок регистрируется осциллографом (Осц), который синхронизируется от сигналов генератора импульсов NRZ, RZ.

Теоретическое обоснование имитационной модели

Модулирующий сигнал представляет собой последовательность гауссовских импульсов, которые можно описать следующим образом [2, 3]:

$$s(l, t) = \sqrt{P_1} \cdot \exp\left[\frac{-(t-l \cdot T_{\text{такт}})^2}{2 \cdot T_0^2}\right], \quad (1)$$

где, P_1 – уровень пиковой мощности оптического импульса в l -м тактовом интервале модулирующей последовательности; T_0 – половина длительности гауссовского импульса на уровне 0.6 от максимального значения напряженности оптического поля; $T_{\text{такт}}$ – длительность тактового интервала модулирующей последовательности. Длительность тактового интервала определяется на уровне половины от пиковой мощности гауссовского импульса. Сигнал на выходе оптического модулятора в n -м канале передачи имеет вид:

$$S_n(t) = \sum_{l=1}^L s(l, t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t), \quad (2)$$

где, f_n – частота несущей для n -го канала передачи, где $n = 1, 2, \dots, N$; L – длина битовой последовательности сигнала. Выполнены симуляции при различных значениях длины битовой последовательности. В процессе симуляций выяснено, что глаз-диаграммы детектированных сигналов не имеют различий при $L \geq 3$. Для дальнейшего упрощения расчетов было принято $L = 3$. Так же, следует отметить, что в данной работе уровни пиковой мощности оптического импульса во всех вводимых каналах передачи имеют одинаковые величины. Модулированные каналные сигналы мультиплексируются и вводятся в оптоволокно. В процессе распространения по оптоволокну фазы спектральных каналных сигналов изменяются. На выходе оптоволокну сигнал в n -м канале передачи имеет следующий вид [2, 3]:

$$S_n^*(t) = \sum_{l=1}^L s(l, t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t + \varphi_{NL_n}(t)), \quad (3)$$

где φ_{NL_n} – нелинейный сдвиг фазы, состоящий из двух слагаемых: первое слагаемое характеризует смещение фазы из-за явления ФСМ, а второе слагаемое – смещение фазы из-за явления ФКМ. Нелинейный сдвиг фазы сигнала в n -м канале передачи [2, 3, 7]:

$$\varphi_{NL_n}(t) = \gamma \cdot L_{\text{эф}} \cdot \left[|S_n(t)|^2 + 2 \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ n \neq m}}^N |S_m(t)|^2 \right], \quad (4)$$

где $L_{\text{эф}} = (1 - \exp(-\delta L)) / \delta$ – эффективная протяженность оптоволокну; γ – нелинейный коэффициент оптоволокну (для SSMF волокна $\gamma = 1.2$ Вт/км); δ – коэффициент затухания оптоволокну.

В приемной части ВОСП-WDM сигнал с выхода оптоволокну поступает в направленный ответвитель, в котором оптическое поле мультиплексированного сигнала суммируется с полем сигнала гетеродина. Оптическое поле на выходе направленного ответвителя фотодетектируется. Результатом фотодетектирования является фототок на выходе фотодиода [9]:

$$I_{\text{фн}}(t) = 2 \cdot \left(\sum_{l=1}^L s(l, t) \right) \cdot \sqrt{P_0} \times \cos[2 \cdot \pi \cdot (f_n - f_0) \cdot t + (\varphi_0 - \varphi_{NL_n})] \quad (5)$$

где P_0 – пиковая мощность оптического излучения гетеродина; f_0 – частота оптического излучения гетеродина; φ_0 – фаза оптического излучения гетеродина. В данной работе предполагается, что частота излучения гетеродина и частота излучения детектируемого канала совпадают. Так же, предполагается, что фаза оптического излучения гетеродина равна нулю.

Формула (5) позволяет рассчитать фототоки, соответствующие разным спектральным каналным сигналам и в дальнейшем, получить глаз-диаграммы импульсных последовательностей во временной области. На рисунке 2 показан пример глаз-диаграммы. Искажения сигнальных импульсов в глаз-диаграмме из-за ФСМ и ФКМ обусловлены преобразованием фазовых искажений в амплитудные при фотодетектировании.

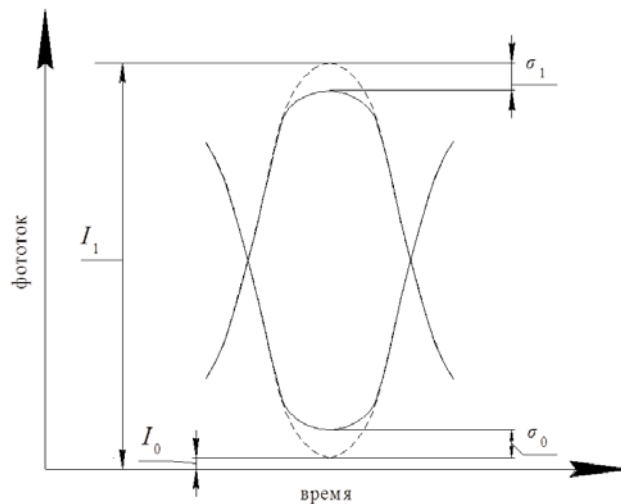


Рис. 2. Графическое определение параметров Q-фактора детектированного сигнала

С помощью полученных глаз-диаграмм детектированных сигналов, выполняется оценка величины Q-фактора [2, 3, 7]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (6)$$

где I_1 и σ_1 – уровни тока сигнала и шума из-за явления ФСМ и ФКМ при передаче логической «1», соответственно; I_0 и σ_0 – уровни тока сигнала и шума из-за межсимвольной интерференции при передаче логического «0», соответственно (см. рис. 2).

На основе вычисленных величин Q -фактора выполнен расчет значений вероятности появления ошибки (BER – bit error rate) [2, 3]:

$$BER(Q) = -\frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (9)$$

где erfc – дополнительная функция ошибок.

Результаты моделирования

В данной работе, результатом моделирования являются глаз-диаграммы детектированных оптических сигналов с искаженными амплитудами импульсных сигналов, обусловленными явлениями ФСМ и ФКМ. На основе полученных глаз-диаграмм рассчитывается значение Q -фактора детектированного сигнала.

Глаз-диаграммы детектированных сигналов, фазы которых изменились под воздействием явлений ФСМ и ФКМ при различных уровнях суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне представлены на рис. 3.

Глаз-диаграммы были получены при следующих параметрах системы передачи: синхронный режим передачи; протяженность оптоволокна – 100 км; число вводимых каналов передачи – 128; скорость передачи данных – 40 Гб/с; тип кодовых импульсов – NRZ; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт. Штриховой линией обозначена огибающая детектированного сигнала, который является эталонным (неискаженным) при заданных параметрах системы передачи, а непрерывной линией обозначена огибающая детектированного сигнала, фаза которого была искажена воздействием явлений ФСМ и ФКМ.

Из рисунка 3 следует, что, при фиксированном количестве каналов передачи, увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне приводит к сильным искажениям глаз-диаграммы детектированного сигнала. Из уравнения (4) можно сделать вывод, что составляющие нелинейной фазы, характеризующие явления ФСМ и ФКМ, напрямую зависят от мощности оптического сигнала, передаваемого в канале [2, 3, 7].

Увеличение уровня суммарной мощности при фиксированном количестве каналов передачи приводит к увеличению уровня мощности сигналов в каждом спектральном канале, в результате чего возрастает влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу сигналов. Рост уровня суммарного излучения также приводит к увеличению уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией.

Используя указанные выше параметры системы передачи, было получено множество глаз-диаграмм детектированных сигналов для асинхронного режима передачи. Множество глаз-диаграмм, представленных на рис. 4, было получено наложением глаз-диаграмм 100 итераций имитационной модели.

Из рисунка 4 можно увидеть, что применение асинхронного режима передачи позволяет снизить искажения фазы детектированного сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ. Это можно объяснить тем, что при использовании синхронного режима линии задержки вся суммарная мощность оптического излучения сконцентрирована в тактовых интервалах, что приводит к резкому увеличению нелинейных явлений и, как следствие, усилению воздействия явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов.

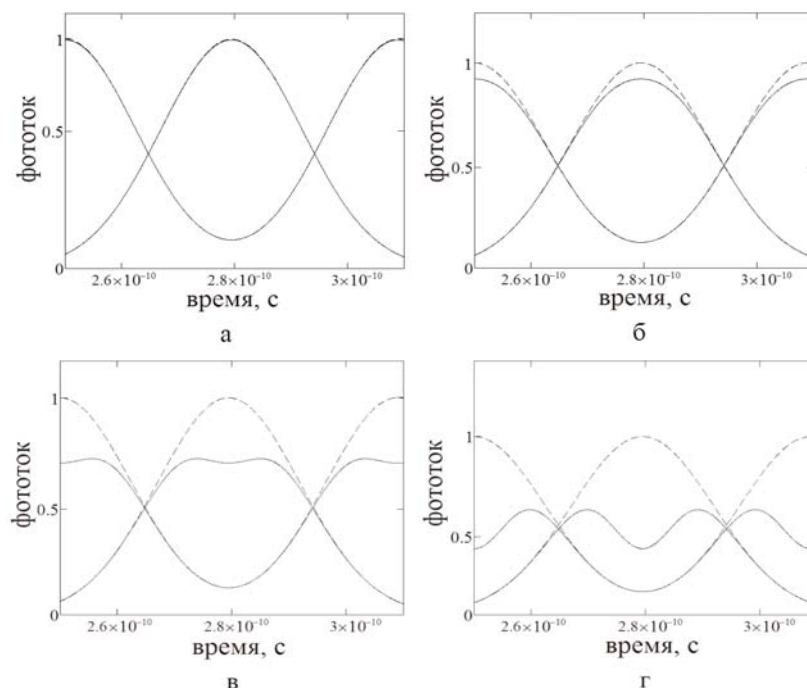


Рис. 3. Глаз-диаграмма и искажение детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода NRZ при синхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

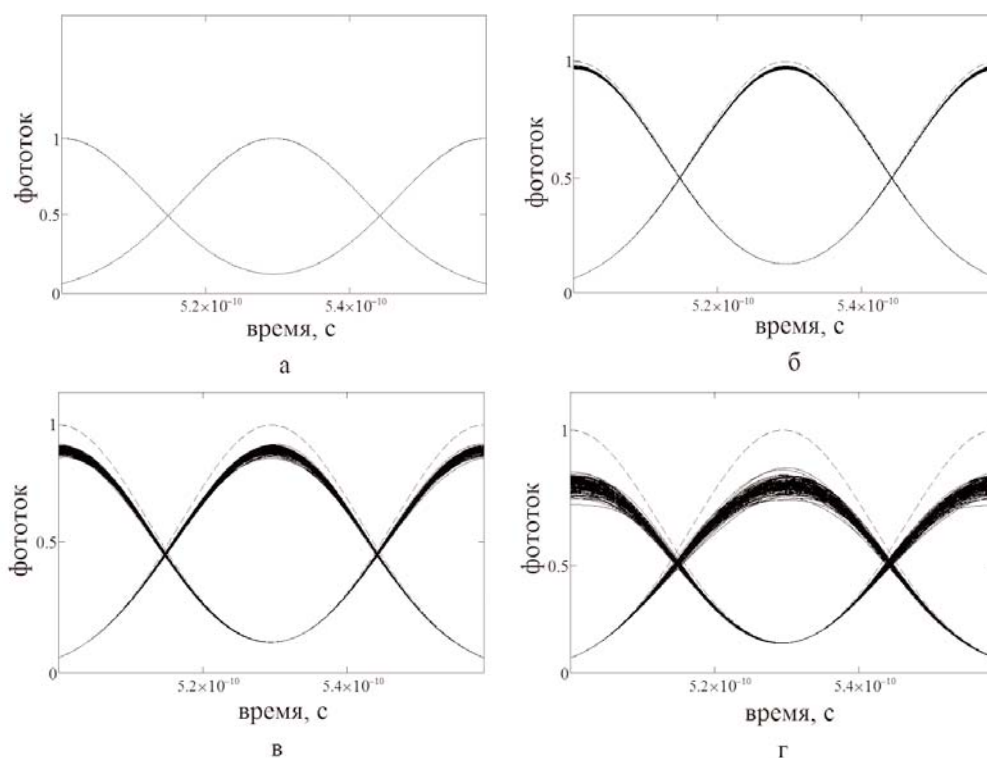


Рис. 4. Глаз-диаграмма и искажение детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода NRZ при асинхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

Асинхронный режим передачи позволяет перераспределить эффективную мощность излучения в пределах диапазона интервалов линии задержки. В результате, происходит снижение влияния явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов. С повышением уровня суммарной мощности раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала приобретает больший разброс. Увеличение разброса можно объяснить тем, что каждая новая итерация симуляции приводит к перераспределению интервалов, генерируемых линией задержки. Так как с увеличением уровня суммарного излучения происходит увеличение мощности излучения в каждом канале, и эффективная мощность излучения в пределах диапазона интервалов линии задержки распределяется менее равномерно.

Учитывая формулу (4), можно предположить, что неравномерность распределения уровня эффективной мощности в тактовых интервалах передаваемого сигнала может привести к скачкам искажения фазы из-за явлений ФСМ и ФКМ в детектируемом сигнале. Разброс возможных величин раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала имеет свои пределы сверху и снизу. Верхний предел величины раскрытия глаз-диаграммы ограничен ситуацией, когда полностью отсутствует влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу детектированного сигнала и соответствует максимальному раскрытию глаз-диаграммы при детектировании эталонных сигналов при заданных параметрах системы. Нижний предел ограничен ситуацией, когда влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазу детектированного сигнала имело максимально возможное значение, что соответствует минимальному раскрытию глаз-диаграммы детектированного сигнала при синхронной передаче.

В данной работе исследовалось влияние явлений ФСМ и ФКМ на огибающую детектированного сигнала в зависимости от типа линейного кода и при различных параметрах системы передачи, а также помехоустойчивость сигнала при двух типах линейного кода: NRZ и RZ. Исследования проводились при следующих параметрах системы передачи: протяженность оптоволокна – 100 км; число вводимых каналов передачи – 128; скорость передачи информации – 40 Гб/с; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт.

На рисунке 5 представлены глаз-диаграммы детектированных сигналов, фазы которых изменились под воздействием явлений ФСМ и ФКМ при разных уровнях суммарной мощности оптического излучения в оптоволокне. Детектированные сигналы имеют формат линейного кода RZ. Моделирование осуществлялось в синхронном режиме передачи.

Сравнивая рис. 3 и рис. 5, можно сделать вывод, что переход от вида линейного кода NRZ к RZ позволяет увеличить помехоустойчивость детектированного сигнала. Увеличение помехоустойчивости объясняется снижением уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией. Снижение уровня шумов межсимвольной интерференции можно объяснить тем, что в случае применения кода NRZ передаваемый импульс занимает весь тактовый интервал, а в случае применения кода RZ передаваемый импульс занимает половину тактового интервала. В результате, переход от кода NRZ к коду RZ способствует разнесению импульсов в каналах передачи на больший временной интервал. Переход от кода NRZ к коду RZ не сопровождается изменением формы огибающей детектированного сигнала.

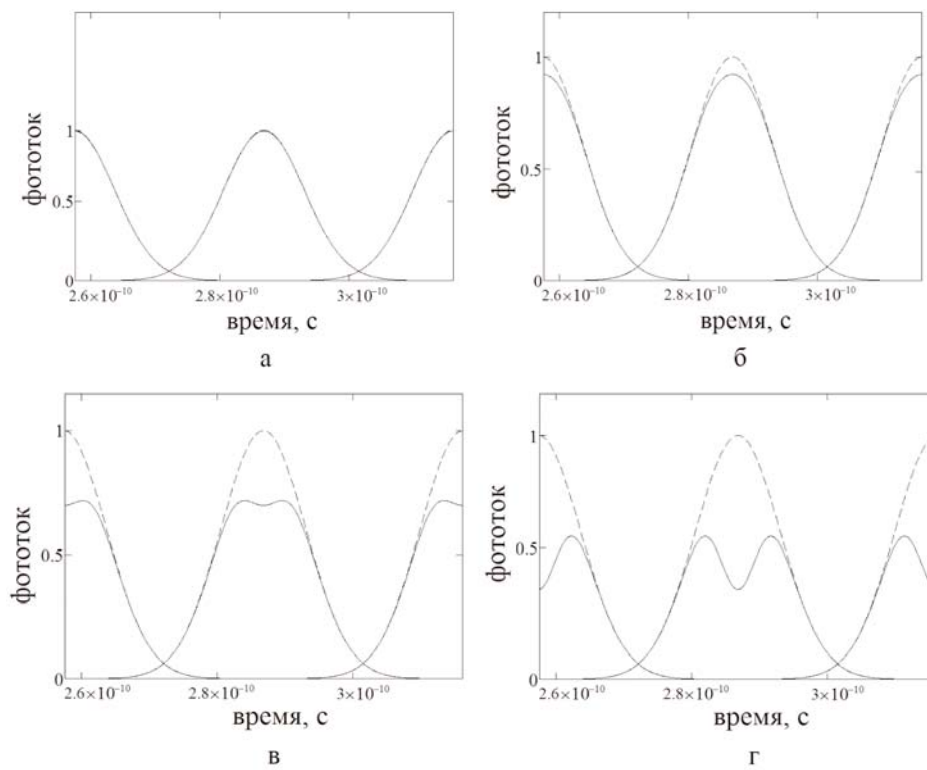


Рис. 5. Глаз-диаграмма и искажение формы детектируемого оптического сигнала в формате линейного кода RZ при синхронной передаче в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

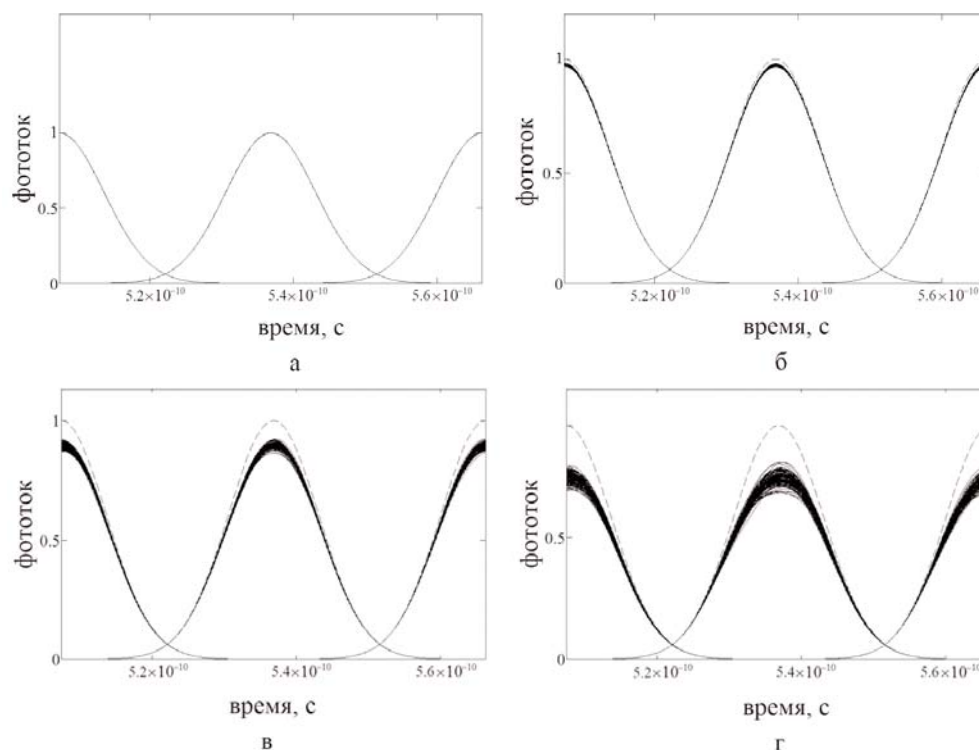


Рис. 6. Глаз-диаграмма и искажение формы детектируемого оптического сигнала с форматом линейного кода RZ, при асинхронной передаче, в зависимости от суммарной мощности излучения, вводимого в оптоволокно: а) 2 мВт; б) 10 мВт; в) 20 мВт; г) 30 мВт

Получено множество глаз-диаграмм детектированного сигнала в формате линейного кода RZ при асинхронной передаче. Моделирование выполнялось при следующих параметрах системы передачи: протяженность оптоволокну – 100 км; число вводимых каналов передачи изменяется от 16 до 128; скорость передачи информации – 40 Гб/с; тип линейного кода – RZ; величина суммарной мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно, изменяется от 2 до 30 мВт. Множество глаз-диаграмм детектированного сигнала в формате RZ при асинхронной передаче представлено на рис. 6.

Из рисунка 6 видно, применение RZ линейного кода позволяет существенно снизить уровень шумов от межсимвольной интерференции, а передача в асинхронном режиме позволяет значительно снизить влияние явлений ФСМ и ФКМ на фазы передаваемых сигналов. В результате, достигается наилучшая помехозащищенность передаваемого сигнала при высоком уровне суммарного оптического излучения в оптоволокну.

Используя совокупность глаз-диаграмм, полученных при различных параметрах системы передачи, рассчитан Q -фактор детектированного сигнала. Результаты расчетов представлены на рис. 7 в виде кривых, отражающих зависимость величины Q -фактора от уровня суммарной мощности оптического излучения в оптоволокну; непрерывные кривые показывают результаты, полученные при синхронной передаче, а результаты, полученные при асинхронной передаче показаны заштрихованной областью. Горизонтальные линии обозначают различные пороговые величины Q -фактора, обеспечивающие передачу сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} . Горизонтальная непрерывная утолщенная линия обозначает порог по величине Q -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} без применения методов корректирующего кодирования FEC (forward error correction); горизонтальная непрерывная тонкая линия обозначает порог по величине Q -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} при использовании технологии FEC-1; горизонтальная пунктирная утолщенная линия обозначает порог по величине Q -фактора, обеспечивающей передачу сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} при использовании технологии FEC-2 [10]. Области, заштрихованные пунктирными линиями, обозначают диапазоны значений Q -фактора, допустимые при использовании соответствующих технологий FEC.

Из рисунка 7 видно, что увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокну оказывает существенное влияние на помехоустойчивость сигнала. Проведенные измерения показали, что при увеличении уровня суммарной мощности с 2 мВт до 30 мВт происходит уменьшение величины Q -фактора в 8 раз при использовании кода NRZ, и в 9 раз при использовании кода RZ.

Так же из рис. 7 следует, что переход от линейного кода NRZ к линейному коду RZ сопровождается увеличением Q -фактора в среднем в 1,7 раза. В данном случае, усреднение используется по причине того, что с увеличением уровня суммарной мощности оптического излучения происходит уменьшение выигрыша в величине Q -фактора при переходе от кода NRZ к коду RZ. Снижение выигрыша по величине Q -фактора связано с увеличением разброса раскрытия глаз-диаграммы детектированного сигнала, из-за описанного

выше увеличения неравномерности распределения эффективной мощности в тактовых интервалах передаваемого сигнала с ростом уровня суммарной мощности излучения в оптоволокну.

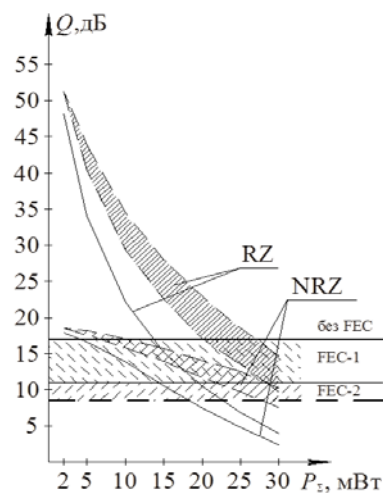


Рис. 7. Зависимость изменения величины Q -фактора от уровня суммарной мощности оптического излучения при различных типах кодовых импульсов при синхронной передаче (непрерывные линии) и асинхронной передаче (заштрихованные области)

Отметим, что из рис. 7 так же следует, что передача сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} без использования FEC возможна в случае, если уровень суммарной мощности излучения в оптоволокну при синхронной передаче не превышает 5 мВт для кода NRZ и 15 мВт для кода RZ. Это согласуется с результатами, полученными в [7], где было показано, что при уровне суммарной мощности в оптоволокну большем, чем 12 дБм (15 мВт), передача QPSK-сигналов с вероятностью 10^{-12} становится невозможной без применения методов коррекции ошибок.

Применение асинхронной передачи позволяет повысить помехоустойчивость сигнала, в результате чего ограничение по уровню суммарной мощности при передаче без методов коррекции ошибок ослабевает: передача возможна если уровень суммарной мощности не превышает 10 мВт для кода NRZ и не превышает 27 мВт для кода RZ. При соблюдении указанных пределов обеспечивается передача сигнала с вероятностью ошибки 10^{-12} с величиной Q -фактора в 17 дБм.

Применение технологии FEC-1 позволяет снизить требования по величине Q -фактора до 11 дБм при соблюдении вероятности ошибки 10^{-12} , что позволяет снизить ограничение по уровню суммарной мощности при асинхронной передаче до 15 мВт для кода NRZ и до 20 мВт для кода RZ. При асинхронной передаче ограничения по уровню суммарной мощности снижаются до 30 мВт для кода NRZ и более чем до 30 мВт для кода RZ.

Применение технологии FEC второго поколения (FEC-2) позволяет еще снизить требования по величине Q -фактора до 8,5 дБм при соблюдении вероятности ошибки 10^{-12} . Это позволяет снизить ограничение по уровню суммарной мощности при асинхронной передаче до 18 мВт для кода NRZ и до 24 мВт для кода RZ. При асинхронной передаче ограничения по уровню суммарной мощности более чем до 30 мВт и для кода NRZ и для кода RZ.

Заключение

Реализовано компьютерное моделирование искажения сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ в многоканальной ВОСП-DWDM с гомодинным приемом. В качестве критерия оценки воздействия явлений ФСМ и ФКМ на детектированный сигнал использовался Q -фактор. Исходя из результатов, полученных в процессе компьютерного моделирования, можно сделать следующие выводы:

1) Увеличение уровня суммарной мощности излучения в оптоволокне приводит к существенному снижению помехоустойчивости детектированного сигнала из-за явлений ФСМ и ФКМ. Увеличение уровня суммарной мощности излучения от 2 мВт до 30 мВт привело к снижению величины Q -фактора в 8 раз при использовании кода NRZ, и в 9 раз при использовании кода RZ.

2) Асинхронный режим передачи импульсных последовательностей в спектральных каналах позволяет повысить Q -фактор 1.7 раз за счет более равномерного распределения эффективной мощности в тактовых интервалах детектированного сигнала.

3) Применение различных типов линейных кодов оказывает влияние на Q -фактор. В данной работе, переход от линейного кода NRZ к линейному коду RZ позволил увеличить Q -фактор в 1.9 раз, что обусловлено снижением уровня шумов, вызванных межсимвольной интерференцией.

Следует отметить, что результаты, полученные в рамках данной работы, показывают вклад в искажение импульсных сигналов только явлений ФСМ и ФКМ и не учитывают влияние других линейных и нелинейных явлений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании волоконно-оптических систем передачи со спектральным уплотнением с целью оценки ожидаемого вклада явлений ФСМ и ФКМ в снижение помехоустойчивости передаваемых сигналов.

Литература

1. ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-1!!PDF-E&type=items (дата обращения 23.11.2019).
2. Agrawal G. P. Lightwave Technology: Telecommunication Systems / Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2005. 461 p.
3. Shneider T. Nonlinear Optic in Telecommunications / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 415 p.
4. Ivaniga T., Ivaniga P. Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System // International Journal of Optics. Vol. 2019. № 3 (June 2019), pp. 1-8.
5. Ivaniga T., Turan J., Ovsenik L. Verification of the SPM Impact in DWDM System Using AWG Multiplexer // Acta Electrotechnica et Informatica. Vol. 17. № 1 (2017), pp. 17-22.
6. Сычук А.Н., Варданян В.А. Моделирование процесса уширения спектра сигналов из-за явлений фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне в многоканальной волоконно-оптической системе передачи // Материалы Российской научно-технической конференции "Современные проблемы телекоммуникаций". Новосибирск: СибГУТИ. 2018. С. 162-168.
7. Варданян В. А. Влияние фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 4. С. 395-400.
8. Рекомендация МСЭ-Т G.652(11/2016) Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
9. Шереметьев А. Г. Когерентная волоконно-оптическая связь. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
10. ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016). https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-1!!PDF-E&type=items (дата обращения 23.11.2019).

PULSED SIGNALS DISTORTIONS IN MULTICHANNEL COHERENT DETECTION TRANSMISSION SYSTEMS CAUSED BY SELF-PHASE MODULATION AND CROSS-PHASE MODULATION IN OPTICAL FIBER

Anatoly N. Sychuk, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia, tolya030394@mail.ru

Vardges A. Vardanyan, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia, vardgesvardanyan@mail.ru

Abstract

The self-phase modulation (SPM) and the cross-phase modulation (XPM) effects influence, depending on transmitting system parameters and affecting noise immunity of pulsed signals to be transmitted of the multichannel wavelength division multiplexing transmitting system is investigated. The investigation is carried out under the conditions of transmitting system parameters variation: the total optical power level in optical fiber and the linear code type. At the receiver after the coherent photodetection of pulsed signals the eye diagrams obtained are analyzed. The estimate criterion of the SPM and XPM effects influence affecting noise immunity of pulsed signals is Q-factor to be calculated by graphic method with an eye diagram. The simulation model of the multichannel wavelength division multiplexing transmitting system is implemented in the environment MathCAD modeling. The SPM and XPM effects influence is simulated as the pulsed signal phase distortions in the signal propagation process through standard single mode optical fiber. With coherent photodetecting the pulsed signal phase distortions are transformed to the pulsed signal amplitude distortions. In the paper deals with the SPM and XPM effects influence affecting noise immunity of pulsed signals is dependent on transmitting system parameters. The simulations shown, the signal quality index is decreased while increasing the total optical signal power level. When the total optical signal power level is increasing from 2 mW to 30 mW, for 128-channel transmitting system 40 Gbps the signal Q-factor is reduced by 8 times for NRZ-code and it is reduced by 9 times for RZ-code, correspondingly. In addition, the simulations showed that transition from NRZ-code to RZ-code allows one to increase value of Q-factor by average 1.7 times. The obtained results can be used to estimate one the potential penalty on signal noise immunity due to the SPM and XPM effects influence in the designed multichannel wavelength division multiplexing transmitting system.

Keywords: nonlinear effects, self-phase modulation, cross-phase modulation, wavelength division multiplexing, coherent detection, signal noise immunity.

References

1. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2012), ITU-T Recommendation G.694.1 (02/2012): spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, ITU, Geneva, Switzerland, available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-1!!PDF-E&type=items, (Accessed 23.11.2019).
2. Agrawal G.P (2005). *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. Wiley-Interscience, Hoboken, USA.
3. Shneider, T. (2004). *Nonlinear Optic in Telecommunications*. Heidelberg: Springer-Verlag, Berlin, Germany.
4. Ivaniga, T. and Ivaniga, P. (2019). Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System. *International Journal of Optics*, vol. 2019, no. 3, pp. 1-8.
5. Ivaniga T., Turan J. and Ovsenik L. (2017). Verification of the SPM Impact in DWDM System Using AWG Multiplexer. *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 1, pp. 17-22.
6. Sychuk A.N. and Vardanyan V.A. (2018). Computer simulation of spectral broadening process due to self-phase modulation and cross-phase modulation in multichannel fiber-optic transmission system", *Materialy Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii "Sovremennye problemy telekommunikacij [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference], Sovremennye problemy telekommunikacij [Modern Telecommunication Problems]*, Novosibirsk, Russia, 26-27 April 2018, pp. 162-168.
7. Vardanyan V.A. (2018). Effect of Self-Phase Modulation and Cross-Phase Modulation on OFDM Signals in Fiber-Optic Access Networks. *Quantum Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 395-400.
8. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2016), Rekomendatsiya MSE-T G.652(11/2016): kharakteristiki odnomodovogo opticheskogo volokna i kabelya [ITU-T Recommendation G.652 (11/2016): characteristics of a single-mode optical fibre and cable], ITU, Geneva, Switzerland.
9. Sheremet'yev, A. G. (1991). *Kogerentnaya volokonno-opticheskaya svyaz'* [Coherent fiber optic communication]. Radio and communication, Moscow, Russia.
10. International Telecommunication Union, Telecommunication sector (2016), ITU-T Recommendation Series G, Supplement 39 (02/2016), ITU, Geneva, Switzerland, available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup39-201602-1!!PDF-E&type=items, (Accessed 23.11.2019).

Information about authors:

Anatoly N. Sychuk, postgraduate, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia

Vardges A. Vardanyan, Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Multichannel Electrical Communication and Optical Systems, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences" (SibSUTIS), Novosibirsk, Russia

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПАРАЛЛЕЛИЗМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ

Коршунов Владимир Николаевич,
Московский технический университет связи и
информатики, г. Москва, Россия, mes@mtuci.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-13-17

Овчинникова Ирина Александровна,
Всероссийский научно-исследовательский институт
кабельной промышленности, г. Москва, Россия,
irovchinnikova@gmail.com

Шишова Надежда Альвиновна,
Московский технический университет связи и
информатики, г. Москва, Россия, n.a.shishova@mtuci.ru

Ключевые слова: параллелизм передачи информации,
множитель параллелизма, пространственное
мультиплексирование, спектральная эффективность,
скорость передачи данных.

Вводится и применяется параметр – множитель параллелизма P , даются выражения для расчета спектральной эффективности и скорости передачи данных, приводятся примеры реализации пространственного параллелизма. Параллелизм передачи информации в оптических волокнах осуществляется посредством применения поляризационного, спектрального, модового, сердцевинного мультиплексирования с коэффициентами мультиплексирования – множителями параллелизма P_i . Множитель пространственного параллелизма $P_{пр}$ соответствует количеству пространственных каналов, создаваемых методами и средствами модового и сердцевинного мультиплексирования. Элементарные, комплексные и интегральный множители параллелизма позволяют оценить пропускную способность оптического волокна, в том числе в программно-конфигурируемых оптических сетях с выбором маршрута, формата модуляции, ширины спектра, задействуемых волоконных сердцевин. Множитель пространственного параллелизма в оптическом волокне в составе оптического кабеля как части волоконно-оптической системы передачи используется для расчета значимый компонент спектральной эффективности и агрегированной скорости передачи данных. Компоненты спектральной эффективности образуются сопоставлением результата и ресурса операции формирования пропускной способности оптического волокна. Даются выражения для расчета спектральной эффективности и для определения скорости передачи в условиях реализации пространственного параллелизма распространения оптических сигналов. Приводятся примеры применения пространственного параллелизма, в т.ч. для трехмодовой схемы с односердцевинным оптическим волокном ($P_{пр} = 3$), имеющим стандартный диаметр оптической оболочки 125 мкм, спектрально уплотненным в оптическом диапазоне C+L, скорость 160...180 Тбит/с и для 6-модовой 19-сердцевинной схемы ($P_{пр} = 114$) с волокном, имеющим диаметр оптической оболочки 318 мкм, спектрально уплотненным в диапазоне C, скорость 2,05 Пбит/с. При 30 спектральных каналах, в трехмодовом семисердцевинном волокне ($P_{пр} = 21$) при канальной скорости 400 Тбит/с скорость передачи данных составляет 250 Тбит/с.

Информация об авторах:

Коршунов Владимир Николаевич, Московский технический университет связи и информатики, профессор кафедры Многоканальных телекоммуникационных систем, д.т.н., Москва, Россия

Овчинникова Ирина Александровна, Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности, директор научного направления – зав. отделением Кабелей и проводов для телекоммуникаций и информатизации, Москва, Россия

Шишова Надежда Альвиновна, Московский технический университет связи и информатики, зав. кафедрой "Многоканальные телекоммуникационные системы", к.т.н., доцент, Москва, Россия

Для цитирования:

Коршунов В.Н., Овчинникова И.А., Шишова Н.А. Пространственный параллелизм высокоскоростной передачи информации по оптическим волокнам // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 13-17.

For citation:

Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shishova N.A. (2020) Spatial parallelism of high-speed transmission of information over optical fibres. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 13-17. (in Russian)

Введение

Оптическое волокно (ОВ) в составе оптического кабеля как части волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) является средой распространения сигналов в современных и перспективных проводных инфокоммуникационных сетях. Нарастающими темпами увеличивается мощность инфокоммуникационного транспорта. На 30...60 % (по регионам) растет мировой трафик. Прогнозируется [1] к 2037 году достижение пропускной способности ВОСП со спектральным разделением (ВОСП-СР) 32...400 Тбит/с, при использовании пространственного мультиплексирования – 5...100 Пбит/с. Можно видеть, что параллельная передача сигналов в физическом пространстве позволит радикально повысить скорость передачи, предположительно в 150...250 раз.

Параллельная передача сигналов и, в особенности, пространственный параллелизм создают основу достижения высоких скоростей на оптических инфокоммуникационных сетях, в том числе в Единой сеги электросвязи Российской Федерации. Единая сеть электросвязи РФ образует технологический фундамент цифровой экономики в соответствии с Федеральным проектом «Информационная инфраструктура» национальной программы «Цифровая экономика» [2, 3]. Согласно программе и проекту, в частности, для подключения всех госучреждений к интернету к концу 2024 г. будет проложено на инфокоммуникационных линиях 410 тыс. км оптического кабеля. Следует отметить, что в России растет производство оптических кабелей: так, объем их производства в 2018 году сравнительно с 2017 годом составил 122% по физическим длинам и 120% по волокну [4].

Перманентный количественный рост объемов применения оптических кабелей и систем передачи наряду с повышением скорости передачи оптических сигналов требует адекватного сопровождения – повышения эффективности методов и средств передачи, что обосновывает актуальность исследования совершенствования процесса транспортирования информации, в том числе, в условиях реализации комплекса параллельных путей передачи сигналов посредством пространственного мультиплексирования. Данной тематике посвящена настоящая работа. Здесь вводится параметр – множитель параллелизма, с применением этого параметра определяется спектральная эффективность и скорость передачи информации по оптическим волокнам.

Множитель параллелизма

Параллелизм передачи информации в ОВ реализуется посредством применения поляризационного, спектрального, модового, сердцевинного мультиплексирования с коэффициентами мультиплексирования K_i . Эти коэффициенты [5]:

- $K_1 = p$, число поляризаций;
- $K_2 = m$, количество спектральных каналов ВОСП-СР;
- $K_3 = \mu$, число передаваемых пространственных мод;
- $K_4 = \psi$, число сердцевины в ОВ.

При битовой скорости в спектральном канале до поляризационного мультиплексирования $V_{вх}$ имеем в общем случае результирующую скорость в волокне

$$V_{ОВ} = V_{вх} \cdot \prod_{i=1}^4 K_i \quad | \quad K_i = p, m, \mu, \psi. \quad (1)$$

Введем понятие множитель параллелизма – кратность увеличения битовой скорости благодаря использованию па-

раллельных путей передачи информации и предложим для применения соответствующий параметр P , представляющий собой произведение коэффициентов K_i задействованных видов мультиплексирования:

$$P = \prod_{i=1}^q K_i \quad | \quad q \leq q_{\max} = 4. \quad (2)$$

На рисунке 1 представлена концептуальная схема операции создания параллелизма передачи информации по ОВ. Показан общий случай применения четырех видов параллелизма: поляризационного, спектрального, модового и сердцевинного. На входе схемы – сигнал спектрального канала ВОСП-СР до поляризационного мультиплексирования с битовой скоростью $V_{вх}$. В типовых случаях этот сигнал построен в форматах квадратурной амплитудной модуляции QPSK (QAM4), QAM16, QAM64 и т.п. После первой ступени мультиплексирования имеем обычные для высокоскоростных ВОСП форматы модуляции с двумя поляризациями: DP-QPSK, DP-QAM16, DP-QAM64 и т.д. Здесь $P = p = 2$, и скорость в спектральном канале ВОСП-СР $V_k = 2V_{вх}$. При спектральном уплотнении волокна (WDM) $P = p \cdot m$ и $V_{ВОСП-СР} = p \cdot m \cdot V_{вх}$.

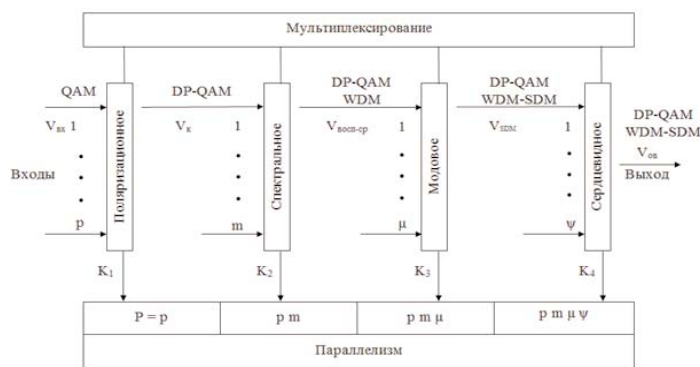


Рис. 1. Схема создания параллелизма передачи информации по ОВ

Последующие шаги мультиплексирования создают пространственный параллелизм передачи информации в оптическом волокне за счет применения пространственного мультиплексирования (SDM, space division multiplexing): модового и сердцевинного [6]. Множители пространственного параллелизма – модовый, сердцевинный и комплексный:

$$P_m = \mu; \quad P_c = \psi; \quad P_{пр} = P_m \cdot P_c = \mu \cdot \psi = M, \quad (3)$$

где M - количество пространственных каналов.

Интегральный множитель параллелизма

$$P_{инт} = p \cdot m \cdot \mu \cdot \psi. \quad (4)$$

Заметим, что выше использованы фиксированные значения параметров оптической системы. Приведенные величины множителей параллелизма (2)-(4) можно рассматривать как максимальные показатели, характеризующие максимальную скорость передачи информации – пропускную способность оптического волокна. В перспективных программно-конфигурируемых (гибких) сетях в текущие моменты времени выбираются маршрут, формат модуляции, ширина

спектра и используемые сердцевинны волокна (RMSCA, routing, modulation format, spectrum and core allocation) [7, 8], и действующие величины $P(i)$ будут находиться в пределах значений, определенных по (2)-(4).

Рассмотрим примеры реализации пространственного параллелизма.

1. Модовый параллелизм [9]. В эксперименте передавались три пространственные моды маломодового ОВ: LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , множитель пространственного параллелизма $P_m = 3$. В диапазоне $C + L$ 1528...1610 нм были переданы сигналы 348 спектральных каналов с символьной скоростью 24,5 ГБод (канальные интервалы 25 ГГц) в формате модуляции DP-16QAM по петле из составного тракта маломодовых ОВ длиной 55 км на расстояние 1045 км. Приемник имел компенсатор ММО с 751 звеньями. Для различной кодовой избыточности агрегированная скорость передачи данных составила 160...180Тбит/с. Отмечено, что эксперимент показал возможность реализации модового параллелизма на линиях средней длины со стандартной величиной внешнего диаметра стекловолокна 125 мкм.

2. Комплексный пространственный параллелизм [10]. ОВ диаметром 318 мкм по оптической оболочке имело длину 9,8 км и содержало 19 градиентных маломодовых сердцевин диаметром 17 мкм с шагом размещения 62 мкм в гексагональном расположении сердцевин: в центре волокна, в среднем контуре и во внешнем контуре. Использовались пространственные моды LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{02} . Множитель пространственного параллелизма $P_{пр} = 6 \cdot 19 = 114$. Оптические сигналы передавались по 360 спектральным каналам с шагом частотной сетки 12,5 ГГц в диапазоне C 191...196 ТГц в формате модуляции DP-QPSK. В режиме «супер-Найквист» символьная скорость составляла 15 ГБод, предполагалась величина избыточности 20%. Общая скорость передачи данных равнялась 2,05 Пбит/с, агрегированная спектральная эффективность для ОВ в целом достигла 450 бит/с/Гц. Эксперимент был проведен с целью получения рекордной скорости передачи данных по волокну с комплексным модовым и сердцевинным параллелизмом.

Спектральная эффективность

Спектральная эффективность передачи информации по оптическому волокну имеет ряд модификаций [11,12]. Эти модификации строятся на основе общего подхода к определению эффективности W технической системы [13], оцениваемой посредством сопоставления величины достигаемого результата G выполняемой операции с количеством H затрачиваемого ресурса. Эффективность операции формирования свойств оптических систем, кабелей и волокон определяется соотношением

$$W = G / H. \quad (5)$$

В качестве свойств рассматриваем пропускную способность и агрегированную в результате осуществления пространственного параллелизма спектральную эффективность. Результат операции

$$G = \{G_i | i = \overline{1,2}, G_1 = R, G_2 = \gamma_{агр}\}, \quad (6)$$

где R и $\gamma_{агр}$ – соответственно скорость и агрегированная спектральная эффективность передачи информации.

В свою очередь, скорость передачи информации

$$R = \{R_i | i = \overline{1,2}, R_1 = V, R_2 = B\}, \quad (7)$$

где V и B – битовая и бодовая (символьная) скорости.

Ресурс выполнения операции

$$H = \{H_i | i = \overline{1,2}, H_1 = S, H_2 = A\} \quad (8)$$

Здесь S – спектральный ресурс,

$$S = \{S_i | i = \overline{1,2}, S_1 = F, S_2 = \Lambda\}, \quad (9)$$

F – ширина диапазона частот, предназначенного для передачи сигналов; Λ – ширина соответствующего диапазона длин волн. Пространственный ресурс характеризуется величиной площади поперечного сечения ОВ в границах оптической оболочки с диаметром $D_{об}$:

$$A = \pi D_{об}^2 / 4. \quad (10)$$

Таким образом, результат G и ресурс H комбинируются в пары (5) трех видов результата (6), (7) и трех видов ресурса (8) - (10) с образованием пяти модификаций эффективности.

$$W = \Gamma = \{\gamma_i | i = \overline{1,5}\} \quad (11)$$

Синтез модификаций спектральной эффективности иллюстрирует схема на рис. 2. На этой схеме представлены элементы множества Γ :

– собственно спектральная эффективность SE , в т.ч. в агрегированном виде $\gamma_{агр}$

$$\gamma_1 = \gamma = V / F; \quad (12)$$

– бодовая эффективность BE

$$\gamma_2 = \gamma_B = B / F; \quad (13)$$

– спектрально-волновая эффективность SWE , в т.ч. в агрегированном виде $\gamma_{агр}$

$$\gamma_3 = \gamma_\Lambda = V / \Lambda; \quad (14)$$

– бодово-волновая эффективность BWE

$$\gamma_4 = \gamma_{B\Lambda} = B / \Lambda; \quad (15)$$

– спектрально-пространственная эффективность SSE

$$\gamma_5 = \gamma_\zeta = \gamma_{агр} / A. \quad (16)$$

Пространственный параллелизм влияет на величины битовой скорости V и агрегированной спектральной эффективности $\gamma_{агр}$.

Собственно спектральная эффективность (12) представляет собой отношение канальной скорости V_k к ширине канального интервала $F_{ки}$:

$$\gamma = V_k / F_{ки}. \quad (17)$$

Агрегированная собственно спектральная эффективность увеличена множителем пространственного параллелизма:

$$\gamma_{\text{агр}} = \gamma \cdot P_{\text{пр}} \quad (18)$$

Аналогично выражаются спектрально-волновая эффективность и агрегированная спектрально-волновая эффективность:

$$\gamma_{\Lambda} = V_{\text{к}} / \Lambda_{\text{ки}} \quad (19)$$

$$\gamma_{\text{Лагр}} = \gamma_{\Lambda} \cdot P_{\text{пр}} \quad (20)$$

здесь $\Lambda_{\text{ки}}$ – волновой каналный интервал.

Из соотношений (12), (14), (16), (18), (20) можно видеть, что от реализации пространственного параллелизма зависят модификации эффективностей $\gamma_{\text{агр}}$, $\gamma_{\text{Лагр}}$, γ_{ζ} , соответствующие агрегированной битовой скорости передачи данных.

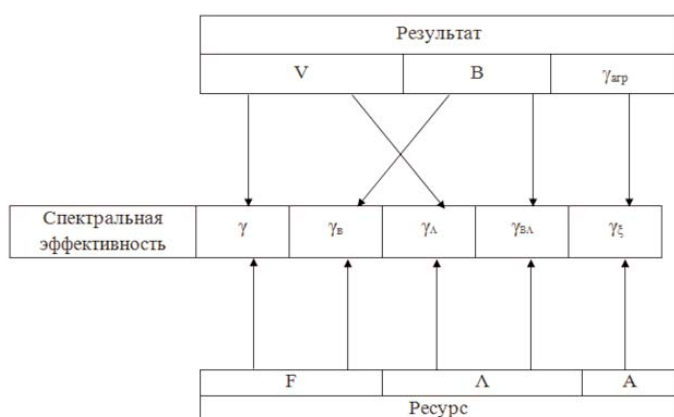


Рис. 2. Схема образования модификаций спектральной эффективности

Скорость передачи

Агрегированная скорость передачи данных по оптическому волокну

$$V_{\text{ОВ}} = \begin{cases} F_{\text{ки}} \cdot \gamma \cdot m \cdot \mu \cdot \psi, \\ \Lambda_{\text{ки}} \cdot \gamma_{\Lambda} \cdot m \cdot \mu \cdot \psi. \end{cases} \quad (21)$$

Обозначив

$$V_{\text{ВОСП-СР}} = F_{\text{ки}} \cdot \gamma \cdot m = \Lambda_{\text{ки}} \cdot \gamma_{\Lambda} \cdot m \quad (22)$$

и применив параметр – множитель пространственного параллелизма (3), получаем битовую агрегированную скорость в волокне

$$V_{\text{ОВ}} = V_{\text{ВОСП-СР}} \cdot P_{\text{пр}} \quad (23)$$

При известной канальной скорости имеем

$$V_{\text{ОВ}} = V_{\text{к}} \cdot m \cdot P_{\text{пр}} \quad (24)$$

Например, для значений $V_{\text{к}} = 400$ Гбит/с [14], $m = 30$, $\mu = 3$, $\psi = 7$, величина $V_{\text{ОВ}} = 250$ Тбит/с.

Заключение

Передача сигналов параллельными путями является ключевым фактором реализации высокой пропускной способности оптических линий на современных и перспективных инфокоммуникационных сетях. Радикальное повышение скорости передачи информации по оптическим волокнам обеспечивается методами и средствами пространственного параллелизма. Параметр множитель параллелизма позволяет осуществлять количественную оценку вклада пространственного мультиплексирования в формирование скорости в оптическом волокне в составе оптического кабеля как части системы передачи. Множитель параллелизма соответствует числу пространственных каналов в ОВ, создаваемых посредством модового и сердцевинного мультиплексирования. С помощью этого параметра могут быть рассчитаны величины модификаций спектральной эффективности и агрегированной скорости передачи данных по оптическим волокнам в условиях реализации комплексного, в т.ч. пространственного параллелизма.

Литература

1. Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years // Optics express, 2018, vol.26, no. 18. P.24190-24239.
2. Ефимушкин В.А., Козаченко Ю.М., Ледовских Т.В., Щербакова Е.Н. Будущий облик Единой сети электросвязи Российской Федерации // Электросвязь. 2018. № 10, С.18-27.
3. Парфенов Б.А. Как внедряем цифру // Вестник связи. 2019. № 9. С. 29-35.
4. Пешиков И.Б. Кабельная промышленность в условиях становления национальной цифровой экономики // Кабели и провода. 2019. № 2. С.20-24.
5. Кориунов В.Н., Шаврин С.С., Шишова Н.А. Скорость ВОСП при комплексном мультиплексировании // Вестник связи. 2017. № 10. С. 22-24.
6. Кориунов В.Н., Овчинникова И.А. Применение пространственного мультиплексирования при передаче информации по оптическим кабелям // Кабели и провода. 2018. № 1. С. 12-18.
7. Abedifar V., Eshghi M. Routing, modulation format, spectrum and core allocation in space-division-multiplexed programmable fatterless networks // Optical fiber technology, 2019, no. 49, pp. 37-49.
8. Bosco G. Advanced modulation techniques for flexible optical transceivers: the rate/reach tradeoff // Journal of Lightwave Technology, 2019, v.37, no 1. pp. 36-49.
9. Rademacher G. et al. High capacity transmission with few-mode fibers // J. lightw. technol, 2019, v.37, no. 2. pp. 425-432.
10. Igarashi K. Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers // Opt. express, 2016, v.24, no. 10, pp. 10213-10231.
11. Кориунов В.Н., Овчинникова И.А. Спектральная и пространственная эффективность высокоскоростной передачи информации по оптическим волокнам // Электросвязь. 2018. № 5. С. 61-65.
12. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shavrin S.S., Shishova N.A., Tsym A.Y. Spectral efficiency of fiber – optic systems modifying conception advance // Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, 2019, march 20-21. Moscow. Russia.
13. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Т.3. Эффективность технических систем. М.: Машиностроение, 1988.
14. Коньшиев В., Наний О., Трециков В. Развитие волоконно-оптических информационных сетей DWDM DCI // Первая мила. 2019. № 4. С. 46-50.

SPATIAL PARALLELISM OF HIGH-SPEED TRANSMISSION OF INFORMATION OVER OPTICAL FIBRES

Vladimir N. Korshunov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, mes@mtuci.ru

Irina A. Ovchinnikova, All-Russian Research Institute of Cable Industry, Moscow, Russia, irovchinnikova@gmail.com

Nadezhda A. Shishova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, n.a.shishova@mtuci.ru

Abstract

The article introduces and applies the parameter P – factor of parallelism, gives expressions for calculating the spectral efficiency and data transfer rate, provides examples of the implementation of spatial parallelism. Parallelism of information transmission in optical fibers is carried out through the use of polarization, spectral, mode, core multiplexing with multiplexing coefficients – parallelism multipliers P_i . The multiplier of spatial parallelism of Psp corresponds to the number of spatial channels created by methods and means of mode and core multiplexing. Elementary, complex and integral parallelism multipliers allow estimating the bandwidth of optical fiber, including software-configurable optical networks with a choice of route, modulation format, spectrum width, fiber cores involved. The spatial parallelism multiplier in optical fiber as part of an optical cable which is integrated in a fiber-optic transmission system is used to calculate the values of the spectral efficiency components and the aggregated data rate. The spectral efficiency components are formed by comparing the result and resource of the optical fiber bandwidth shaping operation. Expressions are given to calculate the spectral efficiency and to determine the transmission rate in the conditions of optical signals propagation spatial parallelism realization.

Keywords: the parallelism of information transfer, concurrency multiplier, spatial multiplexing, spectral efficiency, data rate.

References

1. Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics express*, vol.26, no. 18, pp. 24190-24239.
2. Efimushkin V.A., Kozachenko Y.M., Ledovskikh T.V., Shcherbakova E. N. (2018). Budushij oblik Edinoj seti elektrosvyazi Rossijskoj Federacii [Future appearance of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation], *Electrosvyaz*, no. 10, pp. 18-27.
3. Parfenov B.A. (2019). Kak vnedryaem zyfru [As we introduce figure], *Vestnik Sviazy*, no. 9, pp. 29-35.
4. Peshkov I.B. (2019). Kabel'naya promyshlennost' v usloviyah stanovleniya nacional'noj cyfrovoy ekonomiki [The cable industry as the national digital economy grows], *Kabely i Provoda*, no. 2, pp. 20-24.
5. Korshunov V.N., Shavrin S.C., Shishova N.A. (2017). Skorost' VOSP pri kompleksnom mul'tipleksirovanii [Speed of FLOT in complex multiplexing], *Vestnik Sviazy*, no. 10, pp. 22-24.
6. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A. (2018). Primenenie prostranstvennogo mul'tipleksirovaniya pri peredache informacii po opticheskim kabelyam [Application of spatial multiplexing when transmitting information over optical cables], *Kabely i Provoda*, no. 1, pp. 12-18.
7. Abedifar V., Eshghi M. (2019). Routing, modulation format, spectrum and core allocation in space-division-multiplexed programmable fetherless networks. *Optical fiber technology*, no. 49, pp. 37-49.
8. Bosco G. (2019). Advanced modulation techniques for flexible optical transceivers: the rate/reach tradeoff. *Journal of Lightwave Technology*, v.37, no 1, pp. 36-49.
9. Rademacher G. et al. (2019). High capacity transmission with few-mode fibers. *J. lightw. technol.*, v.37, no. 2, pp. 425-432.
10. Igarashi K. (2016). Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers. *Opt. express*, v.24, no. 10, pp. 10213-10231.
11. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A. (2018). Spektral'naya i prostranstvennaya effektivnost' vysokoskorostnoj peredachi informacii po opticheskim voloknam [Spectral and spatial efficiency of high-speed transmission of information over optical fibers], *Electrosvyaz*, no. 5, pp. 61-65.
12. Korshunov V.N., Ovchinnikova I.A., Shavrin S.S., Shishova N.A., Tsym A.Y. (2019). Spectral efficiency of fiber – optic systems modifying conception advance, *Systems of signals generating and processing in the field of on board communications*, march 20-21. Moscow, Russia.
13. *Nadezhnost' i jeffektivnost' v tehnikе [Reliability and efficiency in engineering]*, Spravochnik v 10 t. [Handbook in 10 volumes], T.3 Effektivnost' tehnikeskikh sistem [Efficiency of technical systems]. Moscow: Mashinostroenie, (1988).
14. Konyshov V., Naniy O., Treshchikov V. (2019). Razvitie volokonno-opticheskikh informacionnyh setej DWDM DCI [Development of DWDM DCI fiber optic information networks]. *Pervaya milya*, no. 4, pp. 46-50.

Information about authors:

Vladimir N. Korshunov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, full doctor of technical science, professor of the "Telecommunication Systems" chair, Moscow, Russia

Irina A. Ovchinnikova, All-Russian Research Institute of Cable Industry, Director of Scientific Direction – Head of the Department of Cables and Wires for Telecommunications and Informatization, candidate of sciences in technology, Moscow, Russia

Nadezhda A. Shishova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, PhD, associate professor, head of the "Telecommunication Systems" chair, Moscow, Russia

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПАКЕТНОГО БУФЕРА ETHERNET КОММУТАТОРА

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-18-24

Моисеев Виктор Игоревич,
Пермский государственный национальный
исследовательский университет, г. Пермь, Россия,
vim@psu.ru

Ключевые слова: мультисервисные сети связи, сеть доступа, обслуживание очередей, IP-телевидение, QoS, качество обслуживания, пакетный буфер, нагрузочное тестирование.

Исследуется метод детектирования дисциплины обслуживания пакетного буфера Ethernet коммутатора. Актуальность задачи обусловлена необходимостью верификации объемов и структуры буферной памяти коммутаторов, а также недостаточной или неоднозначной информацией, которую публикуют производители. Цель исследования – разработка метода экспериментального исследования Ethernet коммутатора, позволяющего делать выводы о структуре пакетных очередей, используемой политике обслуживания, абсолютном размере пакетного буфера. Материалы и методы. Определение размера буфера предлагается производить на основании наблюдения за поведением пакетного трафика, при его прохождении сквозь исследуемое устройство под большой нагрузкой. На основе предполагаемой архитектуры тракта обработки пакета построена модель переходного процесса нарастания пакетной очереди в различных точках тракта обработки пакета. Показано как структура и относительные размеры очередей влияют на наблюдаемые свойства пакетного трафика под предельной нагрузкой. Метод позволяет определить используемую структуру очередей – одна исходящая очередь, несколько исходящих очередей, несколько исходящих очередей с граничными условиями, приоритетная очередь, а также вариант с общим буферным пространством. Приводятся обоснования применимости метода при различных конфигурациях структуры очередей. Результаты. Приведены данные экспериментов с различными вариантами форматирования пакетного буфера и различными структурами нагрузочного трафика. Проведено экспериментальное вычисление размеров пакетного буфера на нескольких популярных моделях Ethernet коммутаторов. Экспериментально показано как определенные варианты структурирования буферов влияют на поток транзитного трафика, а также когда наблюдаются непредвиденные потери. Выявлены варианты способствующие проявлению нежелательного эффекта перегрузки клиентского порта. Последовательно проведен анализ переходных процессов во всех экспериментальных конфигурациях и даны рекомендации по их применимости. Предложенный метод пригоден для определения абсолютного размера пакетного буфера коммутатора, а также структуры очередей в классических коммутаторах с промежуточной буферизацией.

Информация об авторе:

Моисеев Виктор Игоревич, ведущий программист отдела ИВС Университетского Центра Интернет ПГНИУ; старший преподаватель кафедры РиЗИ ПГНИУ; аспирант кафедры МСИБ ПГУТИ, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Для цитирования:

Моисеев В.И. Экспериментальное исследование структуры пакетного буфера Ethernet коммутатора // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 18-24.

For citation:

Moiseev V.I. (2020) Experimental evaluation of Ethernet switch packet buffer structures. *T-Comm*, vol. 14, no.1, pp. 18-24. (in Russian)

Введение

Современные многопортовые Ethernet-коммутаторы работают по принципу буферизации проходящих Ethernet-фреймов. В обычных коммутаторах уровня доступа реализована схема “полностью принять, только потом отправить” (store-and-forward). Когда порт коммутатора принимает фрейм, производится контроль ошибок, принимается решение о дальнейшей коммутации и только потом фрейм покидает коммутатор с исходящего порта. Все это время фрейм находится в так называемом пакетном буфере, или проходит через серию пакетных буферов во внутренних коммутационных элементах. Существуют различные алгоритмы скоростной коммутации (cut-through), но даже в них происходит переключение на классическую схему буферизации, например при конкуренции за исходящий порт. Таким образом, пакетный буфер – неотъемлемая часть коммутационного тракта, позволяющая повысить загрузку коммутатора при неравномерностях в интенсивности поступления потока трафика.

Абсолютные размеры буферов важны для грамотного планирования емкости сети. Увеличение очередей приводит к задержкам, тогда как уменьшение буфера ниже определенных величин приводит к потерям трафика. Для отдельных типов трафика, таких как голосовой, интерактивный трафик, предельные значения потерь и задержек регламентированы различными стандартами и даже нормативно правовыми актами [1-3]. Допустимые значения задержек и потерь также включаются в договора на предоставление услуги по передаче данных. К сожалению, данные о размерах пакетных буферов публикуются далеко не всеми производителями и не для всех моделей коммутаторов [4, 5]. Ситуация усложняется также тем, что внутренняя организация буферов в конкретной модели коммутатора неизвестна [6-8]. Все это усложняет планирование сети передачи данных и поиск причин неисправностей в существующих сетях.

В настоящей работе рассматривается модель простой FIFO-очереди пакетного буфера, и варианты буфера с двумя очередями. Исследована методика стендового эксперимента в задаче определения объема буфера. Рассчитаны размеры буферной памяти на основании экспериментальных данных. Исследованы возможные варианты структурирования очередей на коммутаторе Cisco Catalyst 2960G-24 и проведена серия экспериментов по изучению влияния данных структур на потоки трафика.

1. Методика определения размеров и структуры пакетного буфера

Рассмотрим несколько простых схем организации очередей и различия в их влиянии на проходящий трафик. Простейшая дисциплина обслуживания очереди – FIFO (“первый пришел – первый вышел”). Все пакеты трафика равноправны и на нагруженном порту буферизуются в очереди. Очередь растет до определенного максимального размера, после чего вновь прибывшие пакеты отбрасываются (схема “tail-drop”). Когда требуется обеспечить различные уровни обслуживания, пакеты различных классов маркируются либо в момент прихода на порт, либо заранее – в процессе передачи по сети. Маркировка производится в полях DSCP в заголовке IP, и/или в полях CoS кадров Ethernet [9-10].

Одна из популярных схем реализации приоритетного обслуживания – выделение на буфере приоритетной очереди – трафик из данной очереди будет обслужен вне зависимости от того, ожидают ли пакеты в обычной очереди. Размеры обычной и приоритетной очереди могут отличаться. Другая распространенная схема – выделение в очереди промежуточных предельных значений, которые действуют только на отдельные классы трафика. Пакеты трафика определенного класса будут отброшены при превышении граничного значения заданного именно для этого класса. Примерная архитектура буфера с двумя очередями, одна из которых приоритетная, представлена на рис.1 (слева). На рисунке 1 (справа) изображена одна очередь с несколькими промежуточными границами.

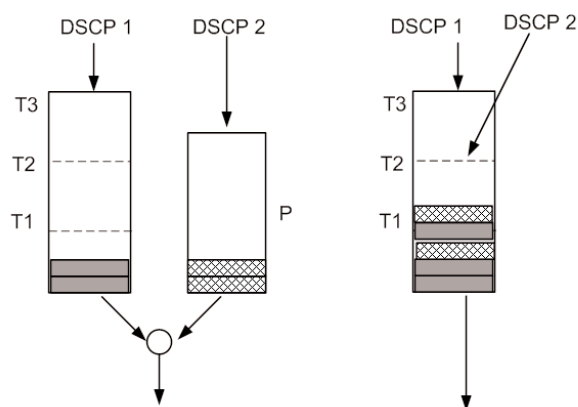


Рис 1. Схема организации буфера с приоритетной очередью (слева), и с тремя промежуточными границами в единственной очереди (справа)

Используемая методика экспериментального определения размера буфера порта основана на наблюдении влияния перегруженного порта на временные свойства транзитного трафика [11]. Пусть пакеты поступают с постоянной интенсивностью, время обработки всех пакетов одинаково и зависит только от размера пакета. Примем также, что интенсивность обработки пакетов постоянна и известна, а количество мест в очереди (буфере) конечно и равно N . Такую схему СМО принято обозначать $D/D/1/N$. Аналитическое решение для подобной очереди дано, например, в [12]. Исследуемый коммутатор включается в разрыв между двумя тестируемыми узлами [13]. С узла источника запускается непрерывный поток пакетов одинаковой длины с битовой интенсивностью λ . Каждый пакет нумеруется порядковым номером. Абсолютным значением межпакетного интервала пренебрежем по сравнению с размером пакета. Настроим коммутатор на фиксированную постоянную интенсивность отправки пакетов – μ . Предположим, что интенсивность поступления пакетов превышает интенсивность обработки (рис. 2).

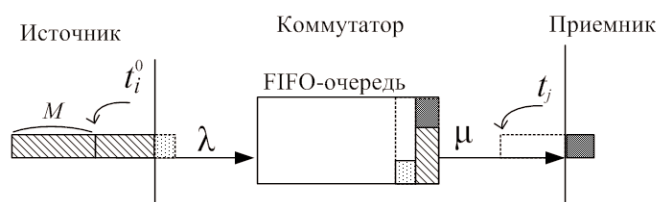


Рис. 2. Модель передачи пакета сквозь коммутатор с буферизацией

Примем, что вся задержка на коммутационном тракте будет состоять из времени сериализации пакета на входе и на выходе из буфера. Коммутатор начинает обрабатывать пакет только после полного приема пакета в буфер. Прием пакета в буфер возможен только в том случае, если имеется хотя бы одна свободная ячейка. Пакет занимает ячейку целиком вплоть до окончания обработки. Обозначим за t_i^0 момент времени, когда пакет с порядковым номером i покинет источник.

На рисунке 3 представлены временные диаграммы процесса отправки пакетов с источника, прохождения через буфер коммутатора и получения их приемником. Диаграмма для буфера представлена со сквозной нумерацией битов (как для кольцевого буфера), интенсивности λ и μ взяты произвольно для наглядности, причем $\lambda > \mu$. Пусть пакеты пронумерованы сквозной нумерацией. Из диаграммы видно, что на момент прихода в буфер пакетов со 2 по 6 в буфере все еще занята ячейка пакетом номер 1. Текущая длина очереди обозначена $q(t)$. Наклон прямых на диаграмме представляет собой битовую интенсивность поступления и обработки пакетов – λ и μ , соответственно.

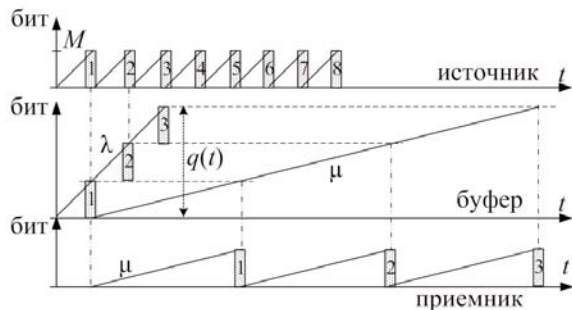


Рис. 3. Временные диаграммы процесса отправки пакетов с источника (верхняя), прохождения через буфер коммутатора (средняя), и получения их приемником (нижняя)

Очевидно, что при превышении скорости приема над скоростью обработки, пакеты будут накапливаться в буфере. Введем ограничение на длину очереди. Пусть буфер ограничен всего тремя ячейками памяти: $N = 3$. Соответствующие временные диаграммы процессов отправки пакетов на рис. 4. Из диаграммы видно, что во время отправки пакета номер 1 на коммутатор успевают прийти пакеты с номерами от 2 до 6. При этом пакет 1 все еще занимает очередь, 2 и 3 становятся в очередь. На моменты прихода 4 и 5 пакетов в очереди нет свободных ячеек и пакеты отбрасываются (на диаграмме отмечены символом "X"). Даже когда начинает поступать пакет номер 6, буфер все еще занят, и пакет отбрасывается.

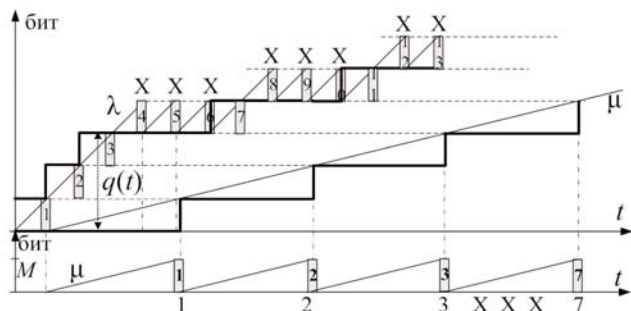


Рис. 4. Временные диаграммы переполнения пакетного буфера

В буфере появляется свободное место только к моменту прихода 7 пакета. Далее очередь остается в состоянии насыщения и входит в фазу постоянной флуктуации количества занятых ячеек от значения N до $N-1$. С точки зрения теории СМО этот процесс рассмотрен в работе [14]. Предположим, что значение N достаточно велико, чтобы опустить рассмотрение вышеозначенные флуктуации.

Обратим внимание на то, как подобный поток трафика воспринимается приемником. Сначала приемник фиксирует стабильный поток трафика интенсивности μ , номера входящих пакетов строго последовательны. Через некоторое время непрерывность нумерации нарушается, и Приемник детектирует исчезновение серии пакетов. Интенсивность поступления пакетов на Приемник неизменна. Времена прихода пакетов и их номера фиксируются Приемником для дальнейшей обработки [15].

Теперь, зная механизм эволюции очереди, построим диаграмму занятого битового объема в пакетном буфере от времени (рис. 5).

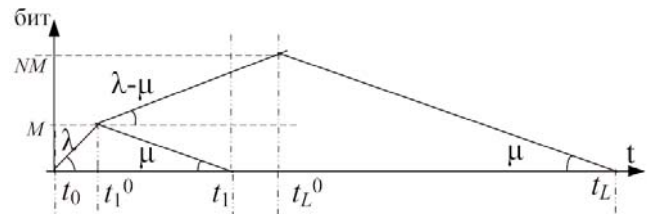


Рис. 5. Временная диаграмма занятого объема пакетного буфера емкостью N пакетов

Для битового размера буфера при данных условиях, на основании графиков заполнения очереди, можем получить формулу для расчета битового размера буфера B :

$$B = M + (t_L - t_1) \left(\mu - \frac{\mu^2}{\lambda} \right)$$

где M – битовый размер пакета, t_1 – экспериментально зафиксированное время приема первого пакета, t_L – экспериментально зафиксированное время получения последнего пакета с корректным номером. Подробный вывод формул расчета буфера представлен в работе [11].

Расширим данную методику для применения к пакетному буферу, представленному на рис. 1 (слева). Применим два независимых источника трафика (рис. 6).

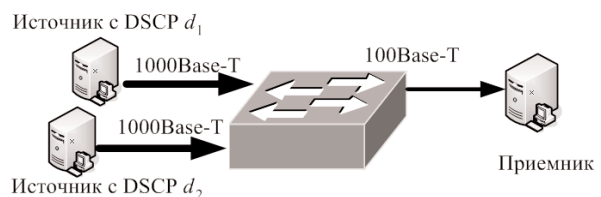


Рис. 6. Схема включения коммутатора с двумя источниками и одним получателем

Из представленной схемы очевидно, что любой из двух источников трафика может перегрузить пакетную очередь и ввести исходящий порт в состояние перегрузки. На нем генерацию трафика на первом источнике с максимальной интенсивностью, по вышеописанной методике,

DSCP d_1 . Вычислим объем буфера относительно первого потока – B_1 . Убедимся при помощи анализатора трафика на Приемнике, что некоторые пакеты отбрасываются коммутатором, и очередь на порту находится в состоянии перегрузки. При этом размер очереди в пакетах находится в постоянной флуктуации от максимального размера N до $N - 1$.

Далее, не останавливая первый поток трафика, проводим эксперимент аналогично, но с независимого источника трафика, также на максимальной интенсивности, с пакетами, промаркированными отличным от первого кодом DSCP d_2 . Вычислим объем буфера относительно второго потока – B_2 .

В случае если оба потока попадают в одну и ту же очередь и не имеют приоритетов относительно друг друга, на втором потоке Приемник не зафиксирует начального линейного участка с непрерывными номерами пакетов. Вычислить B_2 не получится, что равносильно значению B_2 эквивалентному одному пакету.

Таким образом, если значение B_2 удастся измерить при многократном проведении эксперимента, значит трафик с DSCP d_2 попадает в приоритетную очередь и ее объем равен B_2 . Теперь измерим размеры очередей для каждого из потоков d_1 и d_2 независимо, без трафика от второго источника. Обозначим полученные размеры B'_1 и B'_2 , соответственно. Если $B'_2 = B_2$, то приоритетная очередь является выделенной, и менее приоритетный трафик на нее не влияет.

Если равенство не выполняется, то приоритетный трафик d_2 использует ту же очередь, что и d_1 , но пакеты попадают под действие различных граничных значений (см. рис. 1 (справа)). Перебрав все комбинации значений DSCP (или, что проще, поле CoS в IEEE 802.1q метке) для обоих потоков трафика, мы можем получить таблицу соответствия значений DSCP конкретным очередям и граничным уровням.

2. Результаты эксперимента

В эксперименте исследовалась структура и размеры пакетного буфера коммутатора Cisco Catalyst WS-C2960G-24TC-L, ревизия B0, с установленной версией ПО Cisco IOS c2960-lanbasek9-mz.122-58.SE2. Производитель не публикует данных об объемах буферов на данном коммутаторе, но, согласно комментариям разработчиков [16] каждая ASIC-микросхема на данной платформе оперирует 576 КБ буфера на 4 смежных порта.

Во всех экспериментах источник трафика подключается на порт с принудительно выставленной скоростью 100 Мбит/с (100Base-T), а приемник трафика подключается в порт на скорости 10 Мбит/с (10Base-T). Отправитель маркирует каждый пакет порядковым номером. Приемник детектирует время прихода каждого пакета и его порядковый номер с помощью ПО захвата пакетов tcpdump.

В первом эксперименте сравнивается поведение трафика при отключенном управлении качеством обслуживания (QoS) и включенном. На рисунке 7 представлены графики зависимости принятого порядкового номера пакета трафика от времени прибытия этого пакета. На графиках представлены по три результата для каждого варианта настройки.

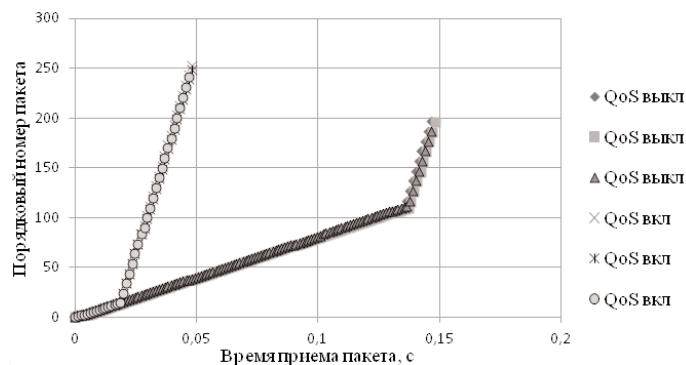


Рис.7. Зависимость порядкового номера принятого пакета от времени с включенным и выключенным функционалом QoS

Как видно из рис. 7, при отключенных настройках QoS коммутатор передает без потерь 110 ± 1 пакетов, после чего буфер исходящего порта переполняется и мы видим значительные (? 90%) потери пакетов. Такой процент потерь объясняется десятикратным различием в скорости входящего и исходящего порта. Назовем период времени жизни потока на переполненной очереди фазой отсечки. Время получения последнего пакета с корректным номером составляет 136 мс. Эти же значения после включения QoS составляют 15 пакетов и 18 мс. Рассчитав по представленной методике объем буфера получим 155 КБ и 22 КБ для отключенного и включенного QoS соответственно. Исходя из значения 155 КБ, можно предположить, что каждая ASIC-микросхема делит 576 КБ буферного пространства равномерно на 4 порта. При включении механизмов управления приоритетами (QoS) данная модель коммутатора, согласно документации, формирует буфер порта в 4 очереди, при этом каждая очередь получает 25% от исходного размера буфера и лишь половина этого пространства резервируется. Таким образом, мы ожидаем получить восьмикратное уменьшение доступного одной очереди буфера при включении QoS. Полученный экспериментально результат соответствует нашим предположениям.

Во втором эксперименте мы включаем функционал QoS и направляем трафик от двух источников с разными метками DSCP на один приемник, причем на выходном порту будем использовать одну очередь с двумя граничными уровнями для этих классов трафика. Очередь использует 25% общего буфера. Граница для менее приоритетного трафика (T1) выставлена на уровень 100% от объема очереди, граница для более приоритетного трафика – 150% (T2). Значение больше 100% означает, что очередь может пользоваться общим буфером сверх зарезервированного пространства. Более приоритетный поток запускается с небольшой задержкой относительно начала первого потока. Один из графиков серии представлен на рис. 8.

На графике (рис. 8) мы можем наблюдать полное прекращение приема менее приоритетного трафика после появления более приоритетного. Это можно объяснить логикой работы одной очереди с двумя граничными значениями (см. рис. 1, справа). Первый поток после старта эксперимента полностью заполняет доступную ему часть очереди и переходит в фазу отсечки.

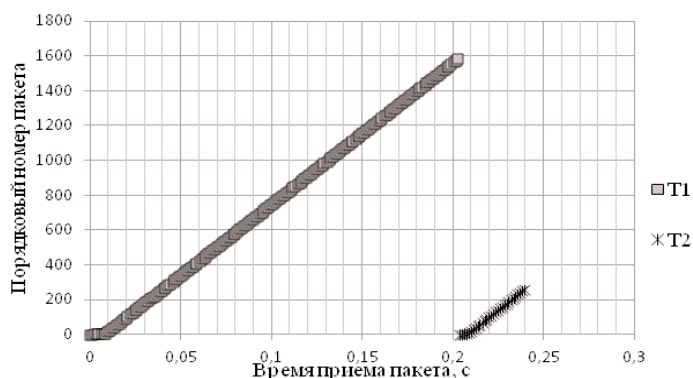


Рис. 8. Зависимость порядкового номера принятого пакета от времени для двух потоков с разными границами буфера: T1 и T2

Пакеты второго потока застают нижнюю часть очереди полностью занятой, но имеют возможность заполнять очередь выше, до своего граничного значения. Заполнив указанное пространство, приоритетный поток также переходит в фазу отсечки. Время от начала потока до начала потерь для низкоприоритетного трафика составило 8,5 мс, для высокоприоритетного – 4 мс. Расчетные значения размеров очереди составляют 11 КБ и 4 КБ соответственно. Заметим, что второе значение соответствует разнице между граничными уровнями, т.е. реальное значение объема для второго граничного уровня – 15 КБ. Это значение меньше, чем значение из предыдущего эксперимента для одной очереди.

В следующем эксперименте мы используем такую же топологию – два источника и один приемник, но одну из четырех очередей объявим приоритетной. На основной очереди оставляем граничное значение 100%. Мы ожидаем, как и в случае с двумя граничными значениями, что старт приоритетного потока приведет к полной остановке низкоприоритетного трафика. Результат представлен на рис. 9.

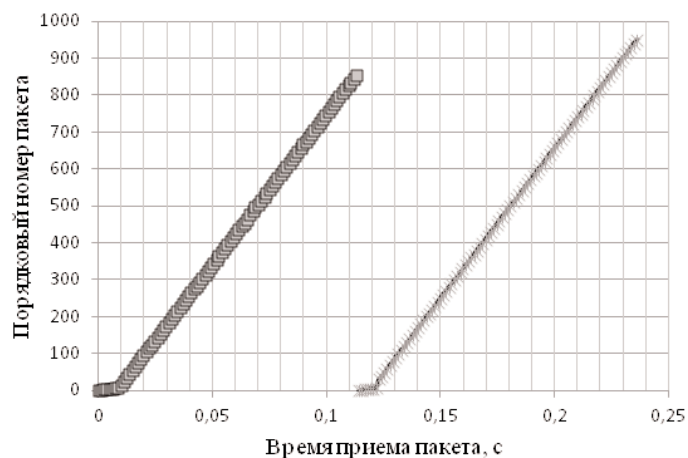


Рис. 9. Зависимость порядкового номера принятого пакета от времени для обычного потока (T1) и приоритетного (P)

Как и ожидалось, приоритетный трафик, заполнив свою очередь, парализует движение низкоприоритетного потока. Вычисленные значения объема приоритетной и обычной очереди составили 10 КБ и 11 КБ соответственно. Сравнивая Рис. 8 и 9 можем заключить, что по данной методике нельзя отличить работу коммутатора с одной очередью и разными граничными значениями от структуры с приоритетной очередью.

В следующем эксперименте мы пронаблюдаем работу очереди с общей памятью. Одной из четырех исходящих очередей порта мы назначим максимально допустимый размер, остальным – минимальный. Производитель разрешает резервировать для очереди не более 100% объема, но заявляет, что очередь может использовать до 3200% памяти из некоего общего буферного пространства (“common pool”) [17]. Результаты представлены на рис. 10.

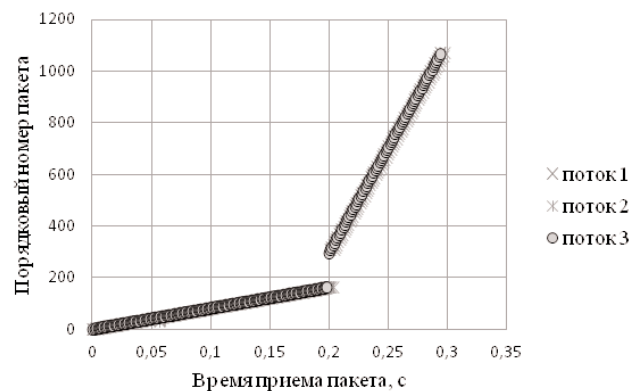


Рис. 10. Зависимость порядкового номера пакета от времени для серии потоков с использованием максимально возможного объема памяти

График для данного эксперимента резко отличается от предыдущих – после серии из 162 равномерно идущих пакетов происходит резкий скачок и 140 пакетов теряются. После скачка поток переходит в фазу отсечки. Рассчитанное по первой части графика значение буфера составляет 227 КБ, что в полтора раза больше, чем значение буфера при выключенном функционале QoS. Аномальную потерю пакетов можно объяснить следующим образом.

Каждый порт имеет входящий буфер, в котором пакеты ожидают очереди для доступа на коммутационную матрицу. Входящий и исходящий буферы размечены на одной и той же памяти. При медленной скорости вывода пакетов возможно затирание исходящим буфером части ячеек входящего буфера в пределах одной микросхемы ASIC. Похожий эффект наблюдался ранее на коммутаторах центров обработки данных в работах [18-19], но эффект объяснялся несовпадением частоты работы диспетчера обслуживания конкурентного порта и диспетчера коммутационной матрицы.

В последнем эксперименте мы постарались пронаблюдать конкуренцию двух потоков из разных равноправных очередей за выходной порт. Показательный результат из серии представлен на рис. 11.

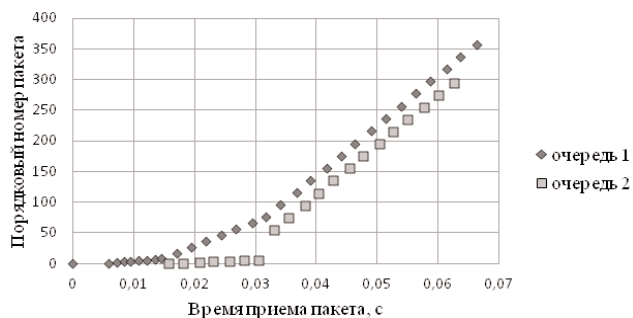


Рис. 11. Зависимость порядкового номера пакета от времени двух потоков назначенных в разные исходящие очереди

Мы ожидаем, что обе очереди будут обслуживаться исходящим портом с одинаковой интенсивностью, т.к. ни одна из них не является приоритетной. Как видно из рис. 11 именно это и происходит на начальной фазе заполнения буфера и в фазе отсечки. Тем не менее, в потоке из второй очереди мы видим характерный скачок из 50 потерянных пакетов. Это перекликается с результатами предыдущего эксперимента и сигнализирует о наличии некоего процесса переформатирования общего буфера.

Экспериментальные данные о размерах исходящего буфера нескольких популярных моделей коммутаторов с отключенным управлением качеством обслуживания представлены в табл. 1, с различными настройками QoS – в табл. 2.

Таблица 1

Экспериментальные полученные размеры исходящего буфера на некоторых коммутаторах при выключенном функционале QoS

Коммутатор	Объем буфера, КБ	Объем буфера, кол-во пакетов 1500Б
WS-C2960-24TT-L	124	82
WS-C2960S-48FPD-L	71	48
WS-X6748-GE-TX	376	249
WS-C2960G-24TC-L	154	103

Таблица 2

Экспериментальные полученные размеры исходящего буфера на WS-C2960G-24TC-L при различных параметрах управления QoS

Параметры QoS	Объем буфера, КБ	Объем буфера, кол-во пакетов 1500Б
Управление QoS выключено, 1 очередь	154	103
Управление QoS включено, 1 очередь	22	15
Управление QoS включено, 1 очередь, 2 уровня (первый поток)	11	7
Управление QoS включено, 1 очередь, 2 уровня (второй поток)	6	4
Управление QoS включено, 2 очереди (одна из которых приоритетная) – обычный поток	11	7
Управление QoS включено, 2 очереди (одна из которых приоритетная) – приоритетный поток	10	7
Управление QoS включено, 2 очереди (первый поток)	11	7
Управление QoS включено, одной очереди выдан максимальный объем общего буфера	227	150

Выводы

Представленная методика экспериментального исследования структуры буферов Ethernet-коммутатора позволяет вычислять абсолютные размеры исходящего пакетного буфера. Исходя из получаемых графиков, можно делать выво-

ды о конкретной структуре очередей, в том числе о размере каждой очереди и привязке класса трафика к очереди. Метод также позволяет диагностировать случаи аномально больших потерь трафика в определенных схемах включения, что дает возможность в дальнейшем принимать меры для исключения подобного поведения. Вопрос экспериментального детектирования приоритетной очереди и ее отличия от одной очереди с несколькими граничными условиями требует дополнительного изучения.

Литература

1. *Szigeti T., Hattinigh C., Barton R., Briley K.* End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks, 2nd Edition // Cisco Press, 2012. 1040 с.
2. Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks ETSI TS 102 034 V2.1.1 // European Broadcasting Union, София-Антиполис, Франция, 2016. 331 с.
3. Приказ Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от 27.09.2007 № 113 "Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования" [Электронный ресурс] URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/3921/> (дата обращения: 01.09.2019).
4. *Warner J.* Packet buffers [Электронный ресурс] URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/buffer.html> (дата обращения: 01.02.2019).
5. Mellanox Spectrum vs. Broadcom StrataXGS Tomahawk [Электронный ресурс]. Tolly Group, 2016 URL: <http://www.mellanox.com/related-docs/products/tolly-report-performance-evaluation-2016-march.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
6. Arista LANZ Overview [Электронный ресурс] URL: https://people.ucsc.edu/~warner/BuFs/Arista_LANZ_Overview_TechBulletin_0213.pdf (дата обращения: 26.08.2019).
7. Intel Ethernet Switch Family Memory Efficiency Non-blocking Fabric Architecture [Электронный ресурс] URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/BuFs/intel-memory-efficiency-paper.pdf> (дата обращения: 26.09.2019).
8. Speeding Applications in Data Center Networks [Электронный ресурс] URL: <https://microm.com/pdf/reports/20160210.pdf> (дата обращения: 01.10.2019).
9. *Grossman D.* New Terminology and Clarifications for DiffServ [Электронный ресурс] URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3260> (дата обращения: 14.10.2019).
10. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network--Bridges and Bridged Networks / Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8403927> (дата обращения: 10.10.2019).
11. *Мусеев В.И.* Метод аудита размера пакетного буфера коммутатора // Вестник Пермского университета. Серия «Информационные системы и технологии», Вып. 1. Пермь. 2018. С. 32-35.
12. *Zuckerman M.* Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models [Электронный ресурс] URL: <https://arxiv.org/pdf/1307.2968.pdf> (дата обращения: 14.10.2019).
13. *Bradner S., McQuaid J.* RFC-2544. Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices [Электронный ресурс] URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt> (дата обращения: 26.09.2019).
14. *Garcia J.-M., Brun O., Gauchard D.* Transient Analytical Solution of M/D/1/N Queues // Journal of applied Probability. Vol. 39. No. 4 (Dec., 2002), С. 853-864.
15. PCAP-TSTAMP – packet time stamps in libpcap [Электронный ресурс] URL: <https://www.tcpdump.org/manpages/pcap-tstamp.7.txt> (дата обращения: 26.09.2019).
16. *Tsukerman A.* Buffer size on 3750G [Электронный ресурс] URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/BuFs/3750G-buf.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).
17. Catalyst 2960 and 2960-S Switches Software Configuration Guide, Release 12.2(58)SE [Электронный ресурс] URL: https://www.cisco.com/c/en/us/t/d/docs/switches/lan/catalyst2960/software/release/12-2_58_se/configuration/guide/2960scg/swqos.html (дата обращения: 10.10.2019).
18. *Chen Y., Griffith R., Liu J., Katz R.* Understanding TCP Incast Throughput Collapse in Datacenter Networks // Материалы конференции WREN'09, 21 августа, 2009, Барселона, Испания.
19. *Prakash P., Dixit A., Kompella R.* The TCP Outcast Problem: Exposing Unfairness in Data Center Networks [Электронный ресурс] URL: <https://www.usenix.org/system/files/conference/nsdi12/nsdi12-final126.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).

EXPERIMENTAL EVALUATION OF ETHERNET SWITCH PACKET BUFFER STRUCTURES

Victor I. Moiseev, Perm State University, Perm, Russia, vim@psu.ru**Abstract**

A method to detect or verify actual packet buffer size of an Ethernet switch with different queuing disciplines presented. In enterprise and datacenter networking environment there exists a need for a method to experimentally verify or measure exactly how deep packet buffers are and which structures and service disciplines do they have. Also there exists lack of published specifications from switch vendors on these topics. Aim. To develop a method to detect queuing discipline and actual buffer sizes of Ethernet switches. Materials and methods. Based on possible buffer architectures we study effects of different engineering decisions on observed traffic patterns. We show how from these patterns internal buffer schemes could be revealed. Buffers are verified on size and priority handling. Buffer sizes estimated on the basis of analyzed packet loss under overload conditions. Results. We present numeric results of buffer size estimation for an Ethernet switch of popular vendor and give some thoughts on how modern complex QoS schemes can be identified and verified. We also show experimental data on packet loss and packet flow structures in several configurations. In some cases incast or outcast collapse effects observed. Conclusion. The method presented is suitable for reliable verification of packet buffer sizes and queue structures in store-and-forward Ethernet switches.

Keywords: scheduling discipline, QoS, packet buffer, priority queue, stress testing.

References

1. Szigeti T., Hattingh C., Barton R., Briley K. *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks*, 2nd Edition. Cisco Press, 2012.- 1040p.
2. Transport of MPEG-2 TS Based DVB Services over IP Based Networks ETSI TS 102 034 V2.1.1 European Broadcasting Union, France, 2016 - 331p.
3. Order of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation of September 27, 2007 No. 113 "On approval of the Requirements for the organizational and technical support for the stable functioning of the public communications network" [Prikaz Ministerstva informatzionnyh tehnologiy i svyazi Rossiyskoy Federatzii ot 27.09.2007 #113 "Ob otverzhdenii Trebovaniy k organizatzinno-tehnicheskomu obezpecheniyu ustoychivogo funktsionirovaniya seti svyazi obshego polzovaniya"] Available at: URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/3921/> (accessed: 01.09.2019).
4. Warner J. Packet buffers Available at: URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/buffer.html> (accessed: 01.02.2019).
5. Arista LANZ Overview Available at: URL: https://people.ucsc.edu/~warner/Bufs/Arista_LANZ_Overview_TechBulletin_0213.pdf (accessed: 26.09.2019).
6. Mellanox Spectrum vs. Broadcom StrataXGS Tomahawk / Tolly Group, 2016 Available at URL: <http://www.mellanox.com/related-docs/products/tolly-report-performance-evaluation-2016-march.pdf> (accessed: 10.10.2019).
7. Intel Ethernet Switch Family Memory Efficiency Non-blocking Fabric Architecture Available at: URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/Bufs/intel-memory-efficiency-paper.pdf> (accessed 26.09.2019).
8. Speeding Applications in Data Center Networks Available at URL: <https://miercom.com/pdf/reports/20160210.pdf> (accessed: 01.10.2019).
9. Grossman D. New Terminology and Clarifications for Diffserv Available at URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3260> (accessed: 14.10.2019).
10. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network--Bridges and Bridged Networks / Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. Available at: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8403927> (accessed: 10.10.2019).
11. Moiseev V.I. Switch Packet Buffer Audit Method [Metod audita paketnogo bufera kommutatora]. *Vestnik Permskogo Universiteta. Seriya "Informatsionnye Sistemy i Tehnologii"*. Vol. 1, Perm, 2018, pp. 32-35.
12. Zuckerman M. Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models Available at: URL: <https://arxiv.org/pdf/1307.2968.pdf> (accessed: 14.10.2019).
13. Bradner S., McQuaid J. RFC-2544. Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices Available at: URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt> (accessed 26.09.2019).
14. Garcia J.-M., Brun O., Gauchard D. Transient Analytical Solution of M/D/1/N Queues. *Journal of applied Probability*. Vol. 39, No. 4 (Dec.,2002), pp. 853-864.
15. PCAP-TSTAMP – packet time stamps in libpcap Available at: URL: <https://www.tcpdump.org/manpages/pcap-tstamp.7.txt> (accessed: 26.09.2019).
16. Tsukerman A. Buffer size on 3750G Available at: URL: <https://people.ucsc.edu/~warner/Bufs/3750G-buf.pdf> (accessed: 10.10.2019).
17. Catalyst 2960 and 2960-S Switches Software Configuration Guide, Release 12.2(58)SE Available at: URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst2960/software/release/12-2_58_se/configuration/guide/2960scg/swqos.html (accessed: 10.10.2019).
18. Chen Y., Griffith R., Liu J., Katz R. Understanding TCP Incast Throughput Collapse in Datacenter Networks. *Proceedings of WREN'09*, 21 august, 2009, Barcelona, Spain.
19. Prakash P., Dixit A., Kompella R. The TCP Outcast Problem: Exposing Unfairness in Data Center Networks Available at: URL: <https://www.usenix.org/system/files/conference/nsdi12/nsdi12-final126.pdf> (accessed: 10.10.2019).

Information about author:

Victor I. Moiseev, Lead programmer of IT-department of Perm State University, assistant professor of Faculty of Physics of Perm State University, Perm, Russia

АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-25-35

Винограденко Алексей Михайлович,
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
vinogradenko.a@inbox.ru

Будко Никита Павлович,
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
budko62@mail.ru

Ключевые слова: автономные сложные
технические объекты, измерительная информация,
адаптивность, автоматизированные системы
контроля, техническое состояние, идентификация,
оценивание.

Статья посвящена исследованию процессов адаптивного контроля технического состояния автономных сложных технических объектов, характеризующихся высокой ценой отказа. Показана актуальность данного направления исследования. Цель работы заключается в синтезе адаптивной автоматизированной системы контроля технического состояния автономных сложных технических объектов, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, для поддержания работоспособности которых, необходим адаптивный экспресс-анализ измерительной информации, получаемой в процессе контроля и ее безызыбыточная передача для принятия оперативных решений со стороны системы управления. Представлен подход к построению адаптивных систем контроля технического состояния автономных территориально-распределенных объектов на основе телеметрических систем, функционирующих в режимах экспресс-контроля и полного контроля. Приведен пример построения, структуры подсистемы оценивания измерительной информации и идентификации классов состояний объектов контроля в адаптивных автоматизированных системах контроля на основе идентификатора аварийных ситуаций. Определены характерные черты адаптивных автоматизированных систем контроля технического состояния автономных территориально-распределенных сложных технических объектов. К особенностям перспективных адаптивных систем контроля таких объектов следует отнести: двухэтапность процесса контроля (снижение избыточности измерительной информации), учет стохастической взаимозависимости контролируемых параметров объектов, адаптируемость частоты измерений относительно наблюдаемых отклонений параметров, проведение постоянного метрологического самоконтроля в процессе функционирования адаптивных автоматизированных систем контроля, комплексное применение разнородных каналов связи в сочетании с адаптивностью к внешним воздействиям на линию связи в процессе передачи телеметрической информации. Приведены основные методы адаптации автоматизированных систем контроля технического состояния автономных сложных технических объектов.

Информация об авторах:

Винограденко Алексей Михайлович, к.т.н., доцент, докторант, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Будко Никита Павлович, соискатель ученой степени, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Винограденко А.М., Будко Н.П. Адаптивный контроль технического состояния автономных сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 25-35.

For citation:

Vinogradenko A.M., Budko N.P. (2020) Adaptive control of technical condition of autonomous complex technical objects on the basis of intelligent technologies. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 25-35. (in Russian)

Введение

Резкий рост новых автономных сложных технических систем (АСТС), характеризующихся «высокой ценой отказа», на основных этапах жизненного цикла (ЖЦ – испытаний, эксплуатации) требует коррекции старых, а также разработки новых требований и задач к автоматизированным системам контроля (АСК) технического состояния (ТС) АСТС. Под АСТС следует понимать такие объекты как робототехнические комплексы (РТК) различных типов базирования (наземного и морского (как подводного, так и надводного)), необитаемые отсеки стационарных технологических объектов специального назначения (СН), беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и др.

Автономность функционирования АСТС, требующая постоянного контроля их ТС, характеризует рост объема измерений, необходимых для контроля довольно большого числа контролируемых параметров и позволяющих производить оценку ТС объектов контроля (ОК). Однако не вся информация одинаково ценна, если учесть, что любые измерения проводятся с определенной точностью, то часть измеренного объема информации является избыточной.

С учетом специфики АСТС, наибольший интерес представляют системы контроля, функционирующие непрерывно, или в режиме времени, близком к реальному, и реализующие как полный контроль, так и экспресс-контроль [1], что необходимо для информационного обеспечения процессов управления, а также обеспечения работоспособности данных систем.

Контроль функционирования АСТС – контроль его ТС, осуществляемый непрерывно (периодически) при использовании по назначению с целью своевременного обнаружения факта перехода его в неработоспособное состояние [1].

Полный контроль, заключается в получении измерительной информации (ИИ) по всем контролируемым параметрам ОК. Экспресс-контроль позволяет осуществлять наблюдение за ограниченной (приоритетной) группой параметров в течение определенного периода времени [1].

Динамическое изменение процессов мониторинга (дистанционного контроля) ТС территориально-распределенных автономных АСТС по полученной экспресс-информации в ряде случаев является достаточно важным.

В условиях автономного функционирования, когда система обладает широким спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических, структурных и др.), наиболее актуальным является требование по адаптивности синтезируемой модели функционирования АСТС под конкретную задачу [2]. Данный факт подтверждается перспективным направлением работ в области создания систем адаптивного контроля ТС АСТС, построенных с учетом существующих (апробированных) интеллектуальных технологий, а также различных математических аппаратов. При этом, под *адаптивностью* в общем смысле понимается свойство системы мониторинга (контроля) приспосабливаться к изменению параметров объекта и среды функционирования. Очевидно, что АСТС работают в изменяющейся, неопределенной обстановке, поэтому свойство адаптивности должно в обязательном порядке присутствовать в моделируемой системе автоматизированного контроля (АСК) как нелинейной многосвязной системе [3].

1. Постановка задачи синтеза адаптивных АСК ТС АСТС

Стратегическая цель любой АСТС – выжить вопреки разрушающим воздействиям дестабилизирующих факторов (внутренней и внешней среды), обуславливает ее тактические цели: сохранение целостности, информированность о среде и внешняя активность по отношению к неблагоприятному воздействию окружающей среды.

АСТС является функционирующей системой только тогда, когда она физически не разрушена, технически исправна и развернута так, что работоспособна при допустимом отклонении ее параметров. Невыполнение любого из перечисленных условий прекращает существование АСТС как единого целого и приводит к потере всех остальных (дополнительных) свойств.

Парирование угроз возможно за счет повышения эффективности работы (функционирования) АСК, осуществляющей дистанционный контроль ТС АСТС различной степени автономности и базирования, который включает, своевременное формирование, обработку и передачу ИИ, с учетом ее избыточности, для принятия оперативных решений (ПОР) по поддержанию работоспособности АСТС или, например, ее резервирования.

Решение задач контроля ТС АСТС с требуемой достоверностью как единого комплекса, а не как совокупности частных параметров, с целью определения общего ТС ОК в целом, в настоящее время затруднено ввиду применения в существующих АСК либо однопараметрического допускового метода контроля, либо контроля функционального [1]. Стохастический характер дрейфа контролируемых параметров ОК и степени их корреляции (стохастической взаимосвязанности), определение степени приближения параметров к допустимым пределам (динамика отклонений) вносят определенные трудности в процесс анализа ИИ, влияющие на достоверность результатов контроля. Учет стохастической связи (корреляции) контролируемых параметров, при принятии решений о результатах контроля, необходим с точки зрения адаптации АСК к частоте выбросов (превышений допусков контролируемыми параметрами).

Затраты на поддержание требуемого состояния АСТС (на компенсацию изменений параметров, осуществляемую в процессе технического обслуживания) в настоящее время превышают в среднем в 2-3 раза затраты на их разработку и изготовление. За весь период эксплуатации затраты на ремонт и техническое обслуживание АСТС, в связи с их износом и старением, превышают стоимость новой АСТС до 12 раз [4].

Недостаточная изученность физических процессов старения и износа, несовершенство методов контроля, прогнозирования случайных процессов дрейфа параметров приводит к существенному недоиспользованию потенциальных возможностей АСТС, к которым предъявляются высокие требования по безопасности. Подобные объекты, как правило, снимаются с эксплуатации намного раньше того срока, который могло бы наработать большинство из них.

Частичная работоспособность ОК вносит неопределенность в процесс функционирования всей АСТС. В данном случае, с одной стороны, проблематично оценить для каких режимов работы ОК годен, а для каких нет, с другой сторо-

стороны, трудно спрогнозировать гарантированное изменение (тренд динамики) ТС всего наблюдаемого объекта. АСТС признанная по результатам проведения планового ТО исправной (работоспособной), допускается к дальнейшей эксплуатации, несмотря на то, что существующие системы контроля не позволяют определить граничное состояние работоспособности ОК. Этот факт обуславливает риск перехода через короткий промежуток времени одного вида ТС АСТС в другой [5].

Учет дестабилизирующих факторов в процессе контроля ТС АСТС, предполагает определенную адаптацию, гибкость АСК при передаче и обработке ИИ, подвергающейся воздействию помех (в каналах передачи), отказов и сбоев в работе аппаратуры (элементов подсистемы контроля ТС). При этом ИИ может быть искажена из-за воздействия внешней среды по отношению к системе [6-8].

Рассмотрение системы «в целом» позволяет наметить пути выявления последствий влияния различного рода дестабилизирующих факторов среды на процесс функционирования АСТС с целью определения вектора повышения эффективности (качества работы) АСК. Комплексный подход к проблеме повышения АСТС к воздействию различных факторов дает возможность не только более рационально распределить ресурсы АСК, но и решать вопросы оптимального использования параметрической, структурной, алгоритмической, информационной и другой избыточности.

Задачу синтеза нелинейных многосвязных систем, к которым относятся АСК, функционирующих в условиях неопределенности можно сформулировать как задачу поиска некоторого вектора идентификации в функции координат состояния $u = u(x)$, который обеспечивает асимптотический переход к цели контроля объекта:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, a, u), \quad (1)$$

из произвольного начального состояния $x(0)$, принадлежащего некоторой допустимой области пространства состояний Ω , в желаемое конечное $h(x)=0$ с заданными динамическими характеристиками изменения (движения). При этом параметры $a(t)$, а иногда, и структура правых частей системы (1) могут неопределенным образом изменяться в некотором ограниченном диапазоне.

Вышеперечисленные проблемы процесса контроля ТС АСТС, можно обобщить как необходимость разработки методов построения адаптивных систем контроля с учетом автоматизации процессов сбора, формирования измерительной информации и ее передачи для последующей обработки и принятия соответствующих решений, что представляет собой одно из наиболее важных направлений теории контроля.

Цель работы – синтез адаптивной АСК ТС АСТС, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, для поддержания работоспособности которых, необходим адаптивный экспресс-анализ ИИ, получаемой в процессе контроля и ее безызыбочная передача для ПОР со стороны системы управления.

Для достижения цели необходим анализ существующих адаптивных АСК и разработка новых моделей и методов, позволяющих осуществлять дистанционный контроль мно-

гопараметрических АСТС в режиме времени близком к реальному с учетом дестабилизирующих факторов.

Сокращение объема ИИ, при контроле ТС АСТС, с учетом ошибок при ее передаче, позволит сократить объем управляющей информации и, в целом, своевременно принять управляющее решение.

2. Анализ известных работ в области адаптивного контроля технического состояния сложных технических систем

Проблема синтеза адаптивных систем контроля в течение многих десятков лет является одной из самых актуальных задач. Неубывающий поток публикаций подтверждает актуальность этой проблемы и сейчас [3].

Вопросы синтеза адаптивных систем сбора, обработки и передачи ИИ освещены в работах ученых Авдеева Б.Я., Антонюка Е.М., Дядюнова А.Н., Назарова А.В., Пьявченко О.Н., Фремке А.В., Хаусли Г., Пшихопова В.Х. и других специалистов в области телеметрических систем (ТМС), а также информационно-измерительных и управляющих систем [8-11].

В работах [13, 14] представлены теоретические основы построения высокоэффективных многоканальных измерительных систем и АСК со сжатием ИИ, обеспечивающих ее обработку в реальном масштабе времени, способы (методы) повышения эффективности адаптивных систем, обеспечивающих обработку ИИ с помощью обратной связи по погрешности аппроксимации, позволяющие повысить точность системы.

Поиск путей по уменьшению избыточности ИИ, представленный в работах [15, 16], приводит к построению алгоритмов сжатия ИИ, позволяющих снизить загруженность каналов связи (КС), защитить информацию, циркулирующую в системах мониторинга и т.д. Для оперативного выделения актуальной информации предлагается уменьшать избыточность ИИ благодаря применению алгоритмов семантического сжатия, а также устройств, построенных на их основе, с учетом ситуационной обстановки, складывающейся в процессе измерения.

Проведенный анализ моделей, методов и методик синтеза нелинейных адаптивных динамических регуляторов (идентификаторов) [3, 6-8], соответствующих идеологии синергетической теории управления [17, 18], показал возможность использования в решении этой проблемы принципа расширения пространства состояний управляемой (контролируемой) системы для учета динамики внешних возмущений.

Однако, рассмотренные источники достаточно полно охватывают классическую теорию управления (контроля), но практически не затрагивают других постановок задач контроля, и почти не рассматривают интеллектуальное управление (контроль), децентрализованный/распределенный контроль, сетевое управление (контроль) и управление многоагентными и киберфизическими системами, контроль с учетом современных технологических тенденций и возможностей машинного обучения, стратегическое поведение субъектов контролируемых систем и др.

Таким образом, дальнейшего исследования требуют процессы контроля с учетом влияния дестабилизирующих фак-

факторов (как внутренних, так и внешних) на ТС контролируемых АСТС, процессы передачи ИИ в условиях помех, взаимосвязанности параметров на частоту измерений, характеристик измерительных каналов, каналов передачи ИИ на состав сенсорных подсистем АСК и др. Современные АСК должны обладать высокой информативностью и структурной гибкостью, что позволит обеспечить достаточную вероятность обслуживания АСТС и своевременную доставку телеметрической информации (ТМИ) соответствующим получателям (для ПОР и управлений) с минимальными потерями в достоверности.

3. Построение адаптивных систем дистанционного контроля АСТС на основе интеллектуальных технологий

Специфика функционирования АСТС, заключающаяся в территориальной распределенности объектов определенной степени автономности, предполагает, в качестве АСК, использование ТМС для реализации процессов контроля на этапах сбора, обработки и дистанционной передачи ТМИ на диспетчерские пункты (мониторинга телеметрии). Классификация ТМС приведена на рис. 1.

В связи с увеличением числа источников ИИ, специфичностью задач, которые ставятся при контроле ТС АСТС, и, соответственно, многообразием каналов передачи ТМИ, к ТМС предъявляются более жесткие требования. Поэтому традиционными методами не всегда удается решить задачу сбора и передачи больших потоков ТМИ с заданной достоверностью (и требуемой оперативностью) при воздействии помех в КС.

Непрерывное увеличение потоков ТМИ, связанное с избыточностью сообщений, возрастанием числа контролируемых параметров, жесткостью построения сенсорных подсистем ТМС, ограниченностью пропускной способности КС в их составе [5], приводят к необходимости либо сокращения объема данных, адаптации структуры подсистем ТМС под реальные характеристики каналов с учетом их помехоустойчивости и пропускной способности, либо комплексирования данных свойств в одной системе [19-21].

Существующие ТМС (АСК), определяемые как совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств (рис. 2), размещенные в различных точках территориально-распределенных контролируемых АСТС, с целью измерения нескольких физических величин, свойственных данным объектам, и выработки измерительных сигналов в разных целях, не обладают свойством адаптации к изменяющейся обстановке (изменению числа ОК и режимов их работы, влиянию дестабилизирующих факторов на взаимосвязанные АСК и ОК и др.).

Согласно ГОСТ Р 8.673-2009, *адаптивная измерительная система (АИС)* – измерительная система, параметры и/или алгоритмы которой в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в ней адаптивных датчиков. Изменение параметров и/или алгоритмов работы АИС в процессе эксплуатации осуществляется с целью повышения точности и/или достоверности результатов измерений.

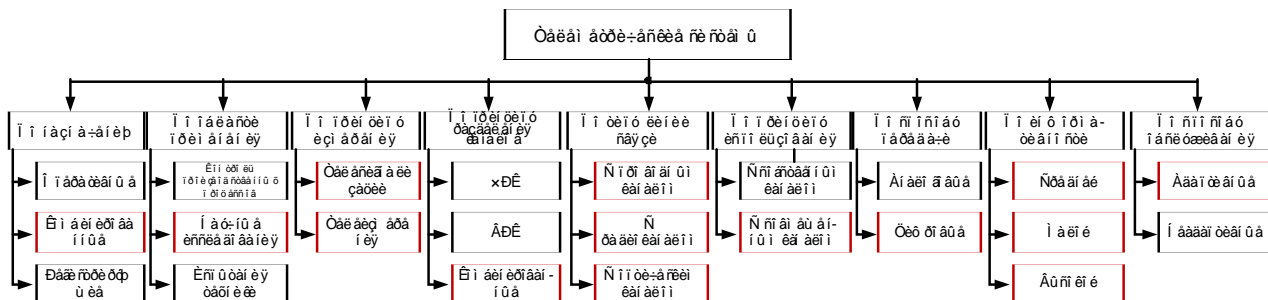
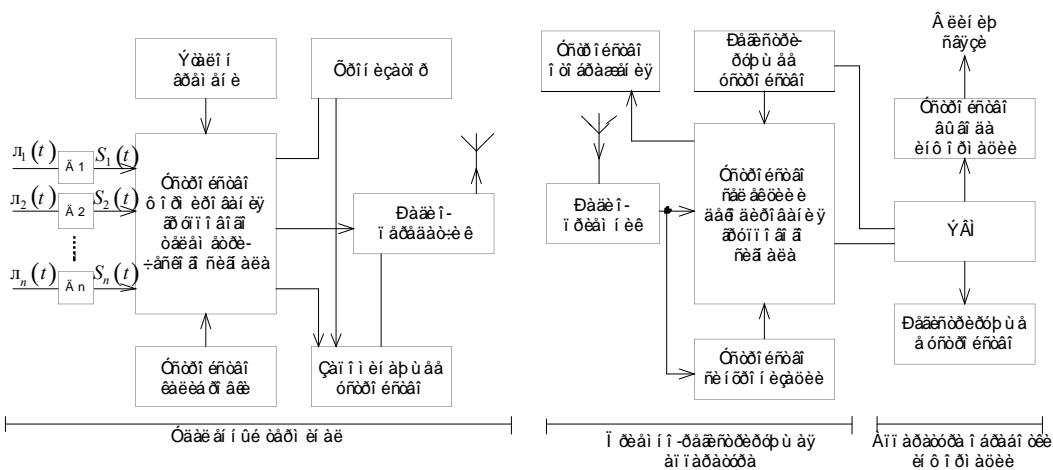


Рис. 1. Классификация телеметрических систем



АИС может обеспечивать адаптацию (приспособление) в пределах, установленных в технических условиях, к диапазону и скорости изменения значений измеряемой величины, к воздействию влияющих факторов, включая помехи, к объему выборки, к выбору маршрутов в каналах связи и т.д. При этом под адаптивным датчиком понимают первичный измерительный преобразователь (или их совокупность), параметры и/или алгоритмы работы которого могут изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей. Изменение параметров и/или алгоритмов работы датчика в процессе эксплуатации осуществляется с целью повышения точности и/или достоверности результатов измерений. Адаптивный датчик может обеспечивать адаптацию (приспособление) в пределах, установленных в технических условиях, к диапазону и скорости изменения значений измеряемой величины, к воздействию влияющих факторов, включая помехи.

В дополнение к сигналам преобразователей, содержащихся в адаптивном датчике, параметры и/или алгоритмы его работы в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от внешних сигналов (например, сигналов, поступающих с встроенного контроллера). В данном случае датчик называется адаптируемым.

Среди множества подходов к построению адаптивных систем контроля, как нелинейных многосвязных систем, в теории автоматического управления можно выделить адаптивные системы с идентификатором, которые оценивают параметры ОК и среды функционирования и не включаются непосредственно в контур управления. В представленной на рис. 2 структурной схеме ТМС, идентификатор может быть включен как в устройство формирования группового телеметрического сигнала и устройство (в системах телесигнализации (СТС)), так и в устройство селекции и декодирования группового сигнала (в системах телеизмерения (СТИ)).

Если задана структура идентификатора, то есть задан допустимый класс ТС АСТС $u(x)$, то сами процедуры оптимальной идентификации, то есть процедуры адаптации, развиты достаточно полно. В этом случае структура системы с прямой адаптацией может иметь вид, представленный на рис. 3.

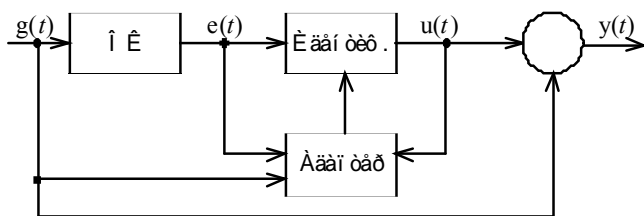


Рис. 3. Структура адаптивной системы контроля:

ИДФ – идентификатор; ОК – объект контроля; А – адаптер; $g(t)$ – сигнал «аварии»; $e(t)$ – ложный отказ (ошибка первого рода), различного рода «шум», помехи; $u(x)$ – допустимые пороговые значения контролируемых параметров, определяющие заданный класс ТС; $y(t)$ – выход системы

Очевидно, что качество адаптивной системы напрямую зависит от выбранного класса и структуры идентификатора. Если идентификатор достаточно адекватен задаче контроля

и условиям функционирования, то алгоритм адаптации обеспечит желаемое качество определения координат состояния. Однако синтез структуры идентификатора представляет собой самостоятельную сложную задачу. В настоящее время в качестве идентификаторов, в основном, выбираются линейные идентификаторы (с линейными законами), что ограничивает возможности алгоритма адаптации. При таком выборе структуры идентификатора алгоритм адаптации позволяет подобрать его параметры в соответствии с некоторым критерием оценки только лишь для узкого диапазона определения переменного состояния.

Подобный подход ограничивает возможности адаптации, так как предельные свойства замкнутой системы определяются линейными или типовыми законами идентификации, которые как известно, эффективны в локальных областях, но оказались малопродуктивными при синтезе систем контроля ТС АСТС.

Проанализируем структурные свойства адаптируемости и параметрического синтеза идентификатора.

Пусть АСТС и идентификатор АСК заданной структуры описываются во временной области.

$$\dot{x} = Ax + B_2u + B_1w, \quad x(0) = x_0 = 0, \quad (2)$$

$$y = Cx;$$

$$\dot{x}_r = A_{rm}x_r + G_1(g - y), \quad x_{rm}(0) = x_{rm0}, \quad g(0) = g_0 = 0, \quad (3)$$

$$u = C_{rm}x_r + G_2(g - y), \quad G_1 = B_r, \quad G_2 = D_r.$$

где x, x_r и y, g, u, w – векторы состояний ОК, идентификатора, выхода ОК, задания, выхода идентификатора и возмущения (дестабилизирующие факторы) соответственно, $x \in R^n$, $x_r \in R^{n_r}$, $u, y, g \in R^n$, $w \in R^{m_3}$.

Через $A, B_1, B_2, C, A_{rm}, C_{rm}, G_1, G_2$ обозначены матрицы параметров ОК и регулятора соответствующих размерностей. Предположим, что объект (1) полностью наблюдаем (контролируется все необходимые, критически важные параметры), реализации (A, B_2, C) , $(A_{rm}, G_1, C_{rm}, G_2)$ минимальны, а матрицы A, B, C принадлежат ограниченному множеству Σ . Целью идентификации является слежение за заданием для произвольных начального состояния и переменных параметров ОК, взятых из интервального множества Σ :

$$A, B_2, C \in \Sigma, \quad \left\{ \Sigma: a_{ij}^- \leq a_{ij} \leq a_{ij}^+, \quad b_{ij}^- \leq b_{ij} \leq b_{ij}^+, \quad c_{ij}^- \leq c_{ij} \leq c_{ij}^+, \right\}$$

Требуемые показатели качества регулирования основного контура задаются стационарной эталонной моделью разомкнутого контура, которая может быть описана системой уравнений

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m g, \quad x_m(0) = x_0 = 0, \quad (4)$$

$$y_m = C_m x_m,$$

где векторы состояния x_m , выхода y_m и матрицы эталонной модели разомкнутого основного контура отмечены индексом m ; $x_m \in R^{n_m}$, $y_m \in R^m$, причем $n_m = n + n_r$. Отметим, что в качестве эталонной модели можно выбрать

где через $W(j\omega)$, $W_p(j\omega)$, $W_r(j\omega)$, $W_m(j\omega)$ обозначены соответственно передаточные функции разомкнутого основного контура. Условие (5) есть условие идеального наблюдения выхода разомкнутой системы за выходом ее неявной эталонной модели. Целевому равенству (5) соответствует полиномиальное уравнение настройки идентификатора вида

$$\frac{\sum_{j=0}^{n_2-1} s^j C A_j B_2 \left(\sum_{\lambda=0}^{n_1-1} s^\lambda C_{r\lambda} A_{r\lambda} B_r + D_r \sum_{v=0}^{n_1} a_{r\lambda v} s^v I \right)}{\sum_{i=0}^{n_2} a_i s^i \sum_{v=0}^{n_1} a_{r\lambda v} s^v} = \frac{\sum_{\mu=0}^{n_m-1} s^\mu C_m A_{m\mu} B_m}{\sum_{\sigma=0}^{n_m} a_{m\sigma} s^\sigma}, \quad (6)$$

где $A_j, A_{r\lambda}, A_{m\mu}$ – матрицы Фадеева, которые представляют собой линейные комбинации произведений коэффициентов характеристических уравнений матриц на их степени [22], например

$$A_j = \sum_{q=j+1}^n a_q A^{q-j+1}, \quad q=1, 2, \dots, n, \quad a_n = 1.$$

Умножая обе части (6) на произведение характеристических полиномов, получим полиномиальное уравнение

$$(P_1 - Q_1) s^{2n_2+n_1-1} + \dots + (P_{2n_2+n_1-1} - Q_{2n_2+n_1-1}) s + (P_{2n_2+n_1} - Q_{2n_2+n_1}) = 0.$$

Определим следующие матрицы адаптируемости и функционалы настройки

$$L^T = [L_{\mu 1} \quad L_{\mu 2}], \quad Q^T = [Q_{\mu 1} \quad Q_{\mu 2}];$$

$$P_\mu = \sum_{\eta=1}^2 L_{\mu\eta} G_\eta, \quad Q_\mu = Q_{\mu 1} + Q_{\mu 2};$$

$$J_1 = \sum_{\mu=0}^{2n_2+n_1-1} \text{tr}(P_\mu - Q_\mu)^T (P_\mu - Q_\mu), \quad J_2 = \|W(j\omega) - W_m(j\omega)\|_F^2.$$

Для того чтобы минимизировать функционал J_1 , необходимо найти точное или приближенное решение эквивалентного матричного алгебраического уравнения

$$L G = Q. \quad (7)$$

Функционалы J_1, J_2 показывают меру отклонения показателей качества идентификации ТС ОК от аналогичных показателей эталонной модели. При этом нижняя граница значений функционала на множестве Σ является положительным вещественным числом, не обязательно малым. Задача адаптивного синтеза идентификатора заданной структуры сводится к следующим двум задачам.

$$G = [G_1^* \quad G_2^*] = \arg \min J_1,$$

$$G = [G_1^* \quad G_2^*] = \arg \min J_2.$$

Точное решение уравнения (7) существует только в случае выполнения условий полной адаптируемости по выходу. Однако это не всегда представляется возможным.

В связи с этим, рассмотрим альтернативное решение поставленной задачи нейросетевым методом, получившим в настоящее время широкое распространение для синтеза адаптивного контроля ТС сложных технических систем в условиях неопределенности [6, 23, 24]. Структура такой адаптивной нейросетевой системы имеет вид, показанный на рис. 4.

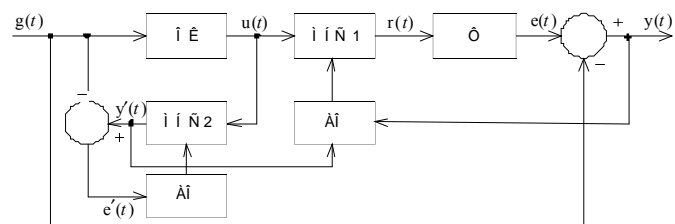


Рис. 4. Структура адаптивной системы контроля с нейросетью: Ф – фильтр; МНС1 – регулятор на многослойной нейронной сети; АО – алгоритм обучения; ОК – объект контроля; МНС2 – идентификатор на многослойной нейронной сети

Система содержит две динамически обучаемые нейросети. Сеть МНС 1 выполняет роль регулятора, а вторая – МНС 2 – идентификатора. Адаптация системы происходит благодаря универсальным свойствам нейросети, как многомерного аппроксимирующего устройства. При этом сеть МНС 2 реализует прямую аппроксимацию неопределенной модели объекта, то есть идентифицирует модель объекта в реальном времени, а МНС 1 аппроксимирует инверсную модель, то есть обеспечивает сведение ошибки контроля (ошибки 1 и 2 рода) в процессе управления к нулю.

Полученные в рамках нейросетевого подхода результаты показывают его высокую эффективность. При этом использование нейросетей для структурной и параметрической адаптации возможно и в случае значительной неопределенности моделей управляемых объектов, когда затруднено само описание процессов на языке динамики.

В моделируемой адаптивной АСК предложена структура идентификатора, в которой оперативно формируется адаптивная математическая модель, представленная на рис. 5.

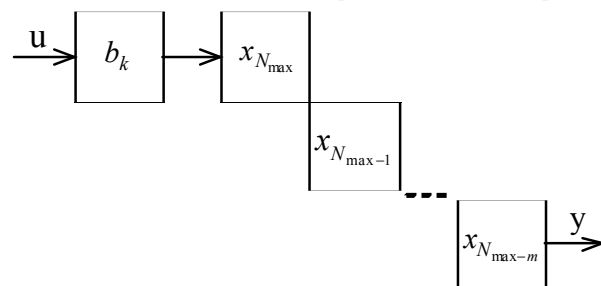


Рис. 5. Структура адаптивной модели АСК

Представленная адаптивная модель АСК является универсальной в том смысле, что может быть использована для аппроксимации любого непрерывного процесса, при этом требуется оценка только одного коэффициента или его знака. В качестве переменного состояния задаются производные от времени выходной координаты объекта.

Структура адаптивного идентификатора для такой модели имеет вид, представленный на рис. 6, и включает в себя N_{\max} цепочек, оценивающих структуру и параметры текущего состояния объекта. Каждая цепочка состоит из блока

оценивания, координат и блока экстраполяции и идентификации текущего порядка системы.

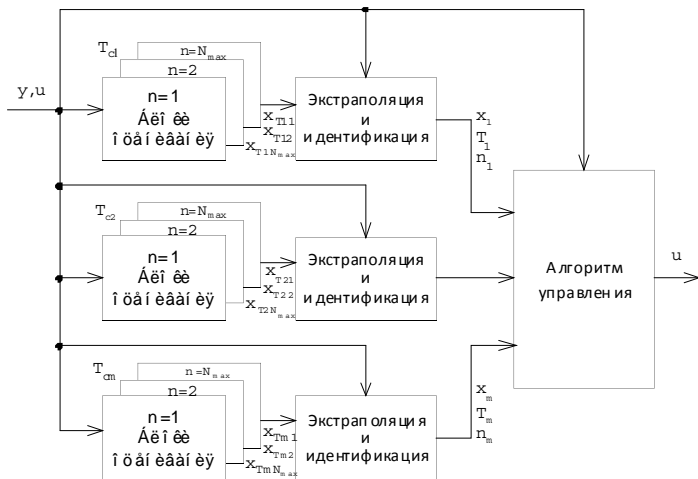


Рис. 6. Структура адаптивного идентификатора

На вход адаптивного идентификатора подаются измеряемые входные и выходные сигналы u, y . Сам идентификатор состоит из параллельно работающих цепочек с разными временами циклов $T_{c1}, T_{c2}, \dots, T_{cm}$, где m – целое постоянное число, включающих в себя блоки оценивания различных порядков $1, 2, \dots, N_{max}$. Каждый блок оценивания формирует вектор переменных состояния простой модели $x_{ij}, i = 1, m, j = 1, N_{max}$, аппроксимирующей выходной сигнал и его связи со входами. Далее, по данной модели осуществляется аппроксимация и экстраполяция оценки выходного вектора и сравнение экстраполированной выходной величины y_e с реальным сигналом y по некоторому критерию, минимум которого дает текущую оценку координат состояния объекта (АСТС) x_1, x_2, \dots, x_m .

В процессе оценивания адаптивной системой контроля ТС АСТС можно выделить следующие критерии качества: точность оценивания; скорость получения оценки; класс наблюдаемых величин; сложность алгоритма оценивания. По результатам контроля выделяют его достоверность.

Точность оценивания или наблюдения измеряемых возмущений (дестабилизирующих факторов) характеризуется различными ошибками. При оценивании постоянных величин обычно используется среднеквадратическое отклонение, а при оценивании динамических величин – интегральные критерии от среднеквадратических ошибок. Также в некоторых случаях применяются нормы максимальных ошибок. Если в системе присутствует установившийся (квазиустановившийся) режим, то может применяться среднеквадратическая ошибка в установившемся режиме.

Если удастся определить значения ошибок, то они служат численными критериями при сравнении для определения точности алгоритма оценивания. В противном случае применяются нечеткие шкалы.

Скорость получения оценки также является важнейшим фактором функционирования алгоритма оценивания. Скорость оценивания характеризуется временем переходных процессов в блоке оценивания, после чего регулярная ошибка становится достаточно малой. Требование минимизации времени

оценивания t_e обычно входит в противоречие с необходимостью минимизации случайных погрешностей. Чем выше скорость процесса оценивания, тем меньше регулярная составляющая ошибки, но больше случайные погрешности.

Класс наблюдаемых величин обычно постулируется. Например, существуют алгоритмы оценивания постоянных параметров, переменных состояний, внешних, параметрических или структурных дестабилизирующих факторов. Кроме того, можно выделить алгоритмы оценивания регулярных и случайных величин.

Сложность алгоритма напрямую влияет на стоимость и надежность реализующего его устройства. Обычно оценивается вычислительная сложность алгоритма, но простой подсчет арифметических или логических операций не всегда отражает истинную сложность алгоритма. Кроме числа операций нужно еще учитывать используемый математический базис и возможность его аппаратной реализации.

4. Характерные черты адаптивных АСК ТС АСТС

Применение интеллектуальных технологий для реализации непрерывного контроля нескольких многопараметрических АСТС влечет необходимость сокращения избыточности ТМИ, поступающей в обрабатывающий центр данных мониторинга для ПОР, что характеризует потребность в сокращении машинного времени контроля (процесса оценивания полученной с первичных преобразователей (датчиков) ИИ). Вариантами подобных решений указанной задачи могут являться реализации: а) параллельного алгоритма контроля ТС объекта; б) гибкого алгоритма контроля ТС объекта; в) принципа снижения объема контролируемых параметров, без снижения свойств достоверности, точности и др. ниже требуемых, за счет использования комплексирования методов контроля – допускового, функционального, диагностического и профилактического.

С учетом этого, дополнительными требованиями, предъявляемыми к системам автоматизированного контроля с учетом адаптации, являются [25]:

- необходимость применения в АСК (ТМС) ТС АСТС методов адаптивной профилактики, то есть профилактики по фактическому состоянию ОК, находящегося в режиме непрерывного контроля;
- обязанности проведения всех (полный контроль) или определенной части (экспресс-контроль) профилактических проверок в прогнозирующих режимах (методы экстраполяции) и установления (на этапе проектирования ОК) профилактических допусков на контролируемые параметры;
- необходимой степени автоматизации профилактических операций в целом или только операций регистрации результатов измерения параметров и сопоставления их с профилактическими допусками.

Для реализации процесса мониторинга ТС территориально-распределенных АСТС в условиях неопределенности (воздействия дестабилизирующих факторов и, как следствие, появление отказов в ОК) необходимо использование существующего технологического базиса, основанного на ряде интеллектуальных технологий [2, 23, 24, 26, 27]: *CALS*-технологии; *Web*-сервисы; *Virtualization* (виртуализация); *Mesh*-сети (ячеистая топология); *Grid Computing* (грид вычисления); *Neuro Computing* (нейрокомпьютерные вычисления); *Autonomic Computing* (автономные вычисления или

самоуправляемые системы); *Cloud Computing* (облачные вычисления); *Fog Computing* (туманные вычисления); *LXI*-технологии и др.

Проведенный анализ возможностей существующих систем и средств контроля ТС АСТС, представленного выше технологического базиса позволяют определить направления развития принципиально новых, перспективных адаптивных АСК ТС АСТС.

Отличительными особенностями (наиболее значимыми свойствами) перспективных адаптивных АСК ТС АСТС являются:

1) *Построение систем контроля на основе ТМС, интегрирующих СТС и СТИ.*

В отличие от традиционных ТМС, разделяемых по способу получения телеметрических сигналов на СТС и СТИ, предлагается следующая модель обработки сигналов тревоги, отражающая процесс интеграции существующих классов систем: сигнал тревоги формируется только в случае превышения контролируемым параметром x установленного порогового уровня $x_{г}$ (как в СТС) с последующим измерением (как в СТИ) величины выброса над порогом [28-31]. В интегрированной системе случайными величинами являются моменты t_i формирования сигналов тревоги и уровни u_i данных сигналов. Такой подход предполагает двухэтапность процесса адаптивного контроля, на первом этапе которого выполняется экспресс-контроль (оценка ограниченного числа наиболее критичных параметров), а на втором – полный контроль (оценка полного перечня параметров, подлежащих проверке).

2) *Контроль многопараметрических АСТС, наблюдаемые параметры которых имеют стохастическую взаимосвязь.*

Большинство существующих систем контроля ТС АСТС характеризуются либо методами однопараметрического допускового контроля, что не позволяет объективно определить общее ТС объекта в целом, либо – функционального контроля, что заметно снижает достоверность контроля.

При построении адаптивных систем контроля необходимо рассматривать многопараметрическую область работоспособности ОК (эллипсоидальная аппроксимация), учитывающую фактор наличия стохастической связи контролируемых параметров с учетом их критичности (приоритетности аварийных сигналов) для последующего анализа, оценивания [32-40].

3) *Адаптируемость частоты измерений относительно наблюдаемых отклонений контролируемых параметров.*

Определение допусковых областей на группу параметров АСТС позволяет учитывать их корреляцию. С увеличением частоты взаимной коррекции допусков происходит увеличение частоты «выбросов», и наоборот – с увеличением числа (частоты) выбросов возникает необходимость адаптации допусков. Таким образом, динамика изменений допусков, с учетом взаимосвязанности значений контролируемых параметров, представляет собой адаптацию пороговых значений по эллипсу. Это позволяет прогнозировать нахождение параметров ОК в заданных допусках в течение требуемого интервала времени, приводит к повышению достоверности результатов контроля и, в целом, способствует более эффективной работе АСК [41, 42].

4) *Проведение постоянного метрологического самоконтроля в процессе функционирования адаптивных АСК.*

Комплексное оценивание результатов измерений должно проводиться, и в отношении отказов ОК, и в отношении метрологических отказов самих преобразователей (датчиков). Целями метрологического самоконтроля интеллектуальных датчиков и интеллектуальных измерительных систем, встраиваемых в АСТС, являются повышение надежности АСК и достоверности результатов контроля для обеспечения технологических процессов и управления ими.

5) *Комплексное применение каналов связи в сочетании с адаптивностью к внешним воздействиям на линию связи в процессе передачи ТМИ.*

Совместное использование специализированных радиолиний различных родов связи позволит обеспечить устойчивое доведение (передачу) ТМИ от АСТС до ПУ, что достигается на основе модели радиомониторинга [42]. Такой подход позволяет провести оценку комплексного использования разнородных КС для контроля ТС АСТС при глобальных удалениях от ПУ на основе формирования структуры единой системы радиомониторинга с применением интеллектуальных технологий. В данном случае к ним относят: принципы когнитивного радио (программируемого радио с элементами когнитивных радиосистем), искусственного интеллекта и нейробионики, при обработке принимаемой ТМИ в ходе интенсивного информационного взаимодействия на основе общих баз данных распределенных систем [44-47].

С учетом рассмотренных особенностей, к основным методам адаптации АСК ТС АСТС следует отнести:

- 1) методы адаптации структуры вычислительной системы;
- 2) изменение логических функций адаптируемых элементов;
- 3) адаптивно настраиваемые и перестраиваемые логические модули;
- 4) адаптивное перераспределение программ между процессорами;
- 5) адаптивные алгоритмы балансировки нагрузки (диспетчеризации);
- 6) адаптивная коммутация (перераспределение каналов) при изменении потоков;
- 7) адаптивные алгоритмы (протоколы) маршрутизации пакетов и контроля перегрузок;
- 8) адаптивное управление настройками параметров сетевых протоколов и устройств.

Заключение

Повышение степени автоматизации систем контроля с учетом подстройки к изменению параметров объекта и среды функционирования АСТС, характеризуются резко изменяющейся, неопределенной обстановкой, что, в целом, должно стать основой синтеза универсальных адаптивных АСК. Появление адаптивных АСК знаменуют новый этап в автоматизации и интенсификации контроля функционирования сложных технических объектов – интеллектуализации, основанной на применении новых наукоемких технологий. При этом отличительными чертами данного этапа станут переход от допускового, функционального или диагностического контроля к комплексному контролю, функционирующего по адаптивному алгоритму. Адаптивные АСК, помимо обычных задач снабжения органов управления необходимой ИИ для ПОР, смогут выполнять саморегулировку объема дополнительных данных за счет комбинации структурной, временной и функциональной избыточности.

Литература

1. Винограденко А.М., Меженев А.В., Будко Н.П. К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 6. С. 30-44. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10293.
2. Локутов А.И., Козырев Г.И., Клыков В.А., Шестопалова О.Л. Синтез адаптивных математических моделей бортовых РЭС КА на основе применения гомологических математических структур // Математическое моделирование и прикладная математика. Труды СПИИРАН, 2018, С. 169-194. DOI 10.15622/sp.56.8
3. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Оценка и управление в сложных динамических системах. Монография. М.: Физматлит, 2009. 295 с.
4. Абрамов О.В. Функционально-параметрическое направление теории рисков: возможности и перспективы // Вестник ДВО РАН: «Информатика и управление в технических системах». 2016. № 4. С. 96-101.
5. Винограденко А.М., Будко П.А., Юров А.С., Литвинов А.И. Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // Датчики и системы. 2014. № 9 (184). С. 8-14.
6. Перельман И.И. Анализ современных методов адаптивного управления с позиций приложения автоматизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 3-32.
7. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивные системы управления: проблемы и тенденции // Сб. трудов Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии». СПб. 2003. Т. 1. С. 146-154.
8. Astrom K., Kumar P. Control: a Perspective // Automatica. 2014. № 50. С. 3-43.
9. Albertos P., Mareels I. Feedback and Control for Everyone. Berlin: Springer. 2010. 318 p.
10. Astrom K., Murray R. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. Princeton University Press. 2012. 408 p.
11. Buhnicki Z. Modern control theory. Berlin. Springer. 2005. 423 p.
12. Baillieul J., Samad T. Encyclopedia of systems and control. London. Springer. 2015. 1554 p.
13. Антоноук Е.М. Адаптивные телеизмерительные системы / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антоноук, С.Н. Долинов, Л.Г. Журавин, Е.И. Семенов, А.В. Фремке; под ред. Фремке. Л.: Энергоиздат. 1981. 291 с.
14. Антоноук Е.М. Адаптивный коммутатор с параллельным анализом погрешности аппроксимации // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 76-79.
15. Бурый А.С., Лобан А.В., Ловцов Д.А. Модели сжатия массивов измерительной информации в автоматизированной системе управления // Автоматика и телемеханика. 1998. № 5. С. 3-26.
16. Ловцов Д.А., Лобан А.В. Новая эффективная технология распределенной переработки измерительной информации в АСУ космическими аппаратами // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 4 (25). С. 81-88.
17. Пилюхов В.А. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. 183 с.
18. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления: синергетический подход в теории управления. Под ред. Колесникова М.: ФЦ «Интеграция». Таганрог: ТРТУ. Ч. 2. 2000. 400 с.
19. Федоренко В.В., Рачков В.Е., Винограденко А.М. Адаптивная радиолиния передачи дискретной информации // Патент на изобретение RU 2425444, опублик. 23.11.2009.
20. Будко П.А., Жуков Г.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 1. С. 18-41.
21. Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Емельянов А.В., Жолдасова А.Е., Жуков Г.А., Зубарев П.К., Катанович А.А., Кулешов И.А., Лисицын Ю.Д., Литвинов А.И., Мирошников В.И., Николашин Ю.Л., Салюк Д.В., Фатюхин И.Н. Способ и устройство управления робототехническим комплексом морского базирования // Патент на изобретение RU 2614864, опублик. 05.02.2016.
22. Ядыкин И.Б. Оптимальный адаптивный синтез регуляторов заданной структуры // Автоматика и телемеханика. 2011. № 5. С. 161-174.
23. Шанин Д.А., Пилюхов В.Х., Медведев В.Ю. Построение нейросетевых регуляторов для синтеза адаптивных систем управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 3. Т. 6. С. 48-52.
24. Пилюхов В.Х., Сиротенко М.Ю. Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автомобильным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемещений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». Таганрог: Издательство ТРТУ. 2004. № 3. С. 185-191.
25. Будко П.А., Чихачев А.В., Баранов М.А., Винограденко А.М. Принципы организации и планирования сильно связанной телекоммуникационной среды сил специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникация и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 8-12.
26. Еришов А.В., Винограденко А.М. Модель мониторинга технического состояния распределенных объектов контроля, учитывающая влияние случайных отказов в процессе контроля с использованием интерактивных мультисенсорных технологий // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019613476, опублик. 17.01.2019.
27. Еришов А.В., Винограденко А.М. Модель визуализации телеметрической информации на пульте дистанционного управления с использованием мультисенсорных технологий // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019611661, опублик. 31.01.2019.
28. Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V. The time probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS. 2017. V 2. 2017. P. 146-149.
29. Винограденко А.М., Веселовский А.П., Бурьянов О.Н. Оперативный контроль технического состояния электротехнических объектов / в сборнике: Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. III Всероссийская научно-практическая конференция. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. С.-Петербург. 2016. С. 178-184.
30. Винограденко А.М., Федоренко И.В., Семенов А.В. Система для контроля технического состояния радиоэлектронных объектов // Патент на полезную модель RU 90916, опублик. 05.08.2009.
31. Винограденко А.М., Федоренко И.В. Система для контроля параметров технологических объектов // Патент на полезную модель RU 96676, опублик. 09.03.2010.
32. Будко П.А., Будко Н.П., Литвинов А.И., Винограденко А.М. Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8 (162). С. 37-44.
33. Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К., Тимошенко Л.И. Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования на основе комплексирования показаний нескольких типов датчиков // Датчики и системы. 2018. № 3 (223). С. 3-11.
34. Будко П.А., Жуков Г.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К. Определение аварийного состояния морского робототехнического комплекса по многоэтапной процедуре контроля на основе использования вейвлет-преобразований // Морская радиоэлектроника. 2016. № 4 (58). С. 20-23.
35. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. М.: Наука. 1979. 432 с.
36. Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Способ и устройство автоматического контроля технического состояния электрооборудования // Патент на изобретение RU 2548602, опублик. 19.02.2014.
37. Винограденко А.М. Эллипсоидальная аппроксимация областей параметрической неопределенности технического состояния РТК // Робото-техника и техническая кибернетика. 2018. № 3 (20). С. 53-60.
38. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 2003. 656 с.
39. Abramov O.V. Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. Automation and Remote Control. 2016. Vol.77. No. 4. pp. 594-603.
40. Abramov O.V., Nazarov D.A. Condition-based maintenance by minimax criteria. Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability. 2016. pp. 91-94.
41. Будко П.А., Винограденко А.М., Веселовский А.П. Адаптация допусков контролируемых параметров РЭС // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды IV межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 141-146.
42. Винограденко А.М., Пасхальный А.В. Эллипсоидальная адаптация области допусков многопараметрических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 118-129.
43. Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Реконфигурация каналов связи при управлении смешанными группировками робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 2 (187). С. 266-278.
44. Винограденко А.М., Федоренко И.В., Гальвас А.В. Многофазная организация обслуживания в информационно-телеметрических системах // Информационные системы и технологии. 2010. № 3 (59). С. 121-125.
45. Будко Н.П., Будко П.А., Винограденко А.М., Дорошенко Г.П., Рожнов А.В., Минеев В.В., Мухин А.В. Способ распределенного контроля и

ADAPTIVE CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF AUTONOMOUS COMPLEX TECHNICAL OBJECTS ON THE BASIS OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES

Aleksey M. Vinogradenko, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, vinogradenko.a@inbox.ru

Nikita P. Budko, Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia, budko62@mail.ru

Abstract

The article is devoted to the study of processes of adaptive monitoring of technical condition of autonomous complex technical objects characterized by high cost of failure. The relevance of this direction of research is shown. The purpose of the work is to synthesize an adaptive automated system for monitoring the technical condition of autonomous complex technical objects operating under the influence of destabilizing factors, in order to maintain the operability of which, an adaptive rapid analysis of measurement information obtained during the monitoring process is required and its free transmission is required for making operational decisions by the control system. An approach to the construction of adaptive systems for monitoring the technical condition of autonomous geographically distributed objects on the basis of telemetry systems operating in express control and full control modes is presented. An example of the construction, structure of the measurement information evaluation subsystem and identification of state classes of control objects in adaptive automated control systems based on the emergency identifier is given. Characteristics of adaptive automated systems for monitoring the technical condition of autonomous geographically distributed complex technical facilities have been defined. Among the features of promising adaptive control systems for such objects are: Two-stage control process (reduction of measurement information redundancy), consideration of stochastic interdependence of controlled parameters of objects, adaptability of measurement frequency relative to observed deviations of parameters, continuous metrological self-control during operation of adaptive automated control systems, complex application of heterogeneous communication channels in combination with adaptability to external effects on the communication line during transmission of telemetry information. The main methods of adaptation of automated systems of monitoring of technical condition of autonomous complex technical objects are presented.

Keywords: autonomous complex technical objects, measuring information, adaptability, automated control systems, technical condition, identification, evaluation.

References

1. Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Budko N.P. (2019). To the question of substantiation of the conceptual apparatus nondestructive express control of technical condition equipment of communication system and aerodrome radio engineering support. *H&ES Research*. Vol. 11. No. 6. 2019. Pp. 30-44. DOI 10.24411/2409-5419-2018-10293. (in Russian)
2. Loskutov A., Kozyrev G., Klyikov V., Shestopalova O. (2018). Synthesis of adaptive mathematical models of on-board spacecraft avionics based on application of homological mathematical structures. *Mathematical modeling and applied mathematics*, pp. 169-194. DOI 10.15622/sp.56.8. (in Russian)
3. Pshihopov V., Medvedev M. (2009). Evaluating and managing complex dynamic systems. Moscow: Fizmatlit, pp. 295. (in Russian)
4. Abramov O. (2016). Functional-parametric direction of risk theory: opportunities and perspectives. *Informatics and management in technical systems*. No. 4, pp. 96-101. (in Russian)
5. Vinogradenko A., Budko P., Yurov A., Litvinov A. (2014). Monitoring method of pre-accident state of monitored objects. *Sensors and systems*. No. 9 (184), pp. 8-14. (in Russian)
6. Perel'man I. (1991). Analysis of modern adaptive control methods from the point of view of process automation application. *Automation and remote control*. No. 7, pp. 3-32. (in Russian)
7. Terehov V., Tyukin I. (2003). Adaptive management systems: challenges and trends. *Management and information technology*. Vol. 1, pp. 146-154. (in Russian)
8. Astrom K., Kumar P. (2014). Control: a Perspective. *Automatica*. No. 50, pp. 3-43. (in Russian)
9. Albertos P., Mareels I. (2010). *Feedback and Control for Everyone*. Berlin: Springer. 318 p.
10. Astrom K., Murray R. (2012). *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press. 408 p.
11. Bubnicki Z. (2005). *Modern control theory*. Berlin: Springer. 423 p.
12. Baillieul J., Samad T. (2015). *Encyclopedia of systems and control*. London: Springer. 1554 p.
13. Antonyuk E. (1981). Adaptive telemetering systems. Moscow: Energoizdat. 291 p. (in Russian)
14. Antonyuk E. (2015). Adaptive switch with parallel approximation error analysis. *News of St.Petersburg State University*. No. 8, pp. 76-79. (in Russian)
15. Buriy A., Loban A., Lovtsov D. (1998). Models of measurement data array compression in automated control system. *Automation and remote control*. No. 5, pp. 3-26. (in Russian)
16. Lovtsov D., Loban A. (2014). New efficient technology of distributed processing of measuring information in ACS by spacecraft. *Bulletin of NGO S. Lavochkina*. No. 4 (25), pp. 81-88. (in Russian)
17. Pshihopov V. (2009). *Position-path control of mobile objects*. SFU. 183 p. (in Russian)
18. Kolesnikov A. (2000). Modern applied management theory: a synergistic approach in management theory. *Integration*. Vol. 2. 400 p. (in Russian)
19. Fedorenko V., Rachkov V., Vinogradenko A. Adaptive radio link of discrete information transmission. Patent Russia no. 2425444, 23.11.2009. (in Russian)
20. Budko P., Zhukov G., Vinogradenko A., Litvinov A. (2017). Complex use of heterogeneous communication channels for the management of robotic complexes on the basis of a single radio monitoring system. *H&ES Research*. Vol. 9. No. 1, pp. 18-41. (in Russian)

21. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Emel'yanov A., Zholdasova A. Method and control device of marine-based robotic complex. Patent Russia no. 2614864, 05.02.2016. (in Russian)
22. Yadyikin I. (2011). Optimal adaptive synthesis of regulators of a given structure. *Automation and remote control*. No. 5, pp. 161-174. (in Russian)
23. Shanin D., Pshihopov V., Medvedev V. (2008). Building neural network regulators to synthesize adaptive control systems. *Information-measuring and control systems*. No 3. Vol. 6, pp. 48-52. (in Russian)
24. Pshihopov V., Syrotenko M. (2004). Structural-algorithm implementation of automotive mobile robot control system with neural network movement scheduler. *TRTU News*. No 3, pp. 185-191. (in Russian)
25. Budko P., Chihachev A., Barinov M., Vinogradenko A. (2013). Principles of organization and planning of strong telecommunication environment of special forces. *T-Comm*. Vol. 7. No. 6, pp. 8-12. (in Russian)
26. Ershov A., Vinogradenko A. Model for monitoring the technical condition of distributed control objects, taking into account the impact of accidental failures in the control process using interactive multi-sensor technologies. Computer program registration certificate Russia no. 2019613476, 17.01.2019. (in Russian)
27. Ershov A., Vinogradenko A. Model for monitoring the technical condition of distributed control objects, taking into account the impact of accidental failures in the control process, using interactive multi-sensor technologies. Computer program registration certificate Russia no. 2019613476, 17.01.2019. (in Russian)
28. Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Vinogradenko A.M., Samoilenko V.V., Samoilenko I.V. (2017). The time probability characteristics of a telemetry signal with the variable number of bits. *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, "CTS-2017"*. Vol 2, pp. 146-149. (in Russian)
29. Vinogradenko A., Veselovskiy A., Bur'yanov O. (2016). Operational monitoring of technical condition of electrical objects. *Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment*, pp. 178-184. (in Russian)
30. Vinogradenko A., Fedorenko I., Sememenko A. System for monitoring of technical condition of radio-electronic objects. Patent Russia no. 90916, опубл. 05.08.2009. (in Russian)
31. Vinogradenko A., Fedorenko I. System for monitoring of process objects parameters. Patent Russia no. 96676, 09.03.2010. (in Russian)]
32. Budko P., Budko N., Litvinov A., Vinogradenko A. (2014). Implementation of kinetic method of control and diagnostics of hardware. *Mechatronics, automation, management*. No. 8 (162), pp. 37-44. (in Russian)
33. Budko P., Vinogradenko A., Goydenko V., Timoshenko L. Method of multidimensional statistical control of technical condition of the radio-electronic equipment on the basis of the integration of indications of several types of sensors. *Sensors & systems*. No. 3 (223), pp. 3-11. (in Russian)
34. Budko P., Zhukov G., Vinogradenko A., Goydenko V. (2016). Determination of the emergency state of the marine robotics complex by a multi-stage control procedure based on the use of waket transformations. *Sea radio electronics*. No. 4 (58), pp. 20-23. (in Russian)
35. Evlanov L. (1979). *Control of dynamic systems*. Science. 432 p. (in Russian)
36. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Litvinov A. Method and device for automatic control of technical condition of electrical equipment. Patent Russia no. 2548602, 19.02.2014. (in Russian)
37. Vinogradenko A. (2018). Ellipsoidal approximation of parametric uncertainty of technical condition of robotic systems. *Robotics and technical cybernetics*. No. 3 (20), pp. 53-60. (in Russian)
38. Klyuev V, Sosnyn F., Kovalyov A. (2003). Nondestructive testing and diagnosis. *Mechanical engineering*. 656 p. (in Russian)
39. Abramov O. (2016). Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems. *Automation and Remote Control*. Vol.77. No. 4, pp. 594-603. (in Russian)
40. Abramov O., Nazarov D. (2016). Condition-based maintenance by minimax criteria. *Applied Mathematics in Engineering and Reliability. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability*, pp. 91-94. (in Russian)
41. Budko P., Vinogradenko A., Veselovskiy A. (2019). Adaptation of tolerances of controlled parameters of avionics system. *Proceedings of the 4th International Conference on Problems of technical support of troops in modern conditions*, pp. 141-146. (in Russian)
42. Vinogradenko A., Pashal'niy A. (2019). Ellipsoidal adaptation of the tolerance area of multi-variable systems. *News of SFU*. No. 1 (203), pp. 118-129. (in Russian)
43. Budko P., Vinogradenko A., Litvinov A. (2017). Reconfiguration of communication channels during control of mixed groups of robotic complexes. *News of SFU*. No. 2 (187), pp. 266-278. (in Russian)
44. Vinogradenko A., Fedorenko I., Gal'vas A. (2010). Multiphase maintenance in telemetry systems. *Information systems and technologies*. No. 3 (59), pp. 121-125. (in Russian)
45. Budko P., Budko N., Vinogradenko A., Doroshenko G. Method of distributed control and adaptive control of multilevel system and device for its implementation. Patent Russia no. 2450335, 11.07.2011. (in Russian)
46. Budko P., Bur'yanov O., Vinogradenko A., Veselovskiy A. (2017). Model of automated system of monitoring of technical condition of ground robotics systems. *Proceedings of the 2st International Conference on Problems of technical support of troops in modern conditions*, pp. 145-149. (in Russian)
47. Budko P., Fedorenko V., Vinogradenko A., Kuzhnetsov S. Method of multilevel complex control of technical condition of radio-electronic systems. Patent Russia no. 2694158, 01.11.2018. (in Russian)

Information about authors:

Aleksey M. Vinogradenko, PhD, Docent, Doctoral Candidate Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia

Nikita P. Budko, Applicant at the Department of Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St-Peterburg, Russia

ДОРОЖНЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ – ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-36-41

Поляков Александр Сергеевич,

Научно-исследовательский и проектный институт городского транспорта города Москвы (ГБУ "МосТрансПроект"),
Москва, Россия, mgtniip@mgtniip.ru

Трескинский Денис Вячеславович,

ООО "Институт городского транспорта", Москва, Россия,
denisvtreskinsky@gmail.com

Ключевые слова: дорожный контроллер, светофорный контроллер, функциональная схема, конструктивное исполнение, действующие государственные стандарты.

За последние 50 лет отечественной промышленностью выпущено несколько поколений дорожных контроллеров, которые составляют основу управления дорожным движением на улично-дорожной сети в Российской Федерации. Широко применяются микропроцессорные технологии. Большинство светофорных объектов включается в состав автоматизированных систем управления дорожным движением, а в последнее время – в интеллектуальные транспортные системы. При этом конструктивное исполнение осталось практически неизменным. По-прежнему необходимы отдельно стоящие вандалоустойчивые металлические шкафы на самостоятельных фундаментах. Переключение сигналов светофоров производится коммутацией силового электропитания. Подключение к контроллерам новых устройств (детекторов транспорта, видеокамер, линий связи и пр.) каждый раз требует разработки нового интерфейса. На основе классификации дорожных контроллеров по периодам развития и анализа их функций предлагается структура и конструктивное исполнение контроллеров 4 поколения. Предполагается, что концепция "умных светофоров" со встроенными ксветодиодными элементами позволит избавиться от необходимости самостоятельных конструктивных элементов в виде металлических шкафов при одновременном расширении функциональных возможностей. Выработаны предложения по внесению изменений и дополнений в действующие стандарты.

Информация об авторах:

Поляков Александр Сергеевич, к.т.н., директор научно-исследовательского и проектного института городского транспорта города Москвы (ГБУ "МосТрансПроект"), Москва, Россия

Трескинский Денис Вячеславович, ООО "Институт городского транспорта", генеральный директор, Москва, Россия

Для цитирования:

Поляков А.С., Трескинский Д.В. Дорожные контроллеры - прошлое, настоящее, будущее // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 36-41.

For citation:

Polyakov A.S., Truscinski D.V. (2020) Road controllers - past, nowadays, future. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 36-41. (in Russian)

Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 года предусматривается, в частности, разработка и реализация мероприятий в рамках национального проекта "Безопасные и качественные дороги". К числу целевых показателей проекта отнесено снижение в 3.5 раза числа погибших в дорожно-транспортных происшествиях (до 4 на каждые 100 тыс. человек населения), а к 2030 году – стремление к нулевому уровню смертности.

При сохранении существующей динамики сокращения достичь поставленных целей не удастся и решение задачи потребует применения новых подходов к повышению безопасности дорожного движения, активизации усилий всех заинтересованных органов власти. К числу таких подходов следует отнести развитие и внедрение инновационных технологий в транспортную инфраструктуру России – прежде всего изложенных в концепциях "умная дорога", "умный город", "интеллектуальная транспортная система", "технологии спутниковой навигации ГЛОНАСС" и др. [2, 3].

Технические решения в соответствии с данными концепциями позволяют не только повысить безопасности на дорогах. Они дают возможность интеллектуально управлять транспортными потоками, улучшить качество обслуживания водителей и собирать необходимые данные для дальнейшего развития дорожно-транспортной инфраструктуры.

В то же время затраты на создание таких систем весьма значительны и необходим тщательный анализ всевозможных вариантов технической реализации интеллектуальных компонент дорожно-транспортной инфраструктуры.

К числу возможных методологических подходов к такому анализу следует отнести и изучение истории развития применяемых технических решений. Изучение истории развития техники дает возможность проследить закономерности технического развития, устанавливать связь между техникой, наукой и другими областями человеческой деятельности. Для инженерного и технического творчества фактологический материал по истории развития того или иного направления, изучение эволюции техники позволяет выработать подходы к формированию технических решений для новых поколений.

Подобного типа аналитические исследования в последнее время начали проводиться и в сфере организации и безопасности дорожного движения. В качестве примера можно привести любопытный анализ, проведенный А.А. Сушко [1], который количественные данные о числе применяемых дорожных знаков рассматривает как индикатор смены парадигм в организации дорожного движения. Прослеживание таких тенденций может привести, по нашему мнению, действительно к глобальному изменению взглядов на возможности регулирования и управления дорожным движением.

В рамках настоящей статьи предпринята попытка проследить эволюцию одной из компонент технических средств организации дорожного движения – дорожного светофора и, прежде всего – дорожного контроллера.

В соответствии с "ОДМ 218.6.003-2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах" будем использовать следующие термины:

"контроллер дорожный – устройство для управления дорожным движением путем переключения сигналов светофоров и многопозиционных дорожных знаков, как на локальных пересечения автомобильных дорог, так и входящих в систему координированного управления дорожным движением;

светофор дорожный – светосигнальное устройство, применяемое для регулирования очередности пропуска транспортных средств и пешеходов, а также для обозначения опасных участков дорог;

светофорный объект – группа светофоров, установленных на участке дорожной сети, очередность движения по которому конфликтующих транспортных потоков или транспортных и пешеходных потоков регулируется светофорной сигнализацией".

Первый электрический светофор с ручным управлением в США был установлен в Кливленде (США) в 1914 г. Роль дорожного контроллера выполнял регулировщик. Уже через 10-15 лет была реализована концепция автоматического контроллера. Выходными параметрами для дорожного контроллера является уровень напряжения на соответствующей силовой цепи, отвечающей за включение определенного сигнала светофора. В части результирующего выходного сигнала контроллер можно представить как реле, включающее или выключающее определенную лампу (группу ламп).

В дальнейшем дорожные контроллеры были объединены в автоматизированные системы, которые управляли переключением сигналов светофора по планам координации, которые рассчитывались на основании данных о транспортных потоках. План координации под названием «зеленая волна» широко используется на слабо загруженных дорожных сетях и в настоящее время.

В СССР разработки систем координированного управления дорожным движением начались в 60-х годах. Освоенные в производстве контроллеры достаточно четко можно подразделить на три поколения.

Контроллеры **первого поколения** производились примерно до 1980 г. К числу контроллеров первого поколения относятся серии УК (УК-1, УК1-У1 УК-2), пешеходные вызывные устройства (ПВУ-2М и УВУ-2М). Контроллеры данного типа исполнялись в виде навесного металлического шкафа антивандального типа.

С точки зрения состава электронной базы они функционировали на дискретных элементах. Алгоритмы управления светофорной сигнализацией были узко специализированы. Количество переключаемых фаз не превышало трех и их длительность не могла корректироваться в соответствии с изменениями дорожных условий. Длительность промежуточного такта также не могла изменяться. Возможность ручного переключения фаз с пульта оператора отсутствовала. По мере усложнения структуры улично-дорожных сетей и роста интенсивности движения такие контроллеры не могли обеспечить необходимого уровня и качества управления.

В качестве элементной базы использовались не отдельные дискретные элементы, а интегральные схемы средней степени интеграции.

Агрегатная система кардинально изменила возможности гибкого управления. Число фаз регулирования увеличилось до 8, что сделало возможным управлять движением по отдельным направлениям. В числе типовых элементов имелись блоки для подключения детекторов транспорта и реализации адаптивных алгоритмов на основе методов поиска разрывов в транспортном потоке. Важным свойством явились функции вызова фазы пешеходами и ручное управление. Унифицировано было и конструктивное исполнение, что сделало возможным модифицировать функции контроллера путем лишь замены соответствующих блоков. В контроллеры были встроены блоки самодиагностики некоторых функций.

Обобщенная функциональная схема дорожного контроллера представлена на рис. 1.

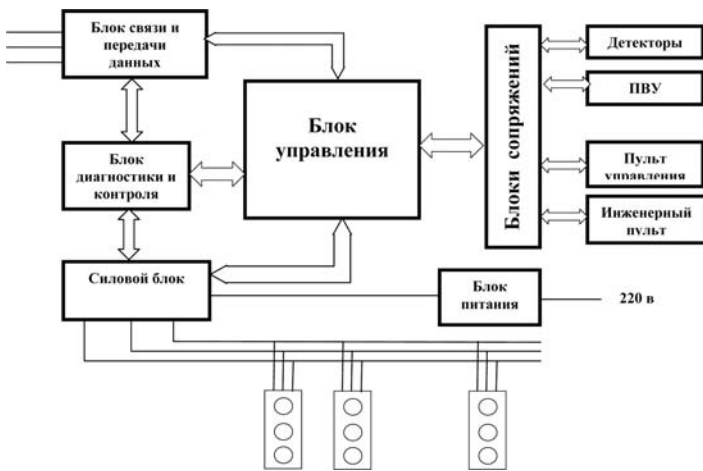


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема дорожного контроллера

В составе контроллеров второго поколения наиболее массово выпускались и применялись на практике ДКМ 2С-4, ДКМ 5-4, ДКМ 5-8, ДКМ 6-4, ДКМ 6-8.

Общий вид дорожного контроллера 2-го поколения представлен на рис. 2 (<https://www.dosaaf-khab.ru/by1-sozdan-svetofor-kak-ustroen-sovremennyi-svetofor-blok.html>).

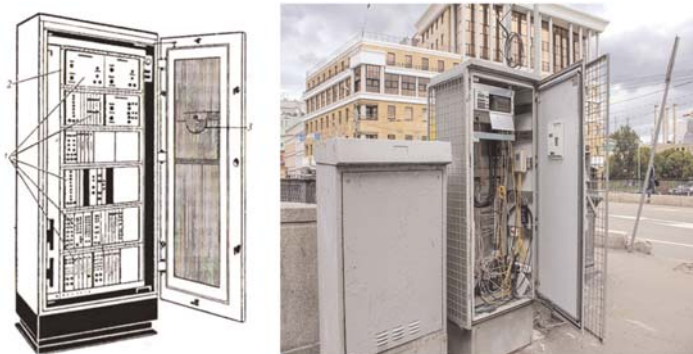


Рис. 2. Общий вид дорожного контроллера 2-го поколения

С 1985 г. начато производство контроллеров 3-го поколения с использованием микропроцессорной техники.

Необходимость наращивания вычислительных мощностей на дорожном контроллере была связана с реализацией адаптивных режимов работы на локальном объекте (а в последствии и на сети), что привело к попыткам создания вычислительных кластеров на базе дорожных контроллеров, производящих расчеты длительности цикла в реальном масштабе времени в зависимости от показаний детекторов транспорта.

Контроллеры разработаны на современных технических средствах. Обеспечивается сокращение времени обслуживания, ремонта и профилактики. Практически все контроллеры реализованы программными средствами. Рассчитанные планы координации переносятся и загружаются в контроллер дистанционно или с переносных средств вычислительной техники. Неразрушающаяся память контроллера сохраняет введенные данные в широком диапазоне условий эксплуатации. Имеется возможность оперативного изменения длительности тактов регулирования и отдельных фаз (до 12) в зависимости от времени суток с учетом рабочих и выходных (до 8), количество подключенных светофоров и направлений движения.

В настоящее время продолжается производство контроллеров 3 поколения типа ДКС, ДКМ, ДКМП и др. Нарастают их функции – прежде всего в части подключения детекторов разного типа и светодиодных светофоров. При этом сохраняется совместимость и возможность их сопряжения с системами 2 поколения. Конструктивно контроллеры 3 поколения размещают в тех же металлических шкафах и тех же размеров, что и контроллеры 2 поколения.

Таким образом, сегодня существует три поколения систем автоматизации и все три успешно используются по 30 лет и более. Новые задачи управления дорожным движением диктуют активное развитие интеллектуальных транспортных систем и формирование, в том числе, нового облика функциональных возможностей и конструктивного исполнения дорожных контроллеров.

Несмотря на смену аппаратной базы и системных элементов, функционально контроллеры второго и третьего поколения имеют много схожего и не генерируют новые возможности для интеллектуальных транспортных систем. Несмотря на гигантские скачки в развитии микропроцессорной техники и средств передачи данных вопросы создания дорожных контроллеров следующего поколения до сих пор не проработаны даже в концептуальном аспекте.

Контроллеры четвертого поколения реализуются пока только фрагментарно: одна компания производит одну позицию, вторая – другую и так по кругу. Никто в мире ещё не дошёл до выпуска данного оборудования в полном объёме. Давно пора сформулировать требования и пожелания к системам будущего как на уровне сегодняшних возможностей, так и с возможными прогнозами развития науки и техники.

Ретроспективный анализ развития дорожных контроллеров позволяет, на наш взгляд, сформулировать самые существенные требования к продуктам четвертого поколения.

Прежде всего – габариты. Наличие громоздких шкафов, необходимость их исполнения в антикоррозийном и вандалоустойчивом исполнении для различных климатических условий заметно увеличивает их стоимость. Такие конструктивные самым существенным образом влияют на эксплуатацию

эксплуатационные затраты – необходимы выделение земли, устройство фундаментов, регулярное мытье от загрязнений и покраска. Повсеместна проблема очистки от рекламных объявлений и надписей. В зимний период необходима расчистка подходов к контроллерам. Нередки случаи, когда они повреждаются в результате дорожно-транспортных происшествий и ошибочных маневров водителей транспортных средств.

Наиболее просто решаемая часть задачи резкого снижения габаритов дорожного контроллера – блок управления (рис. 1), который все больше приобретает признаки компьютера (наличие операционной системы, мыши, клавиатуры, монитора и др.), а компьютеры стремительно уменьшаются в габаритах и стоимости. Известно высказывание компьютерного магната Билла Гейтса: "Если бы автомобиль прогрессировал так же быстро, как компьютер, то "Роллс-Ройс" стоил бы сейчас меньше доллара, а на литре бензина можно было бы проехать тысячу километров"

Быстродействие, память и другие характеристики компьютеров за последние 30 лет выросли ха 3-5 порядков при том, что их стоимость за это же время снизилась в 3-5 раз [4]. Имеются компьютеры в конструктивах для жестких условий эксплуатации. Аппаратные различия между компьютером и контроллером постепенно исчезают.

Основными отличительными признаками контроллера и ограничениями по снижению габаритов остается его периферийное оборудование.

Одним из глобальных недостатков классического подхода к проектированию дорожных контроллеров является их позиционирование как центрального коммутирующего устройства, осуществляющего переключение сигнала переменного тока 220 В. Фактически к каждому светофору от дорожного контроллера необходимо тянуть не менее 3-х силовых кабелей питания 220 В.

В сложившихся условиях городской застройки наращивание количества перекрестков со светофорным регулирова-

нием упирается в огромное количество подземных коммуникаций, увеличивающих стоимость установки и эксплуатации объекта, усложняющих способы прокладки коммуникаций.

Такой подход был оправдан, когда светосигнальным элементом светофора являлась обычная лампа накаливания. В настоящее время большинство светофоров уже выпускаются на основе светодиодных панелей и в своем составе имеют встроенные контроллеры (будем их называть "светофорные контроллеры"), которые формируют сигналы различного типа, включая стилизованные изображения, стрелки, табло обратного отсчета времени (рис. 3).

Наличие светофорного контроллера позволит встраивать в него видеокамеры, датчики (шума, загрязнения, метеословий и пр.), средства беспроводной связи и т.д. [5]. Фактически ничто не препятствует тому, что в каждый светофор будет входить только два провода – питание (которое не обязательно должно подводиться от дорожного контроллера) и управление (которое может подаваться и по беспроводной связи). Это не только упростит строительномонтажные работы на местности, но и позволит исключить из состава контроллера его наиболее крупную и энергоемкую часть – силовой блок.

Вторая по габаритам составная часть дорожного контроллера – платы сопряжения с внешними устройствами. В настоящее время в большинстве случаев каждое внешнее устройство имеет свой интерфейс и, соответственно, свою плату (карту) сопряжения. Перевод функциональной структуры дорожного контроллера на стандартные компьютерные конфигурации и применение технологии Plug and Play сведет эту часть проблемы к унифицированным разъемам типа USB. По этой же технологии могут быть реализованы подключения к линиям связи с центрами управления дорожным движением.

Предметом дополнительной разработки будет реализация функций диагностики и контроля работоспособности.

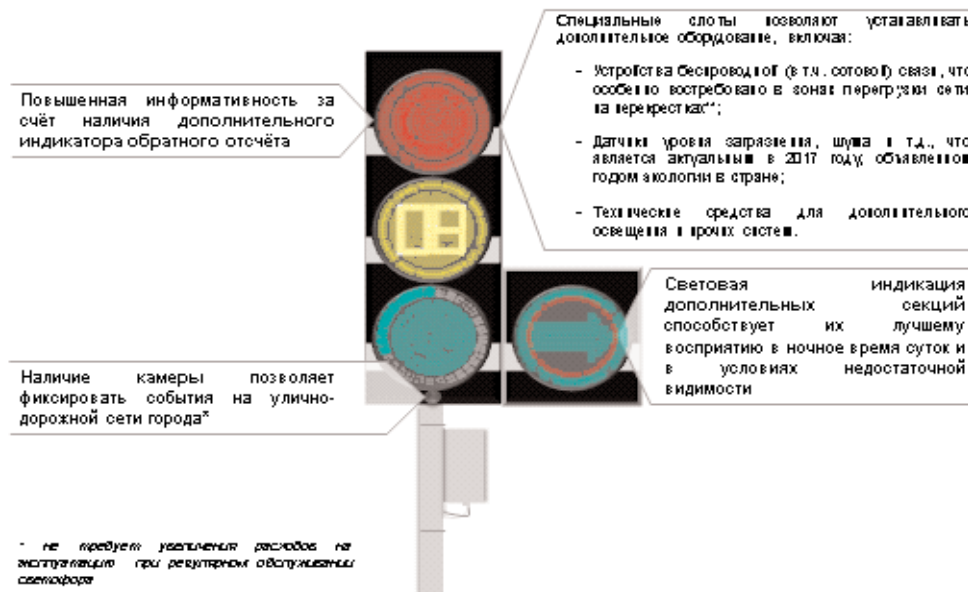


Рис. 3. Концептуальные возможности светодиодного светофора со встроенным светофорным контроллером

В любом дорожном контроллере должны быть реализованы как минимум следующие функции диагностики и контроля:

- иметь контроль отказов красных сигналов светофоров;
- иметь контроль и блокировку включения разрешающих сигналов светофоров по конфликтным направлениям;
- иметь защиту выходных силовых цепей от перегрузок и коротких замыканий;
- производить аварийное отключение в случае отклонений в работе выходных каналов либо появления на них внешнего паразитного напряжения;
- обеспечивать автоматическое включение в работу после перерыва в электропитании;
- сохранять работоспособность при воздействии промышленных радиопомех, наличие которых не должно приводить к сбоям в работе контроллера.

Реализация этих функций потребует распределения функций контроля между светофорным и дорожным контроллерами и разработки алгоритмов их совместного использования. Однако решение этой задачи не потребует дополнительных аппаратных средств, так как с учетом возможностей современных микропроцессоров, применяемых при создании компьютеров, может быть реализована программными средствами.

В концепции "Умных дорог" потребуются датчики движения не только автомобилей, но и пешеходов. Для выбора программ управления в соответствии с погодными условиями потребуются метео-датчики. На дорожные контроллеры могут возлагаться функции GPS/ГЛОНАСС навигации, передачи данных от средств фото-видеофиксации нарушений правил дорожного движения, управления уличным освещением, электронными дорожными знаками и информационными табло. В значительной мере дорожные контроллеры 4 поколения могут обслуживать периферийные компоненты управления единым парковочным пространством.

Эти и другие функции еще в большей степени предопределяют необходимость реализации дорожных компьютеров на базе промышленных компьютеров с хорошо отработанными операционными системами и интерфейсами взаимодействия.

По предварительной оценке габариты такого контроллера могут быть сведены к габаритам стандартного смартфона и размещения дополнительных конструктивов на улично-дорожной сети не потребуется!

Практическая реализации контроллеров 4 поколения должна начинаться с проработки вопросов внесения изменений и дополнений в действующие ГОСТы.

На сегодняшний день технические требования к дорожным светофорам в Российской Федерации устанавливаются двумя разными стандартами:

- межгосударственным стандартом ГОСТ 33385-2015 "Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные светофоры. Технические требования", введенным в действие с 8 сентября 2016г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2016г. №1001-ст;
- национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 52282-2004 "Технические средства организации дорожного движения. СВЕТОФОРЫ ДОРОЖНЫЕ. Типы и

основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний".

Оба стандарта действующие и содержат как общие требования, так и некоторые различия. Типы и исполнения светофоров по обоим ГОСТам полностью совпадают, однако ГОСТ 33385 содержит отсылку к национальным нормам стран участниц и содержит рекомендуемые типы и исполнения. Имеются разночтения и другие разночтения в применении обоих стандартов.

Например, межгосударственным стандарте ГОСТ 33385 имеется классификация светофоров в зависимости от температурных диапазонов: установлены пять температурных диапазонов. В национальном стандарте России этого нет. Имеются различия в требованиях к окраске корпуса светофора, к светоотражающим экранам и к креплениям, сохранены требования к козырькам (как для светофорных линз с лампами накаливания и некоторые др.

В связи с применением светодиодных светофоров требуется уточнение вопросов координаты цветности и фотометрических характеристик. На практике применяются светодиоды с длиной волны, обеспечивающей сине-зеленый цвет или изумрудно-зеленый, который в координаты цветности не попадает. В связи с массовым применением световой рекламы требуют нормирования вопросы различимости сигналов светофоров.

Однако первоочередной задачей следует считать включение в государственные стандарты требований об обязательности светофорных контроллеров с регламентацией распределения функций между дорожным и светофорным контроллерами и по порядку обмена информацией между ними.

Внесение необходимых изменений в ГОСТы и практическая реализация "в железе" позволит перейти к созданию действительно интеллектуальных транспортных систем – по крайней мере в части обустройства дорожно-транспортной инфраструктуры.

Литература

1. Сушко А.А. Технические средства организации дорожного движения как индикатор смены парадигм в организации дорожного движения. В сб. Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. Орловский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.В. Лукьянова Номер: 1 (1), 2018- стр. 415-420.
2. Ком Е.Н. Исследование характеристик дорожных светофоров. В сб. Системы организации и управления безопасностью дорожного движения: Сборник докладов и статей целевой конференции 22-24 сентября 2008 г. СПб гос. архит. - строит. ун-т. СПб., 2008. С. 13-26.
3. Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Бачманов М.Д. Оптимизация адаптивного управления светофорными объектами в рамках директивного управления транспортным потоком // Вестник МАДИ. 2016. № 4(47). С. 138-143.
4. Киселев И.П. Этапы развития систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи и высокоскоростного движения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. №6. С. 56-69.
5. Савельев Е.О. Исследование и разработка направлений реализации высокоэффективных светодиодных светофоров [Электронный ресурс]: Дис ... канд. техн. наук : 05.22.08 .-М.: РГБ, 2005 (Из фондов Российской Государственной Библиотеки).

ROAD CONTROLLERS - PAST, NOWADAYS, FUTURE

Alexander S. Polyakov, Ph. D., Research and design Institute of urban transport of Moscow (GBU "Mostransproekt"), Moscow, Russia, mgtniip@mgtniip.ru

Denis V. Truscinski, Institute of urban transport, Moscow, Russia, denisvtreskinsky@gmail.com

Abstract

Over the past 50 years, the domestic industry has produced several generations of road controllers, which form the basis of traffic control on the road network in the Russian Federation. Microprocessor technologies are widely used. Most traffic lights are included in automated traffic control systems, and more recently in intelligent transport systems. At the same time, the design remained virtually unchanged. Free-standing vandal-resistant metal cabinets on independent foundations are still needed. Switching of signals of traffic lights is made by switching of power supply. Connecting new devices to the controllers (transport detectors, video cameras, communication lines, etc.) each time requires the development of a new interface. In the proposed article, based on the classification of road controllers by periods of development and analysis of their functions, the structure and design of the 4th generation controllers are proposed. It is assumed that the concept of "smart traffic lights" with built-in led elements will eliminate the need for independent structural elements in the form of metal cabinets while expanding the functionality. Proposals for amendments and additions to the existing standards have been developed.

Keywords: road controller, traffic light controller, functional scheme, design, current state standards.

References

1. Sushko A.A. (2018). Technical tools of organization of road traffic as indicator of paradigm shift in road traffic organisation. Orel law Institute of the Ministry of internal Affairs of the Russian Federation number: 1 (1), pp. 415-420.
2. Kot E.N. (2008). Study of characteristics of traffic lights. In the collection of the System of organization and management of road safety: Collection of reports and articles of the target conference September 22-24, 2008. St. Petersburg state archit. builds. UN-T. SPb., pp. 13-26.
3. Zhankaziev S.V., Vorobiev A.I., Bachmanov M.D. (2016). Optimization of adaptive control of traffic lights within the traffic control. *Vestnik MADI*. No. 4(47), pp. 138-143.
4. Kiselev I.P. (2010). Stages of development of railway automation, telemechanics and communication systems and high-speed traffic. *Industrial ACS and controllers*. No. 6, pp. 56-69.
5. Savelyev E.O. (2005). Research and development of directions of implementation of high-efficiency led traffic lights [Electronic resource]: Dis. ... Cand. Techn. Sciences: 05.22.08. Moscow: RSL, 2005 (from the collections of the Russian State Library).

Information about authors:

Alexander S. Polyakov, Ph. D., Research and design Institute of urban transport of Moscow (GBU "Mostransproekt"), Moscow, Russia

Denis V. Truscinski, Institute of urban transport, Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO ENSURE RELIABLE EMERGENCY COMMUNICATIONS IN EMERGENCIES

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-42-48

Mohammed Omar Ahmed Abdolvasea,
Taiz University, Taiz, Yemen,
omaralmu2012@mail.ru

Keywords: Emergency, Call center, Throughput, Unmanned aerial vehicles, Professional radiotelephone communication, Multiservice traffic.

Saving the lives of people suffering from emergencies is the most important task facing any state. The speed of response of rescue systems depends on their ability to interact and ensure reliable communication between the population and the organizations that are responsible for rescue services. The article is devoted to the search for solutions to ensure sustainable communication in emergencies. The article offers options for solving two different problems that arise during the development of emergencies. One of the consequences of the emergency is a sharp increase in the number of calls by the population to rescue services, the possible partial destruction of rescue systems, as well as a breakdown in communication between the population and response points. The first task is to increase the capacity of call centers to detect emergencies, monitor the situation, inform the public and reduce panic. The second task – is providing emergency communication between rescue services. To solve this problem, use TETRA professional radiotelephone equipment as an alternative to mobile communication systems that can be disabled or disabled.

Information about author:

Mohammed Omar Ahmed Abdolvasea, Graduate student of the Department of Communication Networks and Switching Systems MTUCI, Moscow, Russia;
Taiz University, Taiz, Yemen

Для цитирования:

Мохаммед О.А.А. Разработка подходов к обеспечению надежной экстренной связи в условиях чрезвычайных ситуаций // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 42-48.

For citation:

Mohammed O.A.A. (2020) Development of approaches to ensure reliable emergency communications in emergencies. *T-Comm*, vol. 14, no.1, pp. 42-48. (in Russian)

The level of development of states can be assessed by the level of introduction of telecommunication technologies to ensure convenience for residents, as well as to assist them in emergencies. The transition from autonomous call centers of emergency services (CC ES) to their integration into the system helps to attract additional resources for service calls in emergencies. The need for combining and operational processing of emergency traffic in a single duty dispatch services (SDDS) has led to the introduction of Systems112, with the help of which access to several operational services is carried out by one number 112.

The development of emergencies leads to a rapidly increase in traffic directed to call centers ES. Consequently, the call centers ES cannot support the established indicators of quality of service (QoS).

As shown in Figure 1, during emergencies, real-time communication traffic (telephone communication) is especially rapidly growing. A quick response is important to rescue the victims [1, 2].

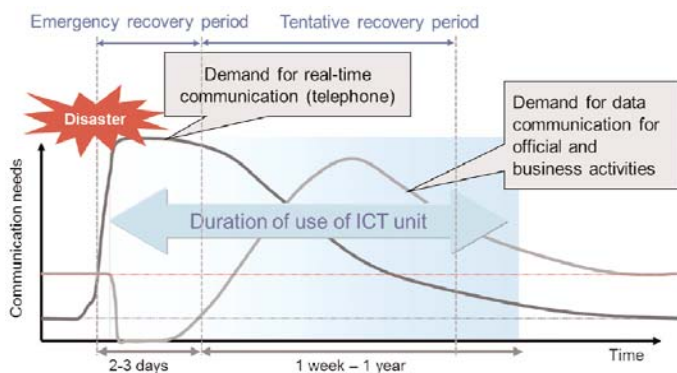


Figure1. Traffic increase during Emergency

Call centers of the “System 112” should fix the emergence of emergencies and, as a result, transfer the response systems in emergency mode.

In some situations, it is difficult to predict occurrence of emergencies based on data from traditional warning systems. We can offer such a sequence to switch to emergency mode.

1. We fix a certain number of calls, numerically equal to the number of operators in the call service center, we denote it by the value (C).

2. Set this value as a threshold value.

3. A certain time interval t is fixed for observing the process of incoming calls (it can be assumed that t is equal to the time of one session, that is, the time during which one call is served).

4. In each time interval, the number of incoming calls is recorded $IC(t)$.

5. Comparison performed of the number of incoming calls in the time interval t that was denoted as with a threshold value.

6. If the number of incoming calls in the time interval t is greater than the threshold value, then the occurrence of an emergency announced, and the emergency mode is switched on

$$X(t) = \begin{cases} \text{if } C < IC(t) \text{ to } & \text{NO Emergency} \\ \text{if } C \geq IC(t) \text{ to } & \text{YES Emergency} \end{cases}$$

Function $x(t)$ – the appearance of emergency during the time t .

After switching on the emergency mode, the task is to increase Throughput of call centers of emergency services (CC ES)

We list the list of factors of multidirectional influence on the throughput of “System 112”:

- Structure choice – distributed, centralized, mixed;
- Allocation of a special center for operational reserve;
- Combining in emergency mode the resources of several call service centers;
- Selection of traffic distribution method in emergency mode.

Under normal conditions, the throughput is high enough and the “System 112” ensures reliable communication. In emergency mode, everything changes and the quality of service decreases. To increase the throughput in call centers, a special method must be developed. The first two factors are difficult to change (it means the choice of structure and allocation of resources). The third and fourth factors can be used to provide high throughput. Based on them, can be chosen a method for combining call centers of emergency services (CC ES), and develop a method for distributing excess traffic.

One of the manifestations of an emergency can be the blocking of various elements of the emergency call center. Proposed solutions should consider this possibility. A high availability ratio is required to ensure due to the provision of a sufficient reserve.

This article proposes a solution for the task by combining the resources of several call centers of emergency services (CC ES), to increase the throughput of the SDDS system as a whole.

From the point of view of queuing theory, it is possible to consider emergency call service centers as a multichannel system [1, 3, 4]. If the emergency mode is fixed in one area, the thread of emergency calls to one specific emergency call service center is increasing. It is necessary to increase the number of operators in the CC ES taking into account the expected emergency traffic. Part of the operator’s workplaces was not be used, because emergencies are quite rare. To reduce costs when deploying new operator jobs, significant redundancy is laid down for devices and line-cable structures. By providing a connection between call centers in different regions using fiber-optic rings, we get the fundamental possibility of serving a large part of the excess traffic with the resources of those CC ES that are not affected by the emergency.

Figure two shows a variant of the organization of interaction between different CC ES on fiber-optic communication lines. In this case, a special center for operational response has been set up (CC ES OR), resources which are available to several CC ES. That is, for each of the CC ESs, it provides for the possibility of reroute excess traffic to the call center CC ES OR. The mathematical model and calculation results of this option published in article [3].

The positive aspects of using the rapid response center are:

- Efficient service of excess traffic from several call centers of ES in the service areas of which emergencies occurred at the same time;

- The possibility to take into account the geographical factor, including call centers of regions and settlements distant from each other in the CC of the OR, which reduces the risk of critical congestion when several emergencies occur simultaneously.

- The possibility to provide operational mutual assistance to several call centers at the same time;

This option has a significant drawback, consisting in the irrationality of the use of the operational response center, the equipment that used only in emergencies.

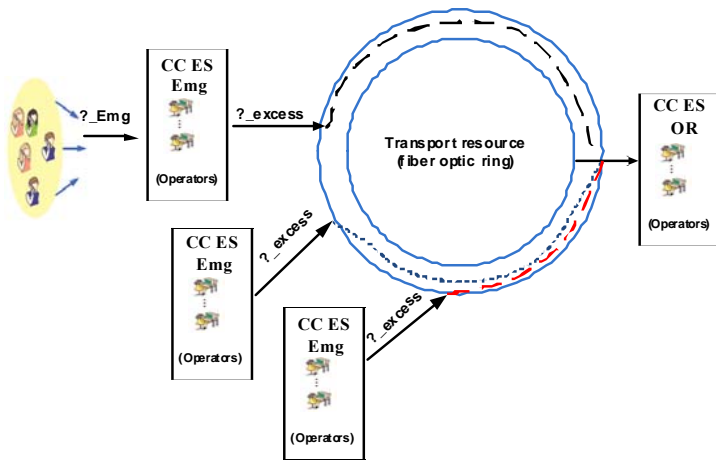


Figure 2. The use of fiber optic rings for interconnecting an EC call center

In Figure 3 another variant of the organization of mutual assistance between CC ESs is presented. This takes into account the need to maintain a sufficiently high level of emergency call service in areas where there is no emergency, but the resources that are used to service excess traffic.

The functional diagram of this option presented in Figure 3. The operational management methods ORR (Overflow Reroute) and COR (Cancel Reroute Overflow) are used. Consider applying the Overflow Reroute method. The principle of its operation is that when any CC ES goes into lock mode (all operators are busy), the ORR method activated in this call center. Unserved calls to this call center are redirected to other CC ES.

When a redirected call incomes at the CC ES, which is unavailable due to the busyness of all operators or due to the management functions involved by the network, the call goes in a circular pattern to the next call center (CC ES). If not all CC ESs are available for a redirected call, the call receives information from the IVR interactive voice menu system. Part of the load is

serviced in the CC ES – Emg (emergency call service center, in the service area of which the emergency is recorded).

Excess traffic from it is sent through a distributor to call centers of the mutual assistance system, the volume of such traffic is set in proportion to the real capacity of these CC ES. Figure 3 shows a simplified sample. The number of centers to be combined can be established taking into account real conditions. Between the CC ES, it may be possible to transfer excess traffic along the mutual assistance chain.

It is possible to use the interactive voice menu IVR in each call center or only the last one in the chain of call center ES. A load that does not receive service in the system is routed to this IVR.

We describe emergency call service in two stages based on the theory of teletraffic. The first stage involves the calculation of excess traffic using the first Erlang formula. Excess traffic expression

$$\lambda_{\text{Excess}} = p_B * A_{\text{Emg}} \tag{1}$$

Where λ_{Excess} is the intensity of the arriving load in call center in the emergency zone; p_{Call} – expression for assessing the probability of call loss, characterizing the state "all operators are busy"

$$P_{\text{Call}} = E_{V_{\text{Emg}}}(A_{\text{Emg}}) = \frac{A_{\text{Emg}}^{V_{\text{Emg}}} / V_{\text{Emg}}!}{\sum_{i=0}^{V_{\text{Emg}}} A_{\text{Emg}}^i / i!} \tag{2}$$

An important is the recurrence relation, which allows making calculations according to the first Erlang formula using a computer

$$E_V(A_{\text{Emg}}) = A_{\text{Emg}} * E_{V_{\text{Emg}}-1}(A_{\text{Emg}}) / (V_{\text{Emg}} + A_{\text{Emg}} * E_{V_{\text{Emg}}-1}(A_{\text{Emg}})) \tag{3}$$

In the event of an emergency in the service area of several call centers, excess traffic is determined based on the RDA method (R is the average value of the excess load; D is its dispersion; A is the load intensity). The expression for calculating excess traffic from several call centers is defined as the sum of the flows of excess traffic

$$\lambda_{\text{Excess_sum}} = \sum_{j=1}^M \lambda_{\text{Excess}(M)} \tag{4}$$

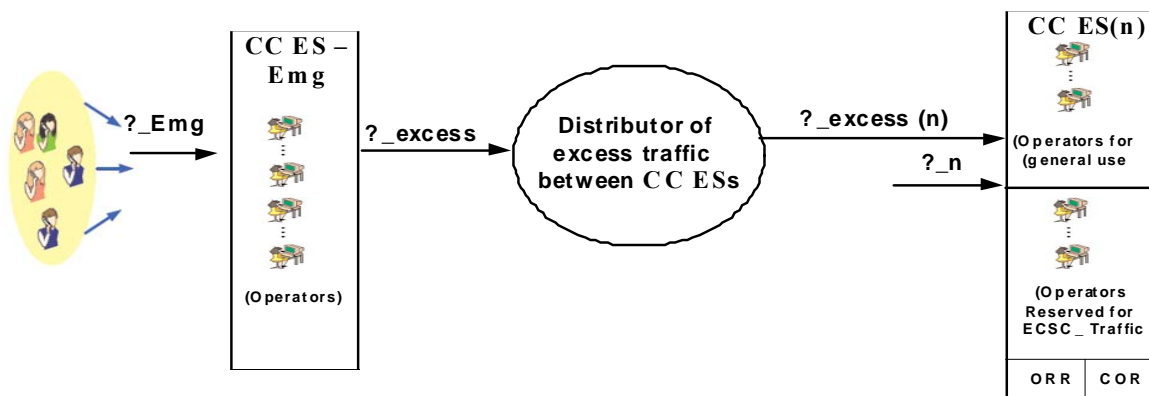


Figure 3. Variant of organization of a distributed system of mutual assistance

The second stage assumes a mathematical description of the operation in the call center. Suppose there are V operators. Two Poisson streams arrive (see Fig. 3). The time between calls and the duration of their service are distributed exponentially with the parameters, accordingly, λ and μ – for the stream coming from the call center CC ES-ES (it can be called an excess stream) and the second stream with parameter λv and parameter μ . We denote by the φ number of operator jobs reserved for servicing calls coming from the call center (n). Using the indicator function, the system of equations of probabilistic characteristics can be written in the form of a single relation.

$$P(i) = \frac{P(i+1)(i+1)\mu I(0 \leq i \leq V-1)}{(\lambda n + \lambda_{\text{excess}(n)}) I(0 \leq i \leq \varphi) + \lambda_{\text{excess}(n)} I(\varphi < i \leq V-1)}$$

$$v=0, 1 \dots v-1, \quad (5)$$

$$P(v)v = P(v-1)\lambda_{\text{excess}(n)}$$

System of equations (5) has a unique solution that can be obtained using linear algebra methods. We use the iteration method for solving [3, 4]. We present the calculation results for a specific example. In the conditions of standardization of SDDS for large cities, it is important to use call center (CC ES) with the same capacity. According to statistics, during emergencies a fivefold increase in traffic in the emergency response center (CC ES-Emg) was recorded.

The number of centers combined in a single system was calculated. Suppose the average value of the intensity of the load in each of the central heating facilities is 10 Erl. When emergencies emerge, A_{Emg} rises to 50 Erl. To cope with overloads, it is necessary to calculate the necessary number of operators in each of the call center of the system (V_j) and necessary number of centers, to which excess traffic is directed (W), as well as the number of reserved operators in the centers (V_{rez}). As the calculation showed, with $V_j = 30$, it is necessary to combine four emergency call service centers ($W = 3$). That is, the capacity of call center is 30 operators, of which three operators in each of the centers are included in the operational reserve and serve traffic only in their area of responsibility. The total number of call centers integrated into a mutual assistance system is four, since W is three. Under these conditions, the system will withstand five-fold overload. Figure 4 shows the dependence of the potential stability coefficient of the emergency call center to overloads on the number of channels of the operational reserve V_{rez} at $V_j = 30$, $W = 3$, $A_j = 10$ Erl. The coefficient of potential resistance of the emergency call center to overloads is defined as $h = A_{\text{ch}} / A_j$.

Another factor that affects throughput is the method of managing excess traffic. Various control methods may be used. Traffic management is understood as the establishment of control under the quality of real-time information servicing for delivery to the end user, and ensuring the efficient use of network resources. On communication networks, regardless of the switching technologies used, and the network structure.

We list four principles of controlling the intensity of teletraffic:

- support for calls that with high probability can end conversation, in order to reduce the impact of inefficient traffic on work the network;
- providing priority to the direct path of establishing a connection;
- use of available free network resources;
- prevention of overload of switching systems.

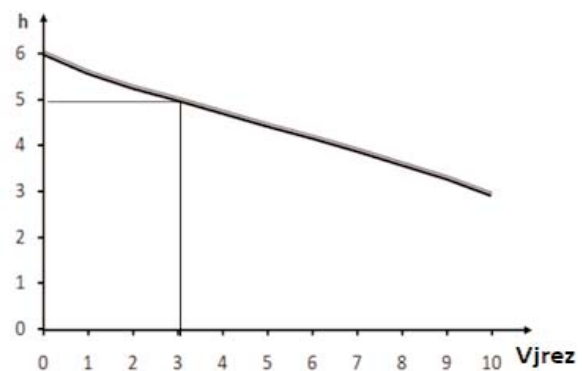


Fig. 4. The dependence of the coefficient of potential stability of the call center on overload h to the number of channels of the operational reserve V_{rez}

One of the important factors of communication management in emergencies is to ensure the continued functioning of communications, to achieve which they use a number of technical approaches and systems for backup and recovery. The availability of communication systems and the duration of their functioning can be affected by both physical damage caused to the network because of an emergency and its overload immediately after a disaster. Figure 5 shows statistics on the use of communications facilities after the earthquake in Japan in March 2011. As the graph shows, there was a sharp increase in the number of attempts to use the mobile network, but such attempts were not successful, due to network congestion and the small number of available base stations [2].

To reduce overload in conventional communication paths, it is possible to recommend the use of various portable communication systems (Portable Emergency Communications System) as an alternative in emergencies.

In emergencies, as an alternative means of communication when overloading mobile networks, it is promising to use the TETRA open standard digital trunked radio communications [5]. The prospects of the digital standard TETRA (TErrestrial Trunked RADio) for creating professional trunked communication networks in the Russian Federation are recognized. Comparison of professional radio communication standards [6, 7] according to the main characteristics (technical, functional capabilities, provided communication services) showed that, The TETRA standard is the most technologically advanced professional radiotelephone standard with the largest installed base in the world. The TETRA digital radio communication system has the ability to operate in three communication modes – half-duplex, duplex, and multimedia traffic transmission.

GSM and LTE technologies using unmanned aerial vehicles (UAVs) can be used for the rescue system (see ITU recommendations) [2]. There is a high probability that such technologies will not be available for use (threat of terrorist acts). Can be adapted the TETRA standard to serve role of GSM and LTE. In practice, we are talking about the possibility of using the TETRA standard in duplex mode and multimedia mode. When using the capabilities of TETRA standard equipment, it can be considered from the point of view of teletraffic theory as a queuing system (QS) with group arrive of customers (customers from the source in half-duplex mode, customers from the source in duplex mode, and, at the end, customers from the source in multimedia mode).

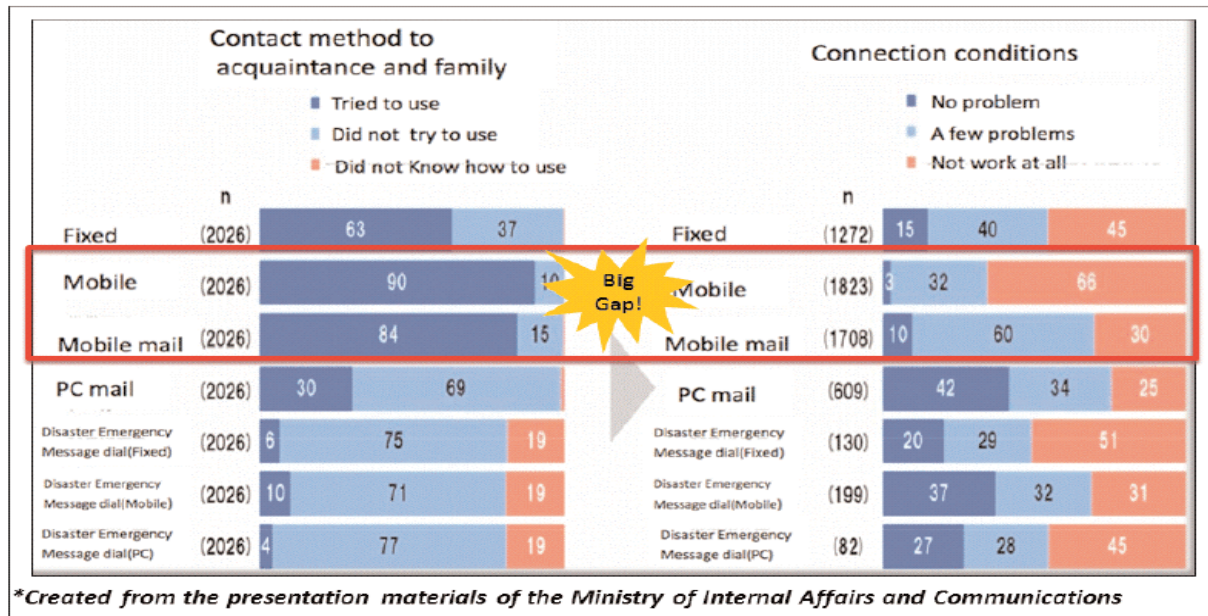


Fig. 5. Statistics on the use of communications facilities after the earthquake in Japan in March 2011

To describe this system, methods of the teletraffic theory are used. The relationship between the size and nature of the information load, the number of channels and quality of service is established. The general statement of the problem is as follows.

Let V be information channels in the TETRA standard. Service discipline with failures. The Poisson stream of group customer of random composition arrives to the system. This means that at time t with only a certain probability F1 there can be only one customer, and with probability F2, two customers. In our case, there are three communication modes. The half-duplex mode corresponds to F1 - the probability that a customer arrives from the source in half-duplex mode and one radio channel is required for its maintenance. Duplex mode corresponds to F2 - the probability that the customer arrives from the source in duplex mode and two radio channels are required for its maintenance.

The communication mode taking into account multimedia corresponds to F8 - the probability that a customer arrives from a source in multimedia mode and requires several radio channels to service it (suppose in this case that you need 8 radio channels).

We present a system of equations for the mathematical description of the functional model

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\lambda}{\mu} * p_0 ; \\
 p_{i+1} &= \frac{\lambda+i\mu}{(i+1)\mu} * p_i - \frac{\lambda}{(i+1)\mu} \sum_{s=1}^i F_s * p_{i-s} \quad i < V \\
 \dots\dots\dots \\
 p_V &= \frac{\lambda}{V\mu} \sum_{k=1}^V p_{V-k} \sum_{s=k}^i F_s ,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

λ - the stream density of groups of customers; μ - service parameter; V - number of radio channels in the TETRA system.

Blocking probability in half-duplex mode:

$$P_{otk_{Half-duplex}} = p_v \tag{7}$$

Blocking probability in duplex mode:

$$P_{otk_{Duplex}} = p_v + p_{v-1} \tag{8}$$

Blocking probability in multimedia mode:

$$P_{otk_{Multe}} = \sum_{i=0}^m p_{v-i} \quad (\text{In our example } m = 8). \tag{9}$$

The purpose of the research was to determine the possibility of using TETRA when working in these three modes. As the results of the research showed, professional radiotelephone communication systems are very sensitive to multimedia traffic. Its presence is permissible only in large systems with the number of radio channels of more than 24 radio channels (with $V \geq 96$ information channels). We take into account the four-fold temporary compression of the radio channel. As shown by the dependence Potk on the intensity of the load in the radio interface of the α groups in Fig. 6, at $V = 64$, the appearance of multimedia traffic causes significant failures in the system.

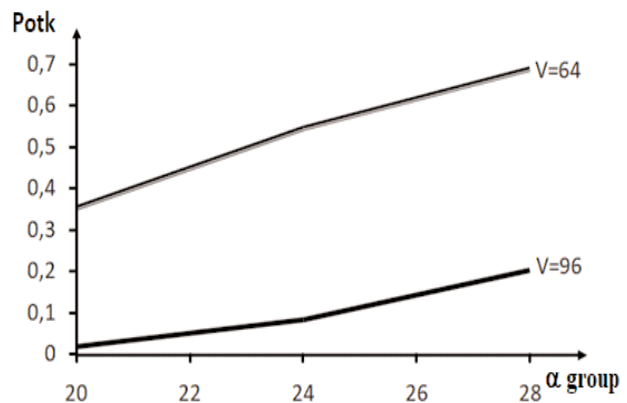


Fig. 6. The dependence of the probability of multimedia blocking (lost) Potk on the intensity of the load at F1 = 0.2; F2 = 0.6; F8 = 0.2

If the TETRA system allows operation on 24 radio channels ($V = 96$), then no more than five radio channels can be used for multimedia transmission. Table 1 presents the results of an analytical solution of the equation system for the TETRA standard at a different number of information channels in the radio interface, at different load intensities of the stream of customer groups for the radio interface of α groups.

Table 1

The results of solving the system of equations for the base station of the TETRA standard with a capacity of $V = 64$ and $V = 96$ information channels in the radio interface

α group = 16 Erl, $V = 64$			
F2	F8	Ротк2	Ротк8
0,91	0,09	0,006907	0,048485
α group = 20 Erl, $V = 64$			
0,98	0,02	0,005887	0,048339
α group = 24 Erl, $V = 64$			
0,99	0,01	0,026420	0,166814
α group = 16 Erl, $V = 96$			
0,65	0,35	0,008396	0,046285
0,95	0,05	0,000000	0,000001
α group = 20 Erl, $V = 96$			
0,78	0,22	0,007913	0,045037
α group = 24 Erl, $V = 96$			
0,86	0,14	0,008491	0,049401
α group = 28 Erl, $V = 96$			
0,92	0,08	0,008332	0,050381
α group = 32 Erl, $V = 96$			
0,97	0,03	0,006239	0,041978

The transition to the TETRA standard during emergencies causes an increase in traffic in the TETRA network. There are two options for increasing the bandwidth of the standard TETRA network.

The first option involves the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as a means of reducing overload in emergency mode. The UAVs may be used as an additional resource to support communication and improve network reliability. In works [5, 6], the results of a research of the use of UAVs as a radio signal repeater with the aim of expanding the capabilities of ground-based radio communication systems and traffic control when network congestion occurs, and as a way to increase reliability in case of failure of a part of the network, are presented.

The UAV can be used as a search and rescue system. In this case, it can work as a repeater and a standalone element for aerial photography. The work of the search and rescue service is based on the use of equipment in the UAV that supports duplex and multimedia modes. In the ITU Recommendations, it is proposed

to use UAVs in which GSM and LTE technologies are used as a search and rescue system [2]. TETRA equipment also has the same functionalities. Due to the ability to switch from one mode to another or the ability to work together in two communication modes depending on the need or situation, the TETRA standard has an advantage over other radio standards.

Conclusions

1. Combining the resources of several emergency call centers is an effective option to reduce congestion in emergency mode and provide the population with reliable information to reduce panic.
2. The performed analytical calculations made it possible to clarify the dependence of the coefficient of potential stability call center-emergency to congestion h on various factors, among which are the number of emergency call centers included in the mutual assistance system, as well as the amount of allocated operational reserve.
3. When address the consequences of emergencies, it is actual to use the resources of the TETRA standard in half-duplex, duplex, and multimedia modes.
4. The use of UAVs with TETRA standard equipment provides an alternative to GSM and LTE standards systems, which may not be available or may be overloaded during an emergency
5. The actual use of UAVs to organize rescue of people or an alternative means of communication.

References

1. Stepanova I.V., Mohammed O.A. (2019). The method of increasing the throughput capacity of System 112 by combining the resources of a single duty dispatch services. *Methodological issues of teaching infocommunications in higher education*. No. 3, pp. 39 -43.
2. ITU-D 2-я study Group 2, Final Report (Question 5/2: Utilization of telecommunications/ICTs for disaster preparedness, mitigation and response 6th Study Period 2014-2017).
3. Stepanov S.N. (2015). *Theory of teletraffic: concepts, models, applications*. Moscow: Hot line – Telecom. 868 p. (Series "Theory and Practice of Info-Communications").
4. Pshenichnikov A.P. (2017). *Theory of Teletraffic*. Textbook for high schools. Moscow: Hot line – Telecom. 212 p.
5. Stepanova I.V. (2017). Designing systems radio Communication TETRA standard. *T-Comm*. No.11, pp. 10-16.
6. Mohammed O.A.A. (2019). The results of calculating the resource of UAV channels when used in professional radiotelephone communication systems. Moscow: Abstracts at *IFI-2019*, pp. 82-83.
7. Website <http://ess.ru> Comparative analysis of digital trunking communication standards.

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОЙ ЭКСТРЕННОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Мохаммед Омар Ахмед Абдулвасае, Университет Тауз, г. Тауз, Республика Йемен, omaralmu2012@mail.ru

Аннотация

Спасение жизни людей, страдающих при чрезвычайных ситуациях, является важнейшей задачей, стоящей перед любым государством. Быстрота реагирования систем спасения зависит от их способности к взаимодействию и обеспечению надежной связи между населением и организациями, которые отвечают за службы спасения. Статья посвящена поиску решений для обеспечения устойчивой связи в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС). Предлагаются варианты решения двух разных задач, возникающих при развитии ЧС. Одним из последствий чрезвычайной ситуации является резкий рост числа обращений населения к службам спасения, возможное частичное разрушение систем спасения, а также нарушение связи между населением и пунктами реагирования. Первая задача – увеличение пропускной способности центров обслуживания вызовов для выявления ЧС, мониторинга ситуации, информирования населения и снижения уровня паники. Вторая решаемая задача – обеспечение связи в режиме ЧС между службами спасения. Предлагается использовать оборудование профессиональной радиотелефонной связи стандарта TETRA в качестве альтернативы системам мобильной связи, которые могут быть выведены из строя или отключены.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, центр обслуживания вызовов, пропускная способность, беспилотные летающие аппараты, профессиональная радиотелефонная связь, мультисервисный трафик.

Литература

1. Степанова И.В., Мохаммед Омар А.А. Метод повышения пропускной способности Системы 112 за счет объединения ресурсов единых дежурно-диспетчерских служб // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2019. №3. С. 39-43.
2. МСЭ-D 2-я Исследовательская комиссия, Заключительный отчет – (Вопрос 5/2: Использование электросвязи / ИКТ для обеспечения готовности к бедствиям, смягчения последствий бедствий и реагирования на них), 6 й Исследовательский период 2014-2017 гг.
3. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: горячая линия – Телеком, 2015. 868 с. (Серия "Теория и практика инфокоммуникаций").
4. Пшеничников А.П. Теория Телетрафика. Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 212 с.
5. Степанова И.В. Проектирование систем радиотелефонной связи стандарта TETRA // Т-Сотм: телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №1. С. 10-16.
6. Мохаммед О.А.А. Результаты расчета ресурса каналов БПЛА при использовании в системах профессиональной радиотелефонной связи. М.: Тезисы доклада на МФИ-2019. С. 82-83.
7. Сайт <http://ess.ru> Сравнительный анализ стандартов цифровой транкинговой связи.

Информация об авторе:

Мохаммед Омар Ахмед Абдулвасае, университет Тауз, г. Тауз, Республика Йемен; аспирант МТУСИ, Москва, Россия

ГЛАВНОЕ

СОБЫТИЕ ОТРАСЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ИНФОФОРУМ

2020 30-31 января

▪ РОССИЯ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ:
ПРЕОДОЛЕНИЕ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

22^й
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ФОРУМ
ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

здание
Правительства
Москвы
ул. Новый Арбат, 36

infoforum.ru



THE SPECTRAL DECOMPOSITION METHOD FOR SOLVING THE LINDLEY INTEGRAL EQUATION AND RELATED NUMERICAL METHODS

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-49-55

Lyudmila V. Lipilina,
Povolzhskiy State University of Telecommunications
and Informatics, Samara, Russia,
mila199113@gmail.com

Keywords: queuing system, average queue waiting time, Lindley integral equation, Laplace transform, hyperexponential distribution.

In researching the traffic of modern computer networks and telecommunication networks, the methods of queuing theory are widely used. In turn, in studies of queuing systems (QS) of type G/G/1 with arbitrary laws of the distribution of intervals between adjacent requirements in the input flow and service time, the spectral decomposition method (SDM) of solving the Lindley integral equation is used [1-3]. The basis of this method is the search for zeros and poles of the constructed spectral decomposition in the form of some fractional rational function involving numerical methods for determining the roots of polynomials. Moreover, the coefficients of the polynomial in the decomposition numerator are usually expressed in terms of the unknown parameters of the distribution laws used to describe the QS. Typically, these unknown parameters of the laws of distribution can be determined through the numerical characteristics of the analyzed traffic by the known method of moments. The purpose of this article is to illustrate in detail the spectral decomposition method as applied to QS H2/H2/1 of type G/G/1 with hyperexponential laws of second-order distributions and its relation to problems of numerical analysis. A characteristic feature of this distribution law is the possibility of its unambiguous description both at the level of the first two initial moments of time intervals, and at the level of three moments. The second-order hyper-exponential distribution law of H2 provides the coefficient of variation of time intervals, and starting from four, the H2 distribution law has a heavy tail, which is well suited for describing traffic with a heavy-tail distribution. The use of this law of higher order distribution in the method of spectral decomposition leads to an increase in the computational complexity of the problem. The proposed approach to the use of the spectral decomposition method allows us to determine, in addition to the average waiting time, other moments of waiting time. In the telecommunications standard, the concept of jitter is defined through the spread of waiting time around its average value. Then, the presented approach of applying the spectral decomposition method allows one to determine jitter through the second initial moment of waiting time. This refers to the practical applicability of queuing systems to the study of delays in telecommunication networks.

Information about author:

Lyudmila V. Lipilina, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, graduate student of Department of Software and Management in Technical Systems, Samara, Russia

Для цитирования:

Липилина Л.В. Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения линдли и связанные с ним численные методы // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 49-55.

For citation:

Lyudmila V.L. (2020) The spectral decomposition method for solving the lindley integral equation and related numerical methods. T-Comm, vol. 14, no.1, pp. 49-55. (in Russian)

Introduction

In [1], in the section of G/G/1 systems of the general queuing theory, an incomplete formula for the average waiting time in the queue of requirements entering the system is given:

$$W = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + (\bar{t})^2(1-c)^2}{2\bar{t}(1-c)} - \frac{\bar{t}^2}{2\bar{t}}$$

In [1] following notation is used:

- c is the system load factor;
- λ is the intensity of the incoming stream;
- μ is the intensity of service requirements,
- σ_a and σ_b - respectively, the standard deviation of the time intervals for the incoming flow and the service time;

- \bar{t} , \bar{t}^2 - the first two initial moments of a random variable - of the idle period of system. These components of the above formula in the case of arbitrary (G) distribution laws that determine the QS functioning process cannot be established in the general case. This formula unambiguously assumes that the average waiting time for requirements in the queue when recalculating variances for the coefficients of variation directly depends on the squares of the coefficients of variation of the time intervals for the incoming flow and the service time. In addition, computational experiments to determine the average waiting time using the example of QS with the laws of distributions of H_2 confirm its dependence on the moments of time intervals above the second order.

A probabilistic mixture of two exponential distributions called the second-order hyperexponential distribution law H_2 with a density function $f(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$ is defined in [1], where it is noted that "the distribution law is three-parameter ($p, \lambda_1, \lambda_2 > 0$) and allows the method of moments to approximate arbitrary distribution laws at the level of the first three initial moments". It was also used in [8, 9, and 10] in the study of other QS.

For the study of G/G/1 systems, as is known for example from [1], where "the Lindley integral equation is used. To write it, we introduce the following notation:

- $W(y)$ is the probability distribution function of the waiting time for requirements in the queue,
- $C(u) = P(\tilde{u} < u)$ is the probability distribution function of a random variable $\tilde{u} = \tilde{x} - \tilde{t}$, where, in turn \tilde{x} , is a random service time for a requirement, \tilde{t} - a random variable is the time interval between requirements arrivals. Then one of the forms of the Lindley equation looks like this" [1]:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases}$$

From this notation, it can be seen that "the Lindley integral equation is valid only for non-negative values of the argument y" [1].

In the course of illustrating the main points of the SDM of solving the Lindley integral equation, we retained the notation of the original [1], in which the notation and was introduced for the Laplace transforms of the density functions of the distribution of the intervals between the requirements $A^*(s)$ and the

service time $B^*(s)$. "The SDM of solving the Lindley Integral Equation (LIE) consists in transforming the key expression $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$ to the product of some two factors in the form of fractional rational functions. For definiteness, we will present this key expression of spectral decomposition in the form: $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, where $\psi_+(s)$ and $\psi_-(s)$ are the components of the SDM" [1]. In each specific case of QS, these will be uniquely defined fractional rational functions s that satisfy, according to [1], two general conditions (1) and (2):

1. In the case $\text{Re}(s) > 0$, $\psi_+(s)$ is an analytic function that does not contain zeros in this half-plane;
2. In the case $\text{Re}(s) < D$, $\psi_-(s)$ it is an analytic function that does not contain zeros in this half-plane, where the constant $D > 0$, for which

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a(t)}{e^{-Dt}} < \infty \tag{1}$$

Additionally, for the functions and the conditions must be met" [1]:

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) > 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1; \quad \lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) < D} \frac{\psi_-(s)}{s} = -1 \tag{2}$$

The construction of these functions satisfying the above conditions (1) and (2) will be demonstrated below.

In the Russian-language scientific literature "instead of the spectral decomposition method for solving the Lindley integral equation, the factorization method and factorization components $\omega_+(z, t)$ and $\omega_-(z, t)$ are used" [2].

Application of the spectral decomposition method to the study of QS with hyperexponential distributions

Consider the QS, which is formed by the laws of distributions:

- the density function of the intervals between requirements in the input flow has the form

$$a(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \tag{3}$$

and the density function of the service time has the form

$$b(t) = q\mu_1 e^{-\mu_1 t} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 t} \tag{4}$$

The Laplace transform of function (3) has the form:

$$A^*(s) = p \frac{\lambda_1}{s + \lambda_1} + (1-p) \frac{\lambda_2}{s + \lambda_2} \tag{5}$$

and functions (4)

$$B^*(s) = q \frac{\mu_1}{s + \mu_1} + (1-q) \frac{\mu_2}{s + \mu_2} \tag{6}$$

Then the spectral decomposition $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, as the ratio of two fractional rational functions, will have the form:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[p \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} + (1-p) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - s} \right] \cdot \left[q \frac{\mu_1}{s + \mu_1} + (1-q) \frac{\mu_2}{s + \mu_2} \right] - 1$$

Convert this expression.

We imagine the first factor on the right side of the expression in square brackets in the form:

$$\left[p \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} + (1 - p) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - s} \right] = \frac{\lambda_1 \lambda_2 - [p \lambda_1 + (1 - p) \lambda_2] s}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)} = \frac{a_0 - a_1 s}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)},$$

where the auxiliary parameters are equal to:

$$a_0 = \lambda_1 \lambda_2, \quad a_1 = p \lambda_1 + (1 - p) \lambda_2.$$

Similarly, the second factor in square brackets can be represented as:

$$\left[q \frac{\mu_1}{\mu_1 + s} + (1 - q) \frac{\mu_2}{\mu_2 + s} \right] = \frac{\mu_1 \mu_2 - [q \mu_1 + (1 - q) \mu_2] s}{(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)} = \frac{b_0 + b_1 s}{(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)},$$

where the auxiliary parameters are equal to:

$$b_0 = \mu_1 \mu_2, \quad b_1 = q \mu_1 + (1 - q) \mu_2.$$

After such simple transformations, the spectral decomposition can be represented as:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{(a_0 - a_1 s)(b_0 + b_1 s) - (\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)}.$$

On the right side of the expansion, both in the numerator and the denominator, we have polynomials of the fourth degree. In the spectral decomposition method, we are interested in the polynomial in the numerator, which can be represented as you need to determine its zeros. In the spectral decomposition method, we are interested in the polynomial in the denominator, which can be represented as $-s^4 + d_2 s^3 + d_1 s^2 + d_0 s$ and then you need to determine its zeros. To do this, we determine its coefficients using the symbolic operations of the Mathcad mathematical package:

$$d_0 = a_0 b_1 - a_1 b_0 - a_0 (\mu_1 + \mu_2) + b_0 (\lambda_1 + \lambda_2),$$

$$d_1 = -a_1 b_1 - a_0 b_0 + (\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2)$$

and $d_2 = \lambda_1 + \lambda_2 - \mu_1 - \mu_2$.

They are expressed through so far unknown distribution parameters (3) and (4), which are subject to determination by the moment method. Now the ratio of two fractional rational functions $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ can be represented as:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{s(s^3 - d_2 s^2 - d_1 s - d_0)}{(s - \lambda_1)(\lambda_2 - s)(\mu_1 + s)(\mu_2 + s)}.$$

It follows from the method of spectral (factorial) decomposition that such a decomposition exists and is unique.

For the completion of the spectral decomposition, it will be necessary to determine the roots of the equation

$$s^3 - d_2 s^2 - d_1 s - d_0 = 0, \tag{7}$$

satisfying together with this functions $\psi_+(s)$ and $\psi_-(s)$ this above conditions (1) and (2).

For this, it is necessary and sufficient "that the cubic equation (7) has two real negative roots (two complex conjugate roots with negative real parts), which for convenience we denote $-\sigma_1$ and $-\sigma_2$ and one positive root σ_3 . The presence of the required roots is guaranteed by the uniqueness of the spectral decomposition" [1].

We will verify this using the example of equation (7). To do this, we study the sign of the lowest coefficient d_0 of the polynomial (7) according to the Vieta's formula. In the stationary mode of operation of the QS, its load factor must satisfy the condition:

$$\rho = \frac{\bar{\tau}_\mu}{\bar{\tau}_\lambda} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 [\mu_1 (1 - q) + \mu_2 q]}{\mu_1 \mu_2 [\lambda_1 (1 - p) + \lambda_2 p]} < 1.$$

The load factor here, as in simulation, is determined by the ratio of the average intervals: of the service time $\bar{\tau}_\mu$ and of the interval between requirements $\bar{\tau}_\lambda$ in the incoming flow.

The expression for the coefficient d_0 in expanded form has the form:

$$d_0 = -\lambda_1 \lambda_2 [\mu_1 (1 - q) + \mu_2 q] + \mu_1 \mu_2 [\lambda_1 (1 - p) + \lambda_2 p].$$

Now comparing the expressions for the lower coefficient d_0 and load ρ , we get that coefficient $d_0 > 0$. From the Vieta's formula it follows that the product of the three roots of the cubic equation $d_0 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 > 0$, therefore, the required roots really exist.

"The components of the spectral decomposition method in the form of fractional rational functions $\psi_+(s)$ and $\psi_-(s)$ can be written according to conditions (1) and (2) in the form:

$$\psi_+(s) = \frac{s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}{(s + \mu_1)(s + \mu_2)}, \quad \psi_-(s) = \frac{(s - \lambda_1)(\lambda_2 - s)}{s - \sigma_3}.$$

Then the function $\psi_+(s)$, includes only the negative real parts of the roots $-\sigma_1$ and $-\sigma_2$ of equation (7), and the function $\psi_-(s)$ - only the positive real root σ_3 . Now we focus on the function $\psi_+(s)$ containing negative roots in the numerator and, when they are determined by Newton's numerical method, we adapt it to finding only negative roots" [1].

"Using the method of spectral decomposition, we determine the constant K :

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}{(s + \mu_1)(s + \mu_2)} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\mu_1 \mu_2}.$$

The constant K in solving the problem means the probability that the next requirement arriving in the system, finds the system free" [1]. Next, through the function $\psi_+(s)$, we determine the Laplace transform $W^*(s)$ of the waiting time distribution function $W(y)$:

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{s \mu_1 \mu_2 (s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}.$$

Through it, we express the Laplace transform of the probability density function of the waiting time probability $s \cdot \Phi_+(s)$ " [1]. Finally, the Laplace transform $W^*(s)$

$$W^*(s) = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 (s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}. \quad (8)$$

Based on the properties of the Laplace transform, we define its first derivative

$$\frac{dW^*(s)}{ds} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (2s + \mu_1 + \mu_2) \mu_1 \mu_2 (s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}{\mu_1^2 \mu_2^2 (s + \sigma_1)^2 (s + \sigma_2)^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2) \mu_1 \mu_2 (2s + \sigma_1 + \sigma_2)}{\mu_1^2 \mu_2^2 (s + \sigma_1)^2 (s + \sigma_2)^2}$$

and find the average waiting time for requirements in the queue

$$\left. \frac{dW^*(s)}{ds} \right|_{s=0} = \frac{\sigma_1 \sigma_2 \mu_1^2 \mu_2^2 (\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_1^2 \sigma_2^2 \mu_1 \mu_2 (\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1^2 \mu_2^2 \sigma_1^2 \sigma_2^2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 \sigma_2} - \frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}.$$

This the final calculation formula for the average waiting time for QS $H_2/H_2/1$ can be represented as:

$$W = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}, \quad (9)$$

where σ_1 and σ_2 there are absolute values of the found negative roots $-\sigma_1, -\sigma_2$.

From expression (8) for the spectral expansion of the probability density function of the waiting time, it is also possible to determine the initial moments of the second, third and higher orders for the waiting time. Determining the second derivative of $W^*(s)$, we find the second initial moment of the waiting time:

$$\overline{W^2} = \frac{d^2 W^*(s)}{ds^2} = \frac{2}{\mu_1 \mu_2} - \frac{2}{\sigma_1 \sigma_2} - \frac{2(\sigma_1 + \sigma_2)}{\mu_1 \mu_2 \sigma_1^2 \sigma_2^2} [\sigma_1 \sigma_2 (\mu_1 + \mu_2) - \mu_1 \mu_2 (\sigma_1 + \sigma_2)]$$

through which we express the variance of this random variable. Recalling that the concept of "delay jitter" in telecommunications according to the standard [7] is defined as the spread of the waiting time from its average value W , the delay jitter can be determined through the variance. This fact can be considered as a practical application of the theory of queuing for the analysis of teletraffic of telecommunication networks.

Determination of parameters of distribution laws using the first two initial moments of time intervals

For practical calculations of the average waiting time for requirements in the queue according to formula (9), it is necessary to determine the parameters of the distribution laws that describe the operation of the QS. For this, we again use the properties of the Laplace transform and determine the initial moments for distributions (3) and (4). For distribution (3) we have:

$$\begin{aligned} \overline{\tau}_\lambda &= p / \lambda_1 + (1 - p) / \lambda_2, \\ (10) \quad \overline{\tau}_\lambda^2 &= 2p / \lambda_1^2 + 2(1 - p) / \lambda_2^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Because distributions (3) and (4) include three parameters each, to these two equations of moments we add the third equation (12) with respect to the square of the coefficient of variation of the intervals of receipts:

$$c^2 = [\overline{\tau}_\lambda^2 - (\overline{\tau}_\lambda)^2] / (\overline{\tau}_\lambda)^2. \quad (12)$$

At the same time, the third equation (12) relates equations (10) and (11) to each other. Now, having solved the system of three nonlinear equations (10) – (12), we will determine the distribution parameters (3) λ_1, λ_2, p unknown so far. Since the not complete formula of the queuing theory given at the very beginning includes the squares of the coefficients of variations, this approach is completely valid. In the future, the coefficients of variation will be used as input parameters of the task of calculating the average waiting time of requirements in the queue.

Now we indicate the technique for solving systems of nonlinear equations (10) - (12). Using the substitution method for solving systems of equations, we set as parameters μ_1 and μ_2 :

$$\lambda_1 = 2p / \overline{\tau}_\lambda, \quad \lambda_2 = 2(1 - p) / \overline{\tau}_\lambda \quad (13)$$

so that they satisfy the equation of moments (10) and we substitute them in (12) taking into account (11), (12). Then we obtain an equation of the fourth degree with respect to the parameter p . Discarding two trivial solutions $p=0, p=1$ in this equation, we reduce the degree of the equation to two and solving this equation with respect to the parameter p , we obtain two roots:

$$p = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{c_\lambda^2 - 1}{c_\lambda^2 + 1}} \right).$$

For definiteness, in further calculations we will use the largest root. Therefore, the hyperexponential distribution law of H_2 can be described at the level of the first two moments and it provides a coefficient of variation c_τ from unity to ?.

We will do the same with distribution (4), then its unknown parameters will take the form:

$$\mu_1 = 2q / \overline{\tau}_\mu, \quad \mu_2 = 2(1 - q) / \overline{\tau}_\mu, \quad q = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{c_\mu^2 - 1}{c_\mu^2 + 1}} \right).$$

Consider an example. For definiteness, we take the load factor of the QS equal: $\rho = \overline{\tau}_\mu / \overline{\tau}_\lambda = 0,9$. Note that the load factor here is determined, as in simulation systems, by the ratio of the average intervals. We set the average service time in QS equal $\overline{\tau}_\mu = \mu^{-1} = 1$, then the average interval between receipts will be equal $\overline{\tau}_\lambda = 10/9$. Additionally, as input parameters we take the coefficients of variation of time intervals equal to two: $c_\lambda = c_\mu = 2$. A description of the distribution law using the first two initial moments gives the following values of the distribution parameters (3) and (4) when rounding the results: $p \approx 0,887$, $\lambda_1 \approx 1,597$, $\lambda_2 \approx 0,203$, $q \approx 0,887$, $\mu_1 \approx 1,775$, $\mu_2 \approx 0,225$. Thus, all parameters of distributions (3) and (4) are uniquely determined.

Now it remains to determine the coefficients of equation (7) and for them we obtain the following results:

$d_0 \approx 0,014$; $d_1 \approx 0,572$; $d_2 = -0,201$. The negative roots of this polynomial we need are determined using the Newton method, which gives: $-\sigma_1 \approx -0,852$, $-\sigma_2 \approx -0,025$. The average waiting time for requirements in the queue W according to the calculation formula (10) for the considered example is equal to $W \approx 36,202$ time units.

The results of computational experiments obtained in the Mathcad package for the average latency in QS $H_2/H_2/1$ are presented in table 1. Here we consider the cases of small ($c=0,1$), medium ($c=0,5$) and high load ($c=0,9$) with service time $\bar{\tau}_\mu=1$ and coefficient of variation of intervals between receipt of requirements c_λ and service time c_μ equal to 2, 4, 8.

Table 1

The results of computational experiments for QS $H_2/H_2/1$

Input parameters for QS	Average waiting time for QS $H_2/H_2/1$
c (c_λ, c_μ)	
0,1	(2, 2) 0,452
	(4, 4) 1,781
	(8, 8) 7,110
0,5	(2, 2) 4,039
	(4, 4) 16,131
	(8, 8) 64,178
0,9	(2, 2) 36,201
	(4, 4) 144,832
	(8, 8) 577,861

Determination of the parameters of distribution laws using the first three initial moments of time intervals

Because the H_2 distribution under consideration contains three parameters, we will approximate the distribution law using the first three initial moments of time intervals and compare the results with the data obtained using the first two initial moments. Using the Laplace transforms of functions (5) and (6) will give the following expressions for the moments of time intervals of the third order:

– for input flow intervals
 $\bar{\tau}_\lambda^3 = 6p / \lambda_1^3 + 6(1-p) / \lambda_2^3,$

– for service time
 $\bar{\tau}_\mu^3 = 6q / \mu_1^3 + 6(1-q) / \mu_2^3.$

Now, in the example considered above, we add the expression for the third moment as the third equation. We define it through the asymmetry coefficient and take for example $A_{S\lambda} = A_{S\mu} = 4$, more than that of the Poisson flow. Now the input parameters for the second and third initial moments will change and become equal; $\bar{\tau}_\lambda^2 = 5 \cdot (10/9)^2$, $\bar{\tau}_\lambda^3 = 45 \cdot (10/9)^3$, $\bar{\tau}_\mu^2 = 5$, $\bar{\tau}_\mu^3 = 45$. Then the equations of moments take the form:

$$\begin{cases} p / \lambda_1 + (1-p) / \lambda_2 = 10 / 9 \\ 2p / \lambda_1^2 + 2(1-p) / \lambda_2^2 = 5 \cdot (10 / 9)^2 \\ 6p / \lambda_1^3 + 6(1-p) / \lambda_2^3 = 45 \cdot (10 / 9)^3 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} q / \mu_1 + (1-q) / \mu_2 = 1 \\ 2q / \mu_1^2 + 2(1-q) / \mu_2^2 = 5 \\ 6q / \mu_1^3 + 6(1-q) / \mu_2^3 = 45 \end{cases} \quad (15)$$

The solution of these systems of nonlinear equations in the Mathcad mathematical package gives the desired distribution parameters (3) and (4). The solution for system (14) is: $p \approx 0,739$, $\lambda_1 \approx 3,306$, $\lambda_2 \approx 0,294$, and for system (15), the solution is: $q \approx 0,739$, $\mu_1 \approx 3,673$, $\mu_2 \approx 0,327$.

The coefficients of equation (7) for such values of the distribution parameters (3) and (4) are equal to: $d_0 \approx 0,130$; $d_1 \approx 5,172$; $d_2 \approx -0,40$, and its negative roots: $-\sigma_1 \approx -2,471$, $-\sigma_2 \approx -0,025$.

Therefore, conditions (1) and (2) for the spectral decomposition method are fulfilled (in this case we have two real negative roots and one positive root). We determine the average waiting time by the calculation formula (9): $W \approx 37,051$ units of time, which is 2.35% more than in the first case when using only two initial moments.

In [5, 6], necessary and sufficient conditions for the existence of a unique solution to systems of three equations of moments similar to systems (14) and (15) are given in the form of a constraint

$$\bar{\tau}_j^3 \cdot \bar{\tau}_j \geq 1,5 \cdot \bar{\tau}_j^2.$$

As computational experiments on this system have shown, the approximation of the distribution law at the level of the first two moments underestimates the average waiting time in the queue in the system, compared with the three-moment approximation. This can easily be explained by the difference in the distribution parameters for these two density functions, as shown by their values above. In addition to this, Fig. 1 shows their graphs to confirm this fact [8].

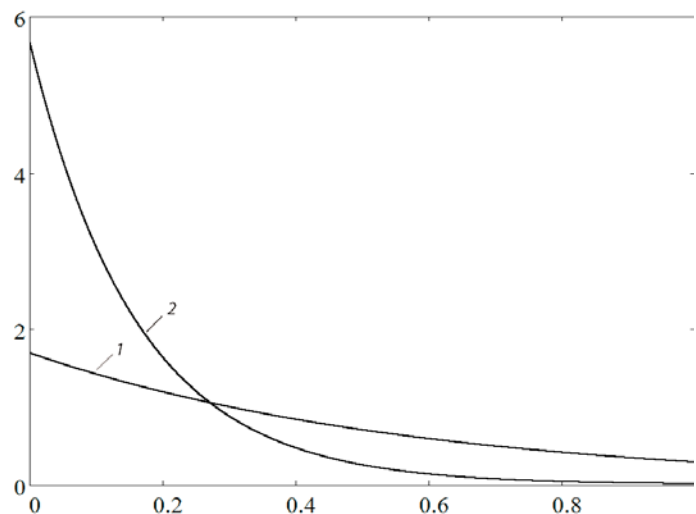


Fig. 1. Graphs of the distribution density function (4): 1 – using two initial moments; 2 – using three initial moments

Conclusions

The article presents the spectral decomposition obtained by the classical method of solving the Lindley integral equation for QS formed by two hyperexponential distributions and a solution for the average waiting time for this system. In this case, the application of the method of spectral decomposition together with numerical methods for finding the negative roots of polynomials and finding positive solutions to systems of two and three non-linear equations is successively illustrated.

It is shown that the use of the proposed approach, in addition to the average waiting time, also allows you to determine the moments of waiting time above the first. Then, through the second moment (variance) of the waiting time, it is possible to determine the jitter value in telecommunication networks as delay fluctuations around its average value. Therefore, this approach can be used in the modern theory of teletraffic as a practical application. To do this, you need to know the moment characteristics (two or three first initial moments) of the time intervals of the incoming traffic.

Because the H_2 distribution includes three parameters, it allows using the method of moments to approximately describe arbitrary input distributions using the first three initial moments. The presented method of approximating the H_2 distribution law at the level of the first two initial moments shows underestimated results in the average waiting time compared to the approximation of the H_2 distribution law using three initial moments.

References

1. Kleinrock, L. (1979). *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory] Translated by V.I. Neiman. Moscow: Mashinostroenie Publ. (in Russian)
2. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. (1995) *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory]. Moscow: RUDN Publ. (in Russian)
3. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V., Lipilina L.V. (2015) Issledovanie zaderzhki v sisteme G/G/1 [Research of the delay in G/G/1 system] *Infokommunikacionnye tehnologii*, v.13, I. 2, pp. 153-159. (in Russian)
4. Vishnevskiy V.M. (2003) *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya kompyuternykh setey* [Theoretical Foundations of Computer Network Design] M.: Tehnosfera. (in Russian)
5. Myskja A. (1991) An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and data traffic in a Period of Change, ITC-13*. Elsevier Science Publishers, pp. 683-688.
6. Whitt W. (1982) Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, v.30, no. 1, pp. 125-147.
7. <https://tools.ietf.org/html/rfc3393>. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) (accessed: 26.02.2016).
8. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V. (2016) Matematicheskaya model' teletrafika na osnove sistemy G/M/1 i rezultaty vychislitel'nykh eksperimentov [Mathematical model of teletraffic on the based G/M/1 system and results of computational experiment] *Informacionnye tehnologii*, vol. 22, no.2, pp. 121-126. (in Russian)
9. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. (2014) Vosstanovlenie momentnykh harakteristik raspredeleniya intervalov vremeni mezhdur paketami vkhodyaschego trafika [Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic] *Informacionnye tehnologii*, no.2, pp. 40-44. (in Russian)
10. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V. (2016) Avtomatizatsiya rascheta harakteristik sistem massovogo obsluzhivaniya dlya shirokogo diapazona izmeneniya ih parametrov [Automation for calculating characteristics queuing system for a wide range changing their parameters] *Informacionnye tehnologii*. no.12, pp. 952-957. (in Russian)

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ЛИНДЛИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Липилина Людмила Владимировна, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, mila199113@gmail.com

Аннотация

При исследовании трафика современных компьютерных сетей и сетей телекоммуникаций широко используются методы теории массового обслуживания. В свою очередь, в исследованиях систем массового обслуживания (СМО) типа G/G/1 с произвольными законами распределений интервалов между соседними требованиями во входном потоке и времени обслуживания, часто применяется метод спектрального разложения (МСР) решения интегрального уравнения Линдли [1-3]. В основе этого метода лежит поиск нулей и полюсов построенного спектрального разложения в виде некоторой дробно-рациональной функции с привлечением численных методов для определения корней многочленов. При этом коэффициенты многочлена в числителе разложения выражаются через неизвестные параметры используемых для описания СМО законов распределений. Обычно эти неизвестные параметры законов распределений могут быть определены через числовые характеристики анализируемого трафика известным методом моментов. Цель данной статьи заключается в подробной иллюстрации метода спектрального разложения применительно к СМО $H_2/H_2/1$ типа G/G/1 с гиперэкспоненциальными законами распределений второго порядка и его связи с задачами численного анализа. Характерной особенностью этого закона распределения является возможность его однозначного описания как на уровне двух первых моментов временных интервалов, так и на уровне трех моментов. Гиперэкспоненциальный закон распределения второго порядка H_2 обеспечивает коэффициент вариации временных интервалов $c_t \geq 1$, а начиная с четырех, закон распределения H_2 имеет тяжелый хвост, что хорошо подходит для описания трафика с тяжелохвостным распределением. Использование этого закона распределения большего порядка в методе спектрального разложения приводит к возрастанию вычислительной сложности задачи. Предлагаемый подход к использованию метода спектрального разложения позволяет определить кроме среднего времени ожидания и другие моменты времени ожидания. В стандарте по телекоммуникациям понятие джиттера определено через разброс времени ожидания вокруг его среднего значения. Тогда представленный подход применения метода спектрального разложения позволяет определить джиттер через второй момент времени ожидания.

Ключевые слова: система массового обслуживания, среднее время ожидания в очереди, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа, гиперэкспоненциальное распределение.

Литература

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. под ред. В.И. Неймана М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
2. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания: Учебник.: Изд-во РУДН, 1995. 529 с.
3. Тарасов В.Н., Карташевский И.В., Липилина Л.В. Исследование задержки в системе G/G/1 // Инфокоммуникационные технологии. Т. 13. №2. 2015. С. 153-159.
4. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
5. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683-688.
6. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research, v. 30, no.1, 1982, pp. 125-147.
7. [HTTPS://tools.ietf.org/html/rfc3393](https://tools.ietf.org/html/rfc3393). RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) (дата обращения: 26.02.2016).
8. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Математическая модель телетрафика на основе системы G/M/1 и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. Т. 22. №2. 2016. С. 121-126.
9. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии. №2. 2014. С. 40-44.
10. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Автоматизация расчета характеристик систем массового обслуживания для широкого диапазона изменения их параметров // Информационные технологии. Т. 22. №12. 2016. С. 952-957.

Информация об авторе:

Липилина Людмила Владимировна, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, аспирант кафедры ПОУТС, г. Самара, Россия

CLASSIFICATION OF PERSONAL DATA SECURITY THREATS IN INFORMATION SYSTEMS

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-56-60

Vladimir A. Dokuchaev,
MTUCI, Moscow, Russia, v.dok@tlsf.ru

Victoria V. Maklachkova,
MTUCI, Moscow, Russia, v.maklachkova@tlsf.ru

Vyacheslav Yu. Statev,
JSC "RZD", Moscow, Russia, svu@rnt.ru

Keywords: Personal Data, Information, Security, Threats, Risks, Information Systems, Classification.

The purpose of this work is to analyze and classify threats that arise when working with personal data in information systems. In the field of information technology in any country, one of the national interests is to ensure and protect the constitutional rights and freedoms of man and citizen in so far as it relates to the receipt and use of information, as well as confidentiality when using information technologies. In this regard, special attention is currently being paid to the organization of processing and ensuring the security of personal data in information systems, including during their cross-border transfer. In the European Union, this activity is regulated by the General Data Protection Regulation (GDPR), which was put into effect on May 25, 2018. Personal data are in a high-risk area, especially in organizations that operate with large amounts of personal data, such as passport data, solvency data, employers, contact details, phone numbers, addresses, email, and other information that represents interest for potential computer attacks. The solution to the problem of ensuring the security of personal data is impossible without identifying and classifying potential threats to personal data in information systems. The proposed classification can serve as the basis for a threat model of a specific information system designed to process personal data.

Information about authors:

Vladimir A. Dokuchaev, DSc (Tech), Professor, Head of the Department "Multimedia Communication Networks and Services" MTUCI, Moscow, Russia

Victoria V. Maklachkova, Senior Lecturer of the Department "Multimedia Communication Networks and Services" MTUCI, Moscow, Russia

Vyacheslav Yu. Statev, PhD, Head of the Department, JSC "RZD", Moscow, Russia

Для цитирования:

Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Статеев В.Ю. Классификация угроз безопасности персональных данных в информационных системах // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №1. С. 56-60.

For citation:

Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu. (2020) Classification of personal data security threats in information systems. *T-Comm*, vol. 14, no.1, pp. 56-60. (in Russian)

Introduction

With the development of information technology, attention and interest in the problem of privacy and the further development of the Institute of Personal Data began to significantly increase.

In the Russian Federation, one of the national interests in the information sphere is "ensuring and protecting the constitutional rights and freedoms of man and citizen in so far as it concerns the receipt and use of information, privacy in the use of information technology ...".

From this follows the attention that is currently being paid at enterprises to the organization of processing and ensuring the security of personal data, including when they are processed in information systems.

With the entry into force in May 2018 of the Global Data Protection Regulation (GDPR), personal data operators have faced new threats related to the cross-border transfer of personal data.

Personal data refers to any data that in one way or another relates to an identifiable or identifiable person. An identifiable person is a natural person that can be established directly or indirectly by reference to a certain identification number, as well as by one or more factors specific to its physiological, physical, mental, economic, cultural or social affiliation.

The subjects of personal data in the organization are employees, retirees, candidates for filling vacant posts and others. The purposes of processing personal data may be: providing services to a client of the organization, processing data in accordance with labor legislation, etc. Personal data are divided into categories such as: publicly available, special, as well as other personal data that do not fall under the first two categories.

Former or current employees of an organization at present time commit many violations of the confidentiality of personal data. This is due to the presence in companies of information systems for processing personal data, access to which are available to employees who are able to transfer confidential information to third parties. The existence of such a vulnerability in the company can significantly facilitate the ability of an attacker to obtain personal data, while making a computer attack more effective.

There are a number of mandatory measures that enterprises must take in order to "correctly" store and process personal data in the information system. The functioning of the entire business model of the activity of the personal data operator and the cost of risks associated with the processing of personal data depend on how competently the business processes for organizing automated processing of personal data are implemented.

According to company "InfoWatch" analysis, in 2018 the share of personal data leaks amounted to 80.2% of all confidential information leaks. Type of data compromised by retiring employees shown at Table 1.

Table 1

	Personal Data, %	State Secret, %	Trade Secret, %	Other, %
2017 year	47.2	2.8	36.1	13.9
2018 year	35.3	3.9	58.8	2.0

Source: company InfoWhatch

To create a model for protecting personal data, it is necessary to identify and classify potential threats to personal data in information systems.

Classification of Personal Data Threats

There are two classes of threats to personal data in information systems:

- threats that cannot be correlated with attacks;
- threats that can be correlated with attacks.

There are threats incompatible with attacks that can not only lead to the loss, distortion or compromise of the subject's personal data, but also create conditions for their use by various violators for their own purposes.

These threats include:

- threats not related to human activities: natural disasters and natural phenomena (earthquakes, floods, hurricanes, etc.);
- threats of a socio-political nature: strikes, sabotage, local conflicts, accompanied by an attack on an object that hosts information system resources, etc.;
- erroneous actions and (or) violation of requirements by personnel and users of the information system of the corresponding operational, organizational, technical or other documentation;
- threats of anthropogenic nature, for example: accidents, various malfunctions, interference and interference, leading to violations and malfunctions in the hardware components of the information system.

Protection against threats that cannot be correlated with attacks is regulated by instructions developed and approved by the authorized services of the personal data operator, taking into account the specific conditions for the functioning of the information system, as well as the current regulatory framework.

Protection against threats that can be correlated with attacks should be provided with the help of protective measures and means used by the information system and designed mainly to counter attacks.

The composition and content of security threats to personal data is determined by the combination of conditions and factors creating the danger of unauthorized, including accidental, access to personal data.

The totality of such conditions and factors is formed taking into account the characteristics of the information system, the properties of the distribution medium of informative signals containing protected information, and the capabilities of the sources of threats.

The following characteristics of an information system can cause threats for personal data:

- structure, category and amount of personal data processed in the information system;
- availability of information system connections to public communication networks and (or) the Internet;
- security subsystem characteristics and personal data processing modes;
- modes of differentiation of access rights of users of the information system;
- location and conditions of placement of technical equipment of the information system.

The main elements of the information system in which personal data is processed are:

- personal data contained in databases, as a combination of information and its sources used in the information system;
- information technology, as a set of methods and methods of using computer technology in the processing of personal data;
- software and hardware that process personal data;
- information security tools;
- additional hardware and systems.

The properties of the information distribution medium containing the protected information are characterized by the type of physical environment in which personal data is distributed, and are determined when assessing the possibility of implementing a security threat channel for personal data.

The security threat to personal data is realized as a result of the formation of channels for the implementation of a security threat to personal data between the threat source and the personal data carrier, creates the necessary conditions for violating the security of personal data.

The main elements of the channel for implementing a security risk to personal data are:

- source of threat - a subject, material object or physical phenomenon that creates a threat to the security of personal data, for example, a violator of the security of personal data, the capabilities of which with respect to the system are determined in the model of the violator;
- an environment for the distribution of personal data or influences in which a physical field, signal, data or program may be distributed and affect the protected characteristics of personal data. These characteristics include: confidentiality, integrity, accessibility;
- personal data carrier - an individual or material object, including a physical field, in which personal data are reflected in the form of symbols, images, signals, technical solutions and processes, quantitative characteristics of physical quantities.

Other security characteristics of personal data that are important to the operator, such as data authenticity, are also possible.

Personal data carriers may contain information presented in the following forms: acoustic (speech) information; textual and visual information; processed (circulating in the information system) information.

A classification of threats to the security of personal data is proposed according to the following criteria:

- by types of possible sources of security risk to personal data, caused by deliberate or unintended actions of users of the information system: with or without access to it. It should be noted that the sources of threats in relation to the information system can be both external and internal;
- by type of unauthorized actions carried out with personal data:
 - threats leading to a violation of the confidentiality of personal data (copying or unauthorized distribution), the implementation of which does not directly affect the content of the information;
 - threats leading to unauthorized, including accidental, influence on the content of information, as a result of which personal data is changed or destroyed;
 - threats leading to unauthorized, including accidental, impact on the software and hardware elements of the information system, as a result of which personal data is blocked;

- by methods of implementing a security risk to personal data:
 - threats implemented in information systems when they are connected to public communication networks;
 - threats implemented in information systems when they are connected to international information exchange networks;
 - threats implemented in information systems that do not have connections to public communication networks and the Internet.

- by type of channels for implementing a security risk to personal data:

- threats implemented through channels arising from the use of technical means to intercept information processed in the information system (technical channels for information leakage);
- threats realized due to unauthorized access to personal data in the information system using standard software or specially developed or applied software.

The implementation of any of the listed threats and (or) their combination can lead to the following consequences for the subjects of personal data:

- significant negative consequences;
- negative consequences;
- minor negative consequences.

Consider typical security threats for personal data in information system.

Threats of information leakage through technical channels:

- threats of leakage of acoustic (speech) information - in the presence of voice input functions or functions for reproducing personal data by acoustic means of an information system;
- threats to leakage of specific information - by viewing information using optical (optoelectronic) means from display screens;
- threats of information leakage due to the presence of electromagnetic radiation, mainly monitors and system units of personal computers and servers from the information system.

Threats of unauthorized access to personal data in the information system:

- threats of access (penetration) into the operating environment of computers or servers of the information system using standard software:

- realized direct access threats:
 - during and after loading the operating system;
 - due to the installation of hardware bookmarks and the introduction of malware.
- remote access threats:
 - analysis of the transmitted and received network traffic;
 - network scanning and password identification;
 - substitution of a trusted network object with or without a virtual connection;
 - the imposition of a false route and the introduction of a false network object;
 - denial of service:
 - ✓ partial and complete exhaustion of resources;
 - ✓ violation of logical connectivity between data or objects;
 - ✓ the use of errors in programs that implement network exchange protocols.
 - remote launch of applications:
 - ✓ distribution of files containing unauthorized executable code;

✓ remote launch of the application by overflowing the server application buffer or using the remote control capabilities of the system provided by hidden software and hardware bookmarks.

– introduction of malware;

➤ threats to create abnormal operating modes of software and hardware due to deliberate changes in service data, characteristics of the processed information, distortions (modifications) of the data itself, etc.;

➤ combined threats, which are a combination of the above threats.

Organizations that directly work with personal data are required to take all appropriate measures to prevent the above threats. Therefore, it is important that all departments provide security for employees with access to confidential data. The following rules must be followed.

1. Departments must protect their information systems with appropriate technology. They must be sure that this technology is working in an appropriate condition, sufficient to counter emerging threats.

2. Departments need to identify cases of unauthorized access (internal or external). It is also necessary to identify the addition, deletion and editing of data. To identify this kind of action, audit logs should be used, in which information about the similar state of the information system will be recorded. Information systems containing personal data in which they do not record information about the available viewing or reading conditions need to be investigated and immediately corrected. Departments must take into account external influences on the performance of this system. If this functionality cannot be enabled, and there is a risk of unauthorized access to personal data, then a decision should be made on changing the architecture or functionality of the information system for processing personal data.

3. Access to files that contain personal data should be constantly monitored. Organization staff should be informed of this.

To maintain this observation, it may be necessary to create additional information systems.

Conclusion

This list of threats underlies the threat model of a specific information system for processing personal data and having connections to public communication networks and (or) the Internet.

References

1. Dokuchaev V.A., Gorban E.V., Maklachkova V.V. (2019). The system of indicators for risk assessment in high-loaded infocommunication systems. *IEEE. Conference proceedings "2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications"*.
2. Dokuchaev V.A., Gorban E. V., Maklachkova V.V. (2018). Architecture of the Regional Transport Navigation and Information Systems". *IEEE. Conference proceedings "2018 System of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications"*.
3. Vladimirova K.S., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V. (2018). Classification of personal data subject to automated processing". *XVI International Scientific and Practical Conference "Actual problems and prospects economic development"*. Simferopol-Gurzuf, October 19-21, 2018.
4. Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V. (2017). Risk analysis for personal data processing in the enterprise information system". *XVI International Scientific and Practical Conference "Actual problems and prospects economic development"*. Simferopol-Gurzuf, October 19-21, 2017.
5. Dokuchaev V.A., Mitenkov S.S., Statev V.Y. (2017). Audit and risk management in corporate information and communication systems". *XVI International scientific and practical conference "Actual problems and prospects economic development"* (Simferopol-Gurzuf, October 19-21, 2017), pp. 37-38.
6. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines.

КЛАССИФИКАЦИЯ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Докучаев Владимир Анатольевич, МТУСИ, Москва, Россия, v.dok@tlsf.ru
Маклачкова Виктория Валентиновна, МТУСИ, Москва, Россия, v.maklachkova@tlsf.ru
Статьев Вячеслав Юрьевич, ОАО "РЖД", Москва, Россия, svu@rnt.ru

Аннотация

Целью данной работы является анализ и классификация угроз, возникающих при работе с персональными данными в информационных системах. В сфере информационных технологий в любой стране одним из национальных интересов является обеспечение и защита конституционных прав и свобод человека и гражданина в части, касающейся получения и использования информации, неприкосновенности частной жизни при использовании информационных технологий. В связи с этим в настоящее время уделяется особое внимание вопросам организации обработки и обеспечения безопасности персональных данных в информационных системах, в том числе, при их трансграничной передаче. В Европейском союзе данная деятельность регламентируется Общим регламентом по защите данных (General Data Protection Regulation, GDPR), вступившим в силу 25 мая 2018 г. Персональные данные находятся в зоне повышенного риска, особенно в организациях, которые работают с большими объемами персональных данных, таких как паспортные данные, данные о платежеспособности, работодатели, контактные данные, номера телефонов, адреса, электронная почта и другая информация, представляющая интерес для потенциальных компьютерных атак. Решение задачи обеспечения безопасности персональных данных невозможно без определения и классификации потенциальных угроз персональным данным в информационных системах. Предлагаемая классификация может быть положена в основу модели угроз конкретной информационной системы, предназначенной для обработки персональных данных.

Ключевые слова: персональные данные, информация, безопасность, угрозы, риски, информационные системы, классификация.

Литература

1. Dokuchaev V.A., Gorban E.V., Maklachkova V.V. The system of indicators for risk assessment in high-loaded infocommunication systems // IEEE. Conference proceedings "2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications", 2019.
2. Dokuchaev V.A., Gorban E.V., Maklachkova V.V. Architecture of the Regional Transport Navigation and Information Systems // IEEE. Conference proceedings "2018 System of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications", 2018.
3. Владимирова К.С., Докучаев В.А., Маклачкова В.В. Классификация персональных данных, подлежащих автоматизированной обработке. Труды XVI Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития экономики". (Симферополь-Гурзуф, 19-21 октября 2018).
4. Докучаев В.А., Маклачкова В.В. Анализ рисков при работе с персональными данными в информационной системе предприятия. Труды XVI Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития экономики". (Симферополь-Гурзуф, 19-21 октября 2017).
5. Докучаев В.А., Мытеньков С.С., Статьев В.Ю. Аудит и управление рисками в корпоративных инфокоммуникационных системах. Труды XVI Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития экономики". (Симферополь-Гурзуф, 19-21 октября 2017). С. 37-38.
6. Владимирова К.С., Докучаев В.А., Маклачкова В.В. Классификация персональных данных, подлежащих автоматизированной обработке. Труды XVI Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы и перспективы развития экономики". (Симферополь-Гурзуф, 19-21 октября 2018).
7. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines.

Информация об авторах:

Докучаев Владимир Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой МСиУС МТУСИ, Москва, Россия

Маклачкова Виктория Валентиновна, старший преподаватель МТУСИ, Москва, Россия

Статьев Вячеслав Юрьевич, к.т.н., с.н.с., начальник отдела ОАО "РЖД", Москва, Россия