



Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Соm: Телекоммуникации и транспорт"

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобразования 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", 2023

Адрес редакции и издателя

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная,
д. 8, стр. 1, офис 323

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; EBSCO; elibrary.ru (РИНЦ)
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

ISSN 2072-8743 (Online) ISSN 2072-8735 (Print)

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", 2023

Editorial and Publisher Address

111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str. 8, bloc 1, office 323

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

T - С о m

Телекоммуникации и транспорт
ТОМ 17. №3-2023

Дата выхода: 27.03.2023 г.

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

Учредитель
ООО "Издательский дом Медиа Паблишер"

Главный редактор
Тихвинский Валерий Олегович

Издатель
Дымкова Светлана Сергеевна
ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

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

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

Бугаев Александр Степанович
(академик РАН), Россия

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

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

Головачев Юлиус
(управляющий консультант Detecon 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 Detecon), Силиконовая долина, США

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

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

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

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

Самойлов Александр Георгиевич
(д.т.н., профессор Владимираского 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

Чирев 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

Долгопятова А.В., Варламов О.В.

Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режимах с переключением тока и мостовым

4

СВЯЗЬ

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф.

Имитационное моделирование систем массового обслуживания на основе составных распределений – вероятностных смесей

14

Татарникова Т.М., Миклуш В.А.

Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети

20

Аль-Дулаими Омар Хатем Заидан

Использование алгоритма вероятностной нейронной сети для измерения уровня качества образования

27

ИНФОРМАТИКА

Гураль Д.А.

Методика оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве

34

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Дворников С.С., Жеглов К.Д., Дворников С.В.

Однополосно модулированный сигнал с контролированным уровнем остатка несущей

41

СВЯЗЬ

Канаев А.К., Опарин Е.В., Опарина Е.В.

Идентификация состояний системы синхронизации на основе её энтропийного анализа

48

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Dolgopyatova A.V., Varlamov O.V.
Intermodulation distortion in current mode
and bridge class D switching amplifiers with resistive load 4

COMMUNICATIONS

- Tarasov V.N., Bakhareva N.F.
Simulation modeling of queuing systems based on composite distributions - probabilistic mixtures 14
- Tatarnikova T.M., Miklush V.A.
Simulation model of a peer-to-end wireless sensor network 20
- Al-Dulaimi Omar Hatem Zaidan
Using a probabilistic neural network algorithm to measure the level of education quality 27

COMPUTER SCIENCE

- Gural D.A.
Methodology for assessing the efficiency of information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth space 34

PUBLICATIONS IN ENGLISH

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

- Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V.
SSB signals with controlled pilot level 41

COMMUNICATIONS

- Kanaev A.K., Oparin E.V., Oparina E.V.
Identification of the states of the synchronization system based on its entropy analysis 48

T - C o m m
Telecommunications and transport
Volume 17. No. 3-2023

Release date: 27.03.2023

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

Artem S. Adzhemov
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

Alexander P. Anyutin
Doctor of sciences, Professor, member of the program and organizing committee WSEAS, Russia, Mexico

Alexander S. Bugaev
Academician of the RAS, Russia

Corbett Rowell
Full Professor: Electronic & Electrical Engineering Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA

Denis S. Chirov
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Vladimir G. Danilov
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

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

Julius Golovachyov
Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

Andrey Grebenников
Ph.D., Sumitomo Electric Europe, United Kingdom

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

Tatyana A. Kuzovkova
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Georgii A. Omel'yanov
Doctor of sciences, Universidad de Sonora, Department of Mathematics, Hermosillo, Mexico

Alexander G. Samoilov
Doctor of sciences, VLSU, Russia

Michael Sharpe
PhD, European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

Sergey S. Shavrin
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Nikolai N. Sysoev
Doctor of sciences, Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University. Lomonosov, Russia

Oleg V. Varlamov
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

Albert Waal
Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany

Marina V. Yashina
Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

Andrey A. Yelizarov
Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

Yuri B. Zubarev
Doctor of sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Russia

ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В КЛЮЧЕВЫХ ГЕНЕРАТОРАХ КЛАССА D С РЕЗИСТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ В РЕЖИМАХ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ТОКА И МОСТОВОМ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-4-13

Долгопятова Анна Вячеславовна,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, anna793@yandex.ru

Варламов Олег Витальевич,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия, vov@mtuci.ru

Manuscript received 15 February 2022;
Accepted 05 March 2023

Ключевые слова: интермодуляционные искажения, ключевой усилитель мощности, класс D, схема с переключением тока, мостовая схема, интегратор вещей, 5G

Статья является продолжением рассмотрения темы анализа интермодуляционных искажений (в англоязычной научно-технической литературе: reverse intermodulation distortions – RIMD) в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой. Аналогично подходу, использованному для схемы с переключением напряжения (ПН) в предыдущей работе авторов, проводится теоретический анализ обратных интермодуляционных искажений в ключевых усилителях мощности класса D с переключением тока (ПТ) и в мостовой схеме. Для обеих конфигураций записаны выражения для выходного спектра и рассмотрены зависимости интермодуляционных искажений от неидеальностей параметров элементов и режимов работы. Проведенное сравнение всех трех конфигураций ключевых генераторов с резистивной нагрузкой при обеспечении уровня интермодуляционных искажений, не превышающего величины минус 70 дБ, показало, что схема ключевого генератора с переключением напряжения предъявляет наиболее жесткие требования по всем влияющим параметрам. В ней разброс сопротивлений насыщения ключей не должен превышать 20%, а суммарное отклонение времени насыщения ключей в любых комбинациях не должно превышать 0,01, что составляет 2% от 0,5Т (от Пи). Схема ключевого генератора с переключением тока допускает аналогичное отклонение времени насыщения ключей, но искажения в ней не зависят от разницы сопротивлений насыщения ключей. Мостовая схема ключевого генератора допускает 70%-ю разницу в сопротивлении насыщения ключей. Допустимое суммарное отклонение времени насыщения зависит от режима работы и составляет 2,4% при перекрытии и 18% при недокрытии. Проведенное исследование позволяет разработчикам высокоеффективных ключевых генераторов учитывать еще один параметр – устойчивость к наведенным электромагнитным излучениям, помимо общепринятых достижимых значений КПД, пик-факторов по току и напряжению и устойчивости к рассогласованию нагрузки.

Информация об авторах:

Долгопятова Анна Вячеславовна, инженер, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9718-080X>. Scopus Author ID: 57208836753

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>. Scopus Author ID: 6602830358. ResearcherID: N-3076-2013

Для цитирования:

Долгопятова А.В., Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режимах с переключением тока и мостовым // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 4-13.

For citation:

Dolgopyatova A.V., Varlamov O.V. (2023) Intermodulation distortion in current mode and bridge class D switching amplifiers with resistive load. *T-Comm*, vol. 17, no.3, pp. 4-13. (in Russian)

I. Введение

Данная статья является продолжением рассмотрения темы анализа интермодуляционных искажений (в англоязычной научно-технической литературе: reverse intermodulation distortions – RIMD) в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой, начатой в [1, 2]. Интермодуляционные искажения возникают при воздействии на нелинейную выходную характеристику активного усилительного прибора оконечного каскада усилителя мощности относительно близкого по частоте сигнала от передатчика другого радиосредства, наведенного через antennу и прошедшего через избирательные элементы выходной колебательной системы. Все усилительные приборы принципиально нелинейны.

Более того, для повышения КПД, в оконечном каскаде, на который и воздействует внешний мешающий сигнал, как правило, используются режимы работы с отсечкой (классы B, C, D, E, F). Данное обстоятельство создает предпосылки для возникновения интермодуляционных искажений. В отличие от комбинационных искажений, возникающих при усилении многочастотного полезного сигнала, интермодуляционные искажения, обусловленные внешним сигналом, могут возникать и при усилении одночастотного полезного сигнала. Уровень комбинационных искажений определяется линейностью проходной амплитудной характеристики и неравномерностью фазоамплитудной характеристики (AM/AM и AM/PM в англоязычной литературе). В отличие от этого, уровень интермодуляционных искажений определяется линейностью выходной характеристики оконечного каскада. Напомним, что в [1, 2] рассматривались интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения (Voltage Mode Class D – VMCD). Режим с переключением напряжения (ПН) возможен при длительности этапов насыщения активных приборов меньше 180 градусов (меньше половины периода, так называемый режим "недокрытия"). При времени насыщения больше 180 градусов (более половины периода, так называемый режим "перекрытия") в схеме с ПН возникают сквозные токи, которые в общем случае приводят к резкому снижению КПД, а при применении современных быстродействующих приборов с малым сопротивлением насыщения – к недопустимой перегрузке по току и выходу приборов из строя.

Режим с переключением напряжения имеет свои известные преимущества [3], такие как эффективное шунтирование нагрузки низким выходным сопротивлением [4-6], возможность непосредственного сложения мощностей нескольких усилителей [7], построения мощного высокочастотного ЦАПа [8], и возможность быстрого отклика на изменение напряжения питания, что обуславливает его широкое применение в высокоэффективных усилителях мощности с раздельным усилением составляющих [9-20], используемых, в том числе, для организации сетей цифрового радиовещания [21-23].

Однако в ряде применений, в том числе на повышенных рабочих частотах, обеспечение времени насыщения меньше 180 градусов становится проблематичным. Связано это в первую очередь с тем, что, как правило, время выключения активного прибора больше, чем время его включения, и для исключения появления сквозных токов в схеме с ПН воз-

буждение осуществляется специально сформированными укороченными импульсами. Данная проблема не возникает при использовании ключевых генераторов (КГ) в мостовой схеме, в которой допустима длительность этапа насыщения как меньше, так и больше 180 градусов, а также в схеме с переключением тока (ПТ), работающей при времени насыщения больше 180 градусов (в режиме "перекрытия") [24]. Отметим, что схема с переключением тока, зеркально относительно схемы с переключением напряжения, не допускает работы в режиме "недокрытия" – при длительности этапов насыщения активных приборов меньше 180 градусов. В этом случае возникает прерывание тока в индуктивности цепи питания и соответствующий законам коммутации выброс напряжения на ней, приводящий к выходу приборов из строя.

В схеме с ПТ отсутствуют коммутативные потери на фронтах импульсов, что теоретически позволяет получить больший КПД на высоких частотах. Однако наличие индуктивности в цепи питания уменьшает скорость отклика на изменение его напряжения, что потенциально может ограничивать применение схемы с ПТ в высокоэффективных усилителях мощности с раздельным усилением составляющих. Это ограничение относится к ширине полосы модулирующих частот, которая, оценочно, может составлять не более 1-2% от частоты несущей, даже при "встраивании" индуктивности цепи питания в последний элемент фильтра низких частот ШИМ модулятора тракта огибающей. Тем не менее, возможность использования схемы с ПТ существует как в диапазоне ВЧ (3-30 МГц), в котором ширина полосы модулирующих частот, как правило, не превышает 10 кГц, так и в диапазонах более 2 ГГц, в том числе для относительно низкоскоростных приложений интернета вещей, где КПД передающего тракта играет решающую роль для обеспечения требуемого срока работоспособности 10 лет от одного комплекта источников электропитания [3].

Экспериментальное исследование интермодуляционных искажений в ключевом усилителе мощности класса D с переключением тока (Current Mode Class D – CMCD) описано в [25]. Библиографический поиск [26] теоретических исследований интермодуляционных искажений в схемах с переключением тока (ПТ) и мостовой результатов не выявил, что подтверждает актуальность темы исследования.

В статье аналогично подходу, использованному для схемы с переключением напряжения (ПН) в [1, 2], проводится теоретический анализ обратных интермодуляционных искажений в ключевых усилителях мощности класса D с переключением тока (разделы II, III) и в мостовой схеме (разделы IV, V). Для обеих конфигураций записаны выражения для выходного спектра и рассмотрены зависимости интермодуляционных искажений (RIMD) от неидеальностей параметров элементов и режимов работы. В разделе VI проводится сравнение всех трех режимов работы, и формулируются выводы.

II. Вывод выражений для анализа в схеме с переключением тока

Вводные замечания и объяснения для анализа изложены в [1, раздел II, рис. 1, 2] и здесь не повторяются. Эквивалентная схема ключевого генератора с переключением тока (ПТ) с целью подачи внешней ЭДС приведена на рисунке 1а.

Как известно [24], для обеспечения максимальных энергетических показателей и надежности работы схемы необходимо поддерживать нормированную длительность этапа насыщения каждого ключа $\tau'_{sat} \geq 0,5$.

На рисунке 1б и 1в приведены эквивалентные схемы ключевого генератора с переключением тока для всех возможных сочетаний положений ключей SW1 и SW2.

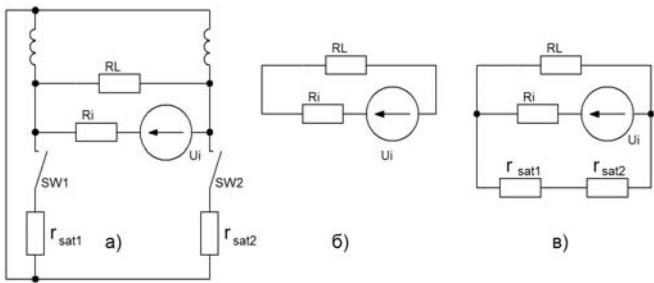


Рис. 1. Эквивалентные схемы ключевого генератора с переключением тока: а – общая; (б), (в) – для всех возможных комбинаций положений ключей SW1 и SW2

Составим выражения, описывающие амплитуду тока мешающего сигнала в нагрузке для каждого из этапов работы схемы:

$$I_{m1} = I_{m2} = \frac{U_i}{R_L + R_i}, \quad (1)$$

$$I_{m3} = \frac{U_i(r_{on1} + r_{on2})}{R_i R_L + R_i(r_{on1} + r_{on2}) + R_L(r_{on1} + r_{on2})}. \quad (2)$$

Эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке для ключевого генератора с переключением тока приведены на рисунке 2.

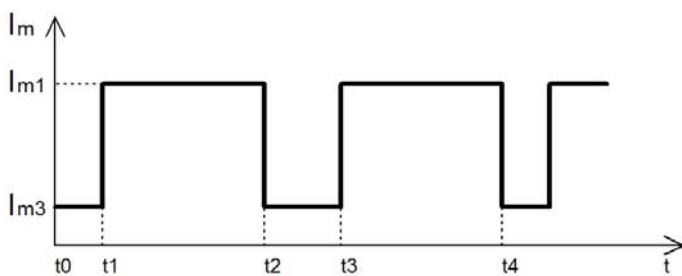


Рис. 2. Эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке для ключевого генератора с переключением тока

$$\text{Здесь } t_0 = 0; t_1 = \tau_{sat2} - \frac{T}{2}; t_2 = \frac{T}{2}; t_3 = \tau_{sat1}; t_4 = T.$$

Полагая для простоты $U_i = 1$ и проведя преобразование Фурье над сигналом, изображенным на рисунке 2, получим:

$$I_m(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_{1n} \cos n\omega t + B_{2n} \sin n\omega t). \quad (3)$$

Здесь:

$$B_0 = I_{m3}(\tau'_{sat1} + \tau'_{sat2} - 1) + I_{m1}(2 - \tau'_{sat1} + \tau'_{sat2}), \quad (4)$$

$$B_{1n} = \frac{(-1)^n I_{m3}}{n\pi} \sin 2n\pi\tau'_{sat2} - \frac{(-1)^n I_{m1}}{n\pi} \sin 2n\pi\tau'_{sat2} + \\ + \frac{I_{m3}}{n\pi} \sin 2n\pi\tau'_{sat1} - \frac{I_{m1}}{n\pi} \sin 2n\pi\tau'_{sat1}, \quad (5)$$

$$B_{2n} = \frac{I_{m3}}{n\pi} - \frac{(-1)^n I_{m3}}{n\pi} \cos 2n\pi\tau'_{sat2} - \frac{(-1)^n I_{m1}}{n\pi} + \\ + \frac{(-1)^n I_{m1}}{n\pi} \cos 2n\pi\tau'_{sat2} + \frac{(-1)^n I_{m3}}{n\pi} - \\ - \frac{I_{m3}}{n\pi} \cos 2n\pi\tau'_{sat1} - \frac{I_{m1}}{n\pi} + \frac{I_{m1}}{n\pi} \cos 2n\pi\tau'_{sat1} \quad (6)$$

где $\tau'_{sat1} = \tau_{sat1} / T$ – нормированная длительность этапа насыщения ключа SW1; $\tau'_{sat2} = \tau_{sat2} / T$ – нормированная длительность этапа насыщения ключа SW2.

Выражение, описывающее обусловленный наведенной ЭДС ток в нагрузке, можно записать как:

$$I(t) = B_0 \cos \omega_i t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{1n}}{2} \cos(n\omega \pm \omega_i)t + \\ + \frac{B_{2n}}{2} \sin(n\omega \pm \omega_i)t \quad (7)$$

Интермодуляционные искажения представим как:

$$I_i(t) = \frac{1}{2} \sqrt{B_{1n}^2 + B_{2n}^2} \cos(n\omega \pm \omega_i)t. \quad (8)$$

Тогда уровень интермодуляционных искажений запишется следующим образом:

$$K_{in} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{B_{1n}}{I_{m1}} \right)^2 + \left(\frac{B_{2n}}{I_{m1}} \right)^2}. \quad (9)$$

После соответствующих преобразований получим окончательное выражение, описывающее уровни интермодуляционных искажений в ключевом генераторе с переключением тока:

$$K_{in} = \frac{(1-C)}{2n\pi} \sqrt{\left[(-1)^n \sin 2n\pi\tau'_{sat2} + \sin 2n\pi\tau'_{sat1} \right]^2 + \\ + \left[1 + (-1)^n - (-1)^n \cos 2n\pi\tau'_{sat2} - \right. \\ \left. - \cos 2n\pi\tau'_{sat1} \right]^2} \quad (10)$$

Здесь:

$$C = \frac{r'_{on\Sigma} + r'_{on\Sigma} R'_i}{R'_i + R' r'_{on\Sigma} + r'_{on\Sigma}},$$

где $r'_{on\Sigma} = \frac{r_{on1} + r_{on2}}{R_L}$ – нормированные сопротивления насыщения ключей.

В выражение (10) сопротивления r'_{on} входят только в виде суммы, откуда следует, что искажения не зависят от различия в величинах r'_{on}

III. Расчет искажений в схеме с переключением тока

Рассмотрим идеальный случай работы схемы, когда $\tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} = 0,5$.

Подставляя в выражение (10), убеждаемся, что искажения здесь также, как и в схеме с переключением напряжения [1], отсутствуют.

Исследуем случай работы подобранных по параметрам транзисторов $\tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} \neq 0,5$.

Подставляя эти параметры в выражение (10), получаем:

$$K_{in} = \frac{(C-1)[(-1)^n + 1]}{2n\pi} \sqrt{2 - 2 \cos 2n\pi\tau'_{sat}}. \quad (11)$$

Из этой формулы следует, что искажения по нечетным n будут отсутствовать. Искажений по четным n не будет при $\tau'_{sat} = K/n$, где $K = 0; \pm 2; \pm 4; \dots$. Максимальную величину искажения будут иметь при $\tau'_{sat} = (2K+1)/2n$.

Сравнивая выражение (11) с [1, (13)], убеждаемся, что они одинаковы, поэтому график искажений будет аналогичен графику [1, рис. 5], а свойства схем с переключением напряжения (ПН) и с переключением тока (ПТ) при этих условиях одинаковы.

Рассмотрим более сложный случай. Пусть $\tau'_{sat} = \tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} \neq 0,5$. Рассчитанный график приведен на Рис. 3. Здесь появляются искажения только по четным n , которые сильно зависят от τ'_{sat} и слабо зависят от $r'_{on\Sigma}$. Так, для достижения уровня интегральных искажений $K_{in} \leq -70 \text{ dB}$, допустимое отклонение времени насыщения не должно превышать $\tau'_{sat} \leq 0,505$.

При неравном времени насыщения ключей $\tau'_{sat1} \neq \tau'_{sat2}$ возникают искажения и по четным, и по нечетным n . Приведенные на рисунке 4 результаты расчетов показывают, что уровень интегральных искажений сильно зависит от $\Delta\tau'_{sat}$ и слабо зависит от $r'_{on\Sigma}$.

Как следует из рисунков 3 и 4, для обеспечения уровня интегральных искажений не более минус 70 дБ, суммарное отклонение времени насыщения в любых сочетаниях не должно превышать 0,01.

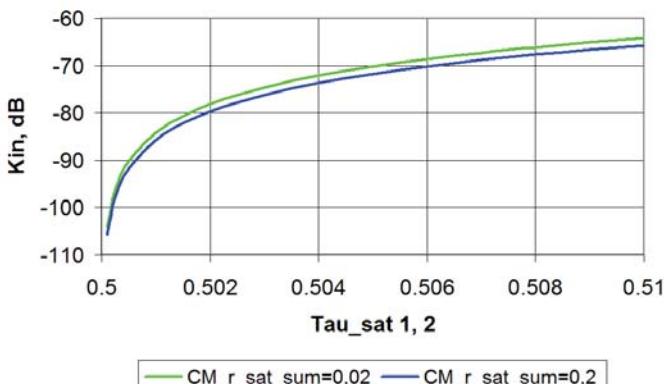


Рис. 3. Зависимость интегральных искажений (RIMD) для ключевого генератора с переключением тока от времени насыщения ключей при $\tau'_{sat} = \tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} \neq 0,5$.

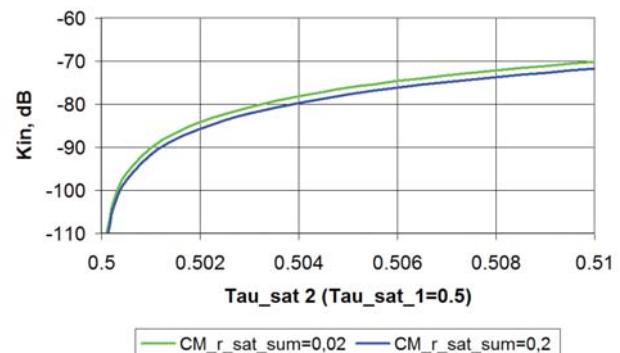


Рис. 4. Зависимость интегральных искажений (RIMD) для ключевого генератора с переключением тока от времени насыщения ключей при $\tau'_{sat1} \neq \tau'_{sat2}$

IV. Анализ мостовой схемы

Эквивалентная схема мостового ключевого генератора с цепью подачи внешней ЭДС приведена на рисунке 5а. Поскольку для мостовой схемы нет ограничений на выбор длительности этапов насыщения ключей τ_{sat} , то на рисунке 5б-д приведены эквивалентные схемы для всех сочетаний положения ключей SW1 и SW2.

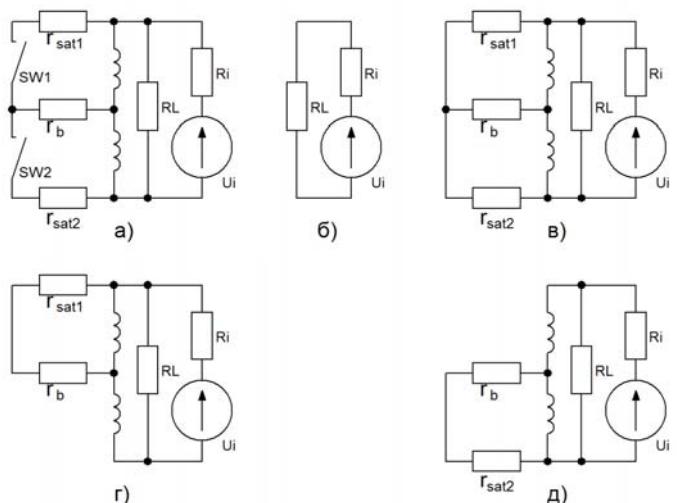


Рис. 4. Эквивалентные схемы ключевого генератора с мостовой схемой: а – общая; (б), (в), (г), (д) – для всех возможных комбинаций положений ключей SW1 и SW2

Выражения для амплитуды тока мешающего сигнала в нагрузке для всех этапов работы схемы можно представить в виде:

$$I_{m1} = \frac{U_i}{R_L + R_i}; \quad (12)$$

$$I_{m2} = \frac{U_i}{R_L} \left[\frac{1}{1 + R_i \left(\frac{1}{R_L} + \frac{r_{on1} + r_{on2} + 4R_b}{4R_b r_{on1} + 4r_{on1} r_{on2} + 4R_b r_{on2}} \right)} \right]; \quad (13)$$

$$I_{m3} = \frac{U_i}{R_L} \left[\frac{1}{1 + \frac{R_L R_i + 4R_i(R_b + r_{on1})}{4R_L(R_b + r_{on1})}} \right]; \quad (14)$$

$$I_{m4} = \frac{U_i}{R_L} \left[\frac{1}{1 + \frac{R_L R_i + 4R_i(R_b + r_{on2})}{4R_L(R_b + r_{on2})}} \right]; \quad (15)$$

В мостовой схеме, в отличие от предыдущих, могут быть три сочетания длительностей этапа насыщения ключей:

1. $\tau_{sat1} \leq \pi; \tau_{sat2} \leq \pi$,
2. $\tau_{sat1} \geq \pi; \tau_{sat2} \geq \pi$,
3. $\tau_{sat1} \leq \pi; \tau_{sat2} \geq \pi$.

Для всех этих случаев аналитические выражения получаются разные, поэтому необходимо отдельно рассмотреть каждый из этих случаев.

На Рис. 6 приведены эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора для случая $\tau_{sat1} \leq \pi; \tau_{sat2} \leq \pi$.

Здесь $t_0 = 0; t_1 = \tau_{sat1}; t_2 = \frac{T}{2}; t_3 = \frac{T}{2} + \tau_{sat2}; t_4 = T$.

Проведя преобразования, подобные разделам 2 и 3, можно написать окончательное выражение для определения уровня интегральных искажений в мостовой схеме для случая $\tau_{sat1} \leq \pi$ и $\tau_{sat2} \leq \pi$:

$$K_{in} = \frac{1}{2n\pi} \sqrt{\left[(C_2 - 1) \sin 2n\pi\tau'_{sat1} + (C_3 - 1)(-1)^n \sin 2n\pi\tau'_{sat2} \right]^2 + \left[C_2 - 1 + (-1)^n (C_3 - 1) + (1 - C_2) \cos 2n\pi\tau'_{sat1} + (1 - C_3)(-1)^n \cos 2n\pi\tau'_{sat2} \right]^2}, \quad (16)$$

где $C_2 = \frac{R_b + r_{on1} + R_i R_b + R_i r_{on1}}{R'_b + r'_{on1} + 0,25R'_i + R'_i R'_b + R'_i r'_{on1}}$,

$C_3 = \frac{R'_b + r'_{on2} + R'_i R'_b + R'_i r'_{on2}}{R'_b + r'_{on2} + 0,25R'_i + R'_i r'_{on2} + R'_i R'_b}$.

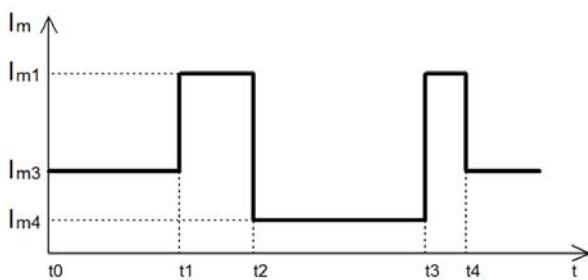


Рис. 5. Эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора для случая $\tau_{sat1} \leq \pi; \tau_{sat2} \leq \pi$

Эпюры амплитуды тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора для случая $\tau_{sat1} \geq \pi; \tau_{sat2} \geq \pi$, приведены на рисунке 7, а выражение, описывающее интегральные искажения, выглядит как:

$$K_{in} = \frac{1}{2n\pi} \sqrt{\left[(C_1 - C_2)(-1)^n \sin 2n\pi\tau'_{sat2} + (C_1 - C_3) \sin 2n\pi\tau'_{sat1} \right]^2 + \left[C_1 - C_3 + (-1)^n (C_1 - C_2) + (C_2 - C_1)(-1)^n \cos 2n\pi\tau'_{sat2} + (C_3 - C_1) \cos 2n\pi\tau'_{sat2} \right]^2}, \quad (17)$$

где

$$C_1 = \frac{R'_b r'_{on1} + r'_{on1} r'_{on2} + R'_b r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on1} + R'_i r'_{on1} r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on2} + R'_i r'_{on1} + R'_i R'_b r'_{on1} + R'_i r'_{on1} r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on2} + \frac{R'_i r'_{on1}}{4} + \frac{R'_i r'_{on2}}{4} + R'_i R'_b}{R'_b r'_{on1} + r'_{on1} r'_{on2} + R'_b r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on1} + R'_i r'_{on1} r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on2} + R'_i r'_{on1} + R'_i R'_b r'_{on1} + R'_i r'_{on1} r'_{on2} + R'_i R'_b r'_{on2}}.$$

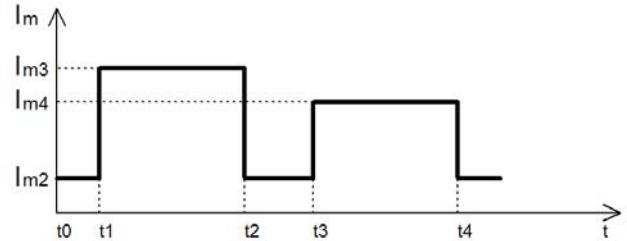


Рис. 6. Эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора для случая $\tau_{sat1} \geq \pi; \tau_{sat2} \geq \pi$

Для случая $\tau_{sat1} \leq \pi$ и $\tau_{sat2} \geq \pi$ эпюры амплитуды тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора приведены на рисунке 8, а выражение для уровня интегральных искажений записывается в виде:

$$K_{in} = \frac{1}{2n\pi} \sqrt{\left[C_2(-1)^n \cos 2n\pi\tau'_{sat2} - C_2 \cos 2n\pi\tau'_{sat1} + C_1 - C_1(-1)^n \cos 2n\pi\tau'_{sat2} + \cos 2n\pi\tau'_{sat1} + C_3(-1)^n - C_3 - (-1)^n \right]^2 + \left[C_1(-1)^n \sin 2n\pi\tau'_{sat2} + C_2 \sin 2n\pi\tau'_{sat1} + C_2(-1)^n \sin 2n\pi\tau'_{sat2} - \sin 2n\pi\tau'_{sat1} \right]^2}. \quad (18)$$

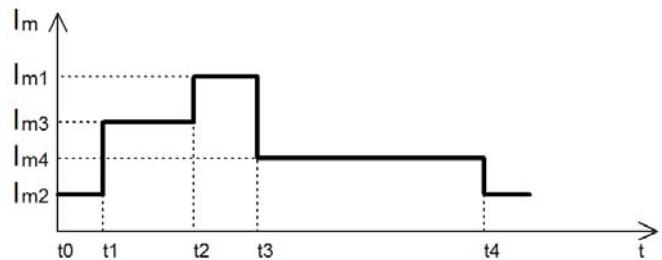


Рис. 7. Эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке мостового ключевого генератора для случая $\tau_{sat1} \leq \pi$ и $\tau_{sat2} \geq \pi$

Следует отметить, что данное сочетание представляет собой теоретическую абстракцию, поскольку на практике, при реализации двухтактных схем, они работают в симметричном режиме. Далее такая комбинация рассматриваться не будет.

V. Расчет искажений в мостовой схеме

Анализ случая идеальной работы ключей ($\tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} = 0,5; r'_{on1} = r'_{on2}$) показывает, что в мостовой схеме ключевого генератора интегральные искажения, также как и во всех остальных конфигурациях, будут отсутствовать.

Результаты расчета интермодуляционных искажений в мостовой схеме при $\tau'_{sat} = \tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} = 0,5$ и $r'_{on1} \neq r'_{on2}$ приведены на рисунке 9. Искажения по четным n в этих условиях отсутствуют, а по нечетным n сильно зависят от $\Delta r'_{on} = (r'_{on1} - r'_{on2}) / r'_{on1}$. При этом требования на допустимый разброс сопротивления насыщения ключей очень мягкие. Для получения уровня интермодуляционных искажений, не превышающих -70 dB, даже при относительно большом сопротивлении насыщения ($r_{on} = 0.1R_L$), достаточно обеспечить различие в r'_{on} не более 70%.

Мостовая схема, за счет стабилизирующего действия балластной нагрузки, занимает промежуточное положение между схемой с переключением напряжения, допускающей 20% разброс в сопротивлении насыщения ключей [1, 2], и рассмотренной выше схемой с переключением тока, в которой интермодуляционные искажения не зависят от разницы в сопротивлениях насыщения ключей, а определяются их суммарным значением.

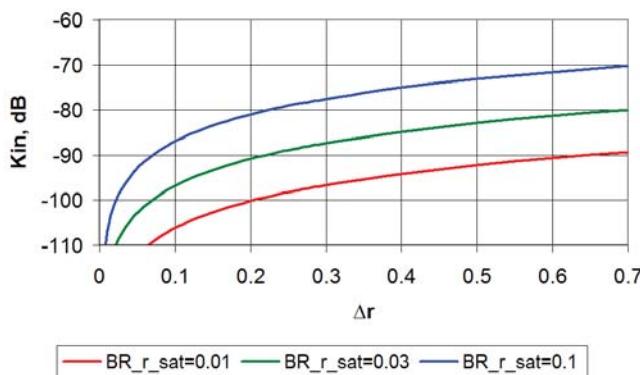


Рис. 8. Зависимость интермодуляционных искажений (RIMD) мостового ключевого генератора от разности сопротивлений насыщения транзисторов $\Delta r'_{on} = (r'_{on1} - r'_{on2}) / r'_{on1}$ для различных r'_{on1}

Рисунок 10 отражает результаты расчета интермодуляционных искажений в мостовой схеме для случая, когда $\tau'_{sat} = \tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} \neq 0,5$. Здесь присутствуют искажения как по четным, так и по нечетным n , если $\Delta r'_{on} \neq 0$.

Искажения по четным n зависят от τ'_{sat} и мало зависят от r'_{on} и $\Delta r'_{on}$, а искажения по нечетным n зависят только от r'_{on} и $\Delta r'_{on}$. Здесь ярко проявляется разная чувствительность схемы к наведенной ЭДС при недокрытии и при перекрытии. Так, для обеспечения $K_{in} \leq -70 dB$ при недокрытии необходимо обеспечить $\tau'_{sat} \geq 0,46$ (т.е. отклонение от $\tau'_{sat} = 0,5$ не более 8%), а при перекрытии нужно $\tau'_{sat} \leq 0,506$ (т.е., не более 1,2%). Это объясняется различным влиянием R_b при недокрытии и перекрытии (см. рис. 5б-д).

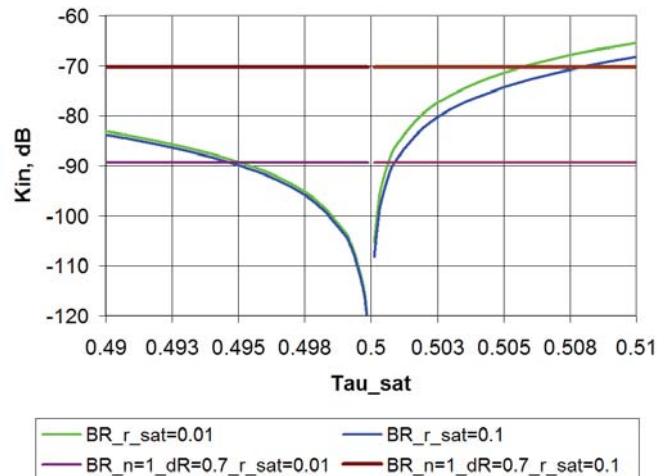


Рис. 9. Зависимость интермодуляционных искажений (RIMD) мостового ключевого генератора от времени насыщения ключей при $\tau'_{sat} = \tau'_{sat1} = \tau'_{sat2} \neq 0,5$.

Результаты расчета K_{in} для случая $\tau'_{sat2} \neq \tau'_{sat1} = 0,5$ приведены на рисунке 11. Здесь также присутствуют искажения как по четным, так и по нечетным n . Уровни K_{in} по четным n сильно зависят от $\Delta \tau'_{sat}$ и слабо зависят от $\Delta r'_{on}$, а по нечетным n зависят как от $\Delta \tau'_{sat}$, так и от r'_{on} и $\Delta r'_{on}$.

В мостовой схеме чувствительность к наведенному внешнему сигналу, вызывающему интермодуляционные искажения, существенно различна при недокрытии и при перекрытии. Так, для обеспечения $K_{in} \leq -70 dB$ при $\Delta r'_{on} = 0$ достаточно обеспечить $\tau'_{sat2} \geq 0,41$ при недокрытии и $\tau'_{sat2} \leq 0,512$ при перекрытии, что составляет соответственно 18% и 2,4% допустимого различия между τ'_{sat1} и τ'_{sat2} .

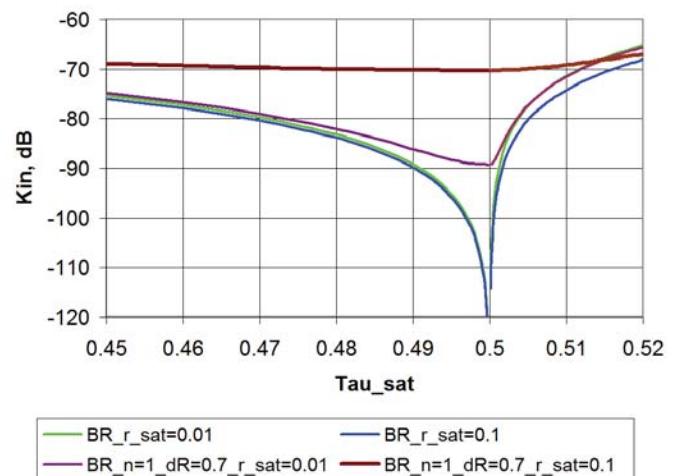


Рис. 10. Зависимость интермодуляционных искажений (RIMD) мостового ключевого генератора от времени насыщения ключей при $\tau'_{sat2} \neq \tau'_{sat1} = 0,5$.

VI. Сравнение схем ключевых генераторов

Основные результаты анализа интермодуляционных искажений в ключевых генераторах различных конфигураций представлены в таблицах 1 и 2. В таблице 1 символом "+" показано появление интермодуляционных искажений четных либо нечетных порядков n при наличии исследованных факторов отклонения режима работы от номинального. Как следует из таблицы, в схеме с ПТ наличие Δr_{on} не вызывает интермодуляционных искажений. По этому критерию схема с ПТ является более предпочтительной, поскольку не требует обеспечения равенства сопротивлений ключей (r_{on}).

Таблица 1

Влияние факторов неидеальности режима работы в различных схемах ключевых генераторов на интермодуляционные искажения

Параметр \ Схема	Влияющие параметры					
	Δr_{on}		$\tau_{sat} \neq \pi$		$\Delta\tau_{sat} = \tau_{sat1} - \tau_{sat2}$	
	четн. п	нечет. п	четн. п	нечет. п	четн. п	нечет. п
ПН [1]	-	+	+	-	+	+
ПТ	-	-	+	-	+	+
Мостовая	-	+	+	-	+	+

В таблице 2 представлены значения точности поддержания параметров для обеспечения $K_{in} \leq -70 dB$. Учитывая совокупность исследованных критериев, следует признать предпочтительность применения мостовой схемы, допускающей большой разброс сопротивлений ключей (r_{on}) и существенное отклонение времени насыщения ключей от мандра при работе в режиме недокрытия.

Напомним, что для мостовой схемы ключевого генератора с резистивной нагрузкой максимальное значение КПД по первой гармонике достигается при времени насыщения ключей, равном половине периода. В схеме с переключением напряжения максимум КПД соответствует времени насыщения 135 градусов, а в схеме с переключением тока - 225 градусов, соответственно, и превышает КПД мостовой схемы [24].

Данное обстоятельство обусловлено максимальным отношением содержания первой гармоники к постоянной составляющей при разложении выходного импульса в ряд Фурье и учитывается разработчиками при проектировании схем, претендующих на достижение экстремальных энергетических характеристик. При работе в условиях, предполагающих выполнение жестких требований на интермодуляционные искажения, время насыщения необходимо выбирать максимально близким к 180 градусам. В этих условиях энергетические характеристики всех трех схем одинаковы [24].

Дальнейшее развитие исследований интермодуляционных искажений в ключевых генераторах с резистивной нагрузкой предполагает проведение симуляционного моделирования для различных схем и режимов их работы с целью подтверждения теоретически полученных результатов.

На следующих этапах исследования предполагается рассмотреть особенности синтетических схем высокоеффективного усиления мощности и их комбинаций [13, 16, 27], а именно методов раздельного усиления составляющих и дефазирования при воздействии наведенного мешающего сигнала, и оценить их устойчивость к возникновению интермодуляционных искажений.

Таблица 2

Допустимые отклонения параметров схемы и режима работы для получения $K_{in} \leq -70 dB$

Параметр \ Схема	Точность поддержания параметра для обеспечения $K_{in} \leq -70 dB$		
	$\Delta r_{on}'' = (r_{on1}'' - r_{on2}'') / r_{on1}''$	$\tau_{sat} \neq \pi$	$\Delta\tau_{sat}$
ПН [1]	$\leq 20\%$	$\leq 1\%$	$2\pi - \tau_{sat1} - \tau_{sat2} \leq 0,01\pi$
ПТ	Не зависит от Δr_{on}	$\leq 1\%$	$2\pi - \tau_{sat1} - \tau_{sat2} \geq -0,01\pi$
Мостовая	$\leq 70\%$	$\leq 8\%$ недокрытие	$2\pi - \tau_{sat1} - \tau_{sat2} \leq 0,09\pi$ недокрытие
		$\leq 1,2\%$ перекрытие	$2\pi - \tau_{sat1} - \tau_{sat2} \geq -0,012\pi$ перекрытие

VII. Заключение

Проведен теоретический анализ интермодуляционных искажений в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режимах с переключением тока и мостовым. Сравнение требований к точности поддержания параметров элементов схемы и их режимов работы для обеспечения заданного уровня интермодуляционных искажений (RIMD), не превышающего величины минус 70 дБ, показало, что:

Схема ключевого генератора с переключением напряжения (ПН) [1] предъявляет наиболее жесткие требования по всем влияющим параметрам. В ней разброс сопротивлений насыщения ключей не должен превышать 20%, а суммарное отклонение времени насыщения ключей в любых сочетаниях не должно превышать 0,01, что составляет 2% от 0,5T (от Пи). Схема ключевого генератора с переключением тока (ПТ) допускает аналогичное отклонение времени насыщения ключей, но искажения в ней не зависят от разницы сопротивлений насыщения ключей. Мостовая схема ключевого генератора допускает 70% -ю разницу в сопротивлении насыщения ключей. Допустимое суммарное отклонение времени насыщения зависит от режима работы и составляет 2,4% при перекрытии и 18% при недокрытии.

Выбор используемой конфигурации ключевого генератора в том или ином конкретном применении осуществляется на основании большого количества факторов - КПД, уровень мощности, возможность работы с коллекторной (стоковой) модуляцией в широком диапазоне частот, устойчивость к рассогласованию нагрузки, элементная база и т.д. Проведенное исследование позволяет разработчикам учитывать еще один параметр – устойчивость к наведенным электромагнитным излучениям.

Литература

1. Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 10. С. 4-11.
2. Varlamov O.V. Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers // В сборнике: 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings. 2022.
3. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path," // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651
4. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V., Dolgopyatova A.V., Voronkov A.A. Operation problems of the EER transmitter with narrowband antenna // В сборнике: 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019. 2019. С. 8706736.
5. Varlamov O.V., Grebennikov A. Experimental Studies of Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Narrow-band Matched Load // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, T. 5. № . С. 382-385, 2022
6. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. Class D switching power amplifier with a filter under load mismatch conditions // В сборнике: 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020. 2020. С. 9131508.
7. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Козырев В.Б., Меланыин А.В. Сложение мощностей двухтактных ключевых генераторов ПН с резистивной нагрузкой // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 31-36.
8. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г. Мощный ВЧ цифроаналоговый преобразователь для усилителя мощности ОМ сигналов // Электросвязь. 1989. № 8. С. 54-57.
9. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals // Патент на изобретение US 7724837 B2. Заявка № US20040546012 от 07.01.2004.
10. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Лаврушенков В.Г. Разработка коротковолнового ключевого усилителя мощности с раздельным усилением составляющих однополосного сигнала // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. № 9. С. 42-44.
11. Filinomov N., Varlamov O. Power amplifier circuit for amplifying RF-signals // Патент на изобретение EP 1229642 B1. Заявка № EP20010102249 от 31.01.2001.
12. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals // Патент на изобретение EP 1450479 B1. Заявка № EP20030003830 от 20.02.2003.
13. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. Simultaneous application of several synthetic methods for high efficiency radiofrequency amplification // В сборнике: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021. С. 9416126.
14. Varlamov O., Nguyen D.C., Grebennikov A. Broadband and efficient envelope amplifier for envelope elimination and restoration/envelope tracking higher-efficiency power amplifiers // Sensors. 2022. Т. 22. № 23. С. 9173.
15. Варламов О.В. Построение мощных широкополосных усилителей постоянного тока модуляционного тракта передатчиков с раздельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 4-14.
16. Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкін С.Е. Комбінування синтетичних методів високоекспективного високочастотного усиління // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 9. С. 11-16.
17. Варламов О.В. Радиопередатчики сложных сигналов, построенные по методу раздельного усиления. Основы теории и лабораторный практикум // Учебно-методическое пособие / Москва, 2019.
18. Нгуен Д.К., Варламов О.В. Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку // Наукомеские технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 10-18.
19. Nguyen D.C., Varlamov O.V. Simulation Model for Switching Mode Envelope Elimination and Restoration RF Power Amplifiers Research // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, 2022. Т. 5. № 1. С. 234-239.
20. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V. Experimental studies of the envelope elimination and restoration HF power amplifier characteristics with broadband unmatched load // В сборнике: 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 - Conference Proceedings. 2021. С. 9488387.
21. Varlamov O. V. "Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests," // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-8. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456925
22. Варламов О.В. Использование необыкновенной волны для цифрового радиовещания DRM зенитным излучением // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – №1. – С. 32-38
23. Варламов О.В. Исследование цифрового радиовещания DRM в диапазоне СВ в зоне фединга // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 2. С. 41-45.
24. Козырев В.Б., Лаврушенков В.Г., Леонов В.П., Новиков Г.В., Петяшин Н.Б., Попов И.А., Харитонов А.В., Громорушкин В.Н. Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме. Москва, 1985.
25. Kamper M., Ulbricht G., Weigel R., Fischer G. "Comparison of class A and class D RF amplifier operation with focus on reverse intermodulation and efficiency performance," // 2011 6th European Microwave Integrated Circuit Conference, 2011, pp. 272-275.
26. Варламов О.В., Дымкова С.С., Городилина М.В. Авторские профили в научометрических базах данных // Учебно-методическое пособие / Москва, 2020.
27. Иванюшкин Р.Ю., Варламов О.В., Сягаев А.К. Нелинейные искажения сигнала стандарта drm в синтетических схемах линейного усиления // В сборнике: Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения. Материалы XV межрегиональной научно-технической конференции. 2007. С. 301-310.

INTERMODULATION DISTORTION IN CURRENT MODE AND BRIDGE CLASS D SWITCHING AMPLIFIERS WITH RESISTIVE LOAD

Anna V. Dolgopyatova, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, anna793@yandex.ru

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Abstract

The article is a continuation of the topic consideration of reverse intermodulation distortions analysis in class D switching generators with a resistive load. Similar to the approach used for the voltage-switched circuit in the previous authors work, a theoretical analysis of the reverse intermodulation distortion in class D current-switched circuit and in the bridge circuit is carried out. For both configurations, expressions for the output spectrum are written and the dependences of intermodulation distortion on non-ideal element parameters and operating modes are considered. A comparison of all three configurations of switching generators with a resistive load, while ensuring the intermodulation distortion level not exceeding minus 70 dB, showed that the circuit with voltage switching imposes the most stringent requirements for all influencing parameters. In it, the variation in the saturation resistance of the switches should not exceed 20%, and the total switches saturation time deviation in any combination should not exceed 0.01, which is 2% of 0.5T (from Pi). The current switching circuit allows a similar switches saturation time deviation, but the distortions in it do not depend on the switches saturation resistances difference. The switching bridge circuit allows for a 70% difference in switches saturation resistance. The permissible total saturation time deviation depends on the mode of operation and is 2.4% for overlapping and 18% for undercovering. The study allows developers of highly efficient switching generators to take into account one more parameter – resistance to induced electromagnetic radiation, in addition to the generally accepted achievable efficiency values, current and voltage crest factors, and resistance to load mismatch.

Keywords: reverse intermodulation distortions; current mode class D (CMCD); bridge mode class D (BMCD); RF Power Amplifier; Internet of Things; 5G; MIMO.

References

1. Varlamov O.V. Intermodulation distortion in voltage mode class D switching amplifiers with resistive load. *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.10, pp. 4-11.
2. Varlamov O.V. Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers. 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings. 2022.
3. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path. 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: [10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651](https://doi.org/10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651).
4. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V., Dolgopyatova A.V., Voronkov A.A. Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna. 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-5, doi: [10.1109/SOSG.2019.8706736](https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706736).
5. Varlamov O.V., Grebennikov A. "Experimental Studies of Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Narrowband Matched Load," 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Arkhangelsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-4, doi: [10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840873](https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840873).
6. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. "Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions," 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: [10.1109/WECONF48837.2020.9131508](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131508).
7. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N., Kozyrev V. B. and Melan'in A. V., "Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load", *Radioelectronics and Communications Systems* (English translation of Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Radioelektronika), vol. 32, no. 7, pp. 30, 1989.
8. Varlamov O. V., Goncharov I. A. and Lavrushenkov V.G., "High-power HF digital-analog converter for SSB signal power amplifiers", *Telecommunications and Radio Engineering* (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), vol. 44, no. 8, pp. 49, 1989. 9. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G., "Efficient modulation of RF signals," US 7724837 B2. 07.01.2004.
10. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N., Lavrushenkov V. G., "Development of shortwave SSB switching power amplifier with envelope elimination and restoration", *T-Comm*, vol. 5, no. 9, pp. 42-44, 2011.
11. Filinomov N., Varlamov O., "Power amplifier circuit for amplifying RF-signals," EP 1229642 B1. 31.01.2001.
12. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G., "Efficient modulation of RF signals," EP 1450479 B1. 20.02.2003.
13. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. "Simultaneous Application of Several Synthetic Methods for High Efficiency Radiofrequency Amplification," 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2021, pp. 1-5, doi: [10.1109/IEEECONF51389.2021.9416126](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416126).
14. Varlamov, Oleg, Dang Canh Nguyen, and Andrei Grebennikov. 2022. "Broadband and Efficient Envelope Amplifier for Envelope Elimination and Restoration/Envelope Tracking Higher-Efficiency Power Amplifiers" *Sensors* 22, no. 23: 9173. <https://doi.org/10.3390/s22239173>.
15. Varlamov O.V. Powerful broadband DC amplifiers for modulation path of transmitters with separate amplification. *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.11, pp. 4-14.

16. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques. *T-Comm.* 2021. vol. 15, no.9, pp. 11-16.
17. Varlamov O.V. Radio transmitters of complex signals built using the split amplification method. Fundamentals of theory and laboratory workshop. *Educational and methodological manual.* Moscow, 2019.
18. Nguyen D.C., Varlamov O.V. Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load. *H&ES Reserch.* 2022. Vol. 14. No 2. P. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.
19. Nguyen D.C., Varlamov O.V. "Simulation Model for Switching Mode Envelope Elimination and Restoration RF Power Amplifiers Research," 2022 *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Arkhangelsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SYNTCHROINFO55067.2022.9840917.
20. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V. "Experimental Studies of the Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Broadband Unmatched Load," 2021 *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Kaliningrad, Russia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNTCHROINFO51390.2021.9488387.
21. Varlamov O. V. "Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests," 2018 *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, 2018, pp. 1-8. DOI: 10.1109/SYNTCHROINFO.2018.8456925
22. Varlamov O.V. Using the extraordinary wave for digital DRM NVIS broadcasting. *T-Comm.* 2015. No.1. Pp. 32-38.
23. Varlamov O.V. Study of DRM digital broadcasting in the MF fading zone. *T-Comm*, vol. 9, no. 2, pp. 41-45, 2015.
24. Kozyrev V. B., Lavrushenkov V. G., Leonov V. P., Novikov G. V., Petyashin N. B., Popov I. A., Kharitonov A. V., Gromorushkin V. N. (1985). Transistor harmonic oscillators in switch mode. Moscow, Radio and communication.
25. Kamper M., Ulbricht G., Weigel R., Fischer G., "Comparison of class A and class D RF amplifier operation with focus on reverse intermodulation and efficiency performance," 2011 6th European Microwave Integrated Circuit Conference, 2011, pp. 272-275.
26. Varlamov O. V., Dymkova S. S., Gorodilina M. V. Author's profiles in scientometric databases, Moscow, 2020.
27. Ivanyushkin R. Yu., Varlamov O.V., Syagaev A.K. "Nonlinear distortions of the DRM standard signal in synthetic linear amplification circuits", In the collection: Signal processing in terrestrial radio communication and warning systems. *Materials of the XV interregional scientific and technical conference*, pp. 301-310, Moscow, NTRES. 2007.

Information about authors:

Anna V. Dolgopyatova, Engineer, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Oleg V. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department "Radio equipment and circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

организаторы:

RUSSIA SECTION ED/MTT/AES JOINT CHAPTER

RUSSIA SECTION CAS CHAPTER

INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS ASSOCIATION (IRIS)

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

"2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications"

SYNCHROINFO

28 – 30 июня 2023

г. Псков, Россия

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore

Materials are available in English

<http://media-publisher.ru/en/conference/>

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ СОСТАВНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ – ВЕРОЯТНОСТНЫХ СМЕСЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-14-19

Тарасов Вениамин Николаевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
veniamin_tarasov@mail.ru

Бахарева Надежда Федоровна,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
nadin1956_04@inbox.ru

Manuscript received 12 February 2022;
Accepted 12 March 2023

Ключевые слова: система моделирования GPSS WORLD, системы массового обслуживания, среднее время ожидания в очереди, средняя длина очереди

В данной статье представлены полученные результаты по разработке программных генераторов псевдослучайных последовательностей для имитационного моделирования СМО в системе дискретно-событийного моделирования GPSS WORLD с гиперэрланговским (HE2) и гиперэкспоненциальным (H2) входными распределениями. Данных в этой предметной области ни в зарубежной ни в отечественной научной литературе, авторами не обнаружены. Нет таких генераторов и в библиотеке GPSS WORLD. Известно, что распределения HE2 и H2 являются наиболее общими и обеспечивают большой диапазон коэффициента вариации. Последний играет важную роль при оценке задержки требований в очереди в системах массового обслуживания, т.к. средняя задержка в очереди прямо пропорциональна их квадратам. Для распределений HE2 и H2 авторами ранее получены численно-аналитические результаты на основе метода спектрального решения интегрального уравнения Линдли. В статье представлены полученные алгоритмы и программы на GPSS WORLD для имитации функционирования СМО с указанными входными распределениями. Адекватность полученных результатов подтверждена сравнением результатов имитации с результатами численного моделирования в среде Mathcad. Авторы надеются, что представленные результаты будут востребованы специалистами в области имитационного моделирования в среде GPSS WORLD.

Информация об авторах:

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Управление в технических системах", Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

Бахарева Надежда Федоровна, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Информатика и вычислительная техника", Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

Для цитирования:

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Имитационное моделирование систем массового обслуживания на основе составных распределений – вероятностных смесей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 14-19.

For citation:

Tarasov V.N., Bakhareva N.F. (2023) Simulation modeling of queuing systems based on composite distributions – probabilistic mixtures. T-Comm, vol. 17, no.3, pp. 14-19. (in Russian)

Введение

Универсальная система дискретно-событийного моделирования GPSS WORLD предназначена для моделирования как производственных систем, так и систем массового обслуживания [1-4]. Она включает множество библиотечных программ, в том числе генераторы псевдослучайных последовательностей для различных законов распределений. В тоже время в этой системе отсутствуют такие генераторы, как гиперэрланговских и гиперэкспоненциальных распределений. Этот факт препятствует моделированию систем массового обслуживания G/G/1 и G/G/m. Настоящая статья посвящена частичному устранению этого пробела.

Как известно, например, из [3], распределение НЕ₂ составлено из нормированных распределений Эрланга с весовыми коэффициентами p и $1-p$. К примеру, функция плотности гиперэрланговского закона второго порядка имеет вид

$$f(t) = 4p\lambda_1^2 te^{-2\lambda_1 t} + 4(1-p)\lambda_2^2 te^{-2\lambda_2 t} \quad (1)$$

и обеспечивает коэффициент вариации $c \in (1/\sqrt{2}, \infty)$.

Также известно, что обычно используется распределение Эрланга второго порядка как частный случай более общего Гамма закона распределения:

$$f(t) = \lambda^2 te^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Библиотечный генератор гамма распределения GAMMA (Stream, Locate, Scale, Shape) позволяет получить псевдослучайную последовательность для распределения Эрланга второго порядка (2). Распределение (2) отличается от нормированного распределения $f(t) = 4\lambda^2 te^{-2\lambda t}$ начальными моментами, но имеют одинаковый коэффициент вариации.

В связи с тем, что нормированное распределение вызывает сложности генерации, сформируем из (2) гиперэрланговский закон второго порядка с функцией плотности

$$a(t) = p\lambda_1^2 te^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2^2 te^{-\lambda_2 t} \quad (3)$$

как вероятностную смесь обычных распределений Эрланга с целью его использования в генераторе GAMMA. Заметим, что числовые характеристики распределений (1) и (3), кроме коэффициента вариации, также отличаются.

Настоящая статья посвящена моделированию СМО с входными распределениями НЕ₂ и Н₂ в системе GPSS WORLD. Авторам не известны какие-либо результаты в этой предметной области.

Постановка задачи

В статье излагается проблема построения имитационных моделей для указанных систем, а выводы об адекватности моделей делаются на основе сопоставления полученных результатов с данными численного моделирования в Mathcad. При построении удачной модели для указанной системы, построение имитационных моделей систем, включающих распределения НЕ₂ и Н₂ в любой позиции по шкале Кендалла, не будет вызывать затруднения.

Решение задачи для СМО с гиперэрланговским и экспоненциальным распределениями

Для построения и прогона любой имитационной модели потребуются исходные данные в виде входных параметров. Для этого мы используем значения начальных моментов распределений НЕ₂ и Н₂, через которые и определим параметры этих распределений. Моментные характеристики определим через преобразование Лапласа функции (3):

$$A^*(s) = p\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + s}\right)^2 + (1-p)\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + s}\right)^2.$$

Тогда два первых начальных момента будут
– для интервалов поступлений

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{2p}{\lambda_1} + \frac{2(1-p)}{\lambda_2}, \quad \bar{\tau}_\mu^2 = \frac{6p}{\lambda_1^2} + \frac{6(1-p)}{\lambda_2^2}, \quad (4)$$

– для времен обслуживания

$$\bar{\tau}_\mu = 1/\mu, \quad \bar{\tau}_\mu^2 = 2/\mu^2.$$

Уравнения (4) совместно с определением квадрата коэффициента вариации $c_\lambda^2 = \sigma_\lambda^2 / \bar{\tau}_\lambda^2 = (\bar{\tau}_\lambda^2 - \bar{\tau}_\lambda^2) / \bar{\tau}_\lambda^2$ позволяют найти все три параметра λ_1, λ_2, p распределения (3). Выпишем эти значения

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 4p / \bar{\tau}_\lambda, \quad \lambda_2 = 4(1-p) / \bar{\tau}_\lambda, \\ p &= 1/2 + \sqrt{1/4 - 3/[8(1+c_\lambda^2)]}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из условия не отрицательности выражения под квадратным корнем следует, что $c_\lambda \geq 1/\sqrt{2}$.

Для построения и отладки имитационной модели возьмем коэффициент загрузки $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda = 0,9$, коэффициент вариации интервалов поступлений $c_\lambda = 2$ и единичное время обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$. Тогда исходные данные для имитационной модели

$$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2(1+c_\lambda^2)-3}{8(1+c_\lambda^2)}} = 0,918, \quad 1-p = 0,082,$$

$$\lambda_1 = 3,305, \quad \lambda_2 = 0,295.$$

Отсюда средние значения для первой и второй фаз гиперэрланговского распределения будут равны

$$2/\lambda_1 = 0,605, \quad 2/\lambda_2 = 6,78 \text{ единиц времени.}$$

На первый взгляд, при построении имитационной модели можно было бы обойтись логическим оператором TEST для перенаправления транзактов в модели с вероятностью p на первую фазу гиперэрланговского закона, а с вероятностью $1-p$ – на вторую фазу, как это показано в тексте имитационной модели. Здесь отмечается полная аналогия с аналитической моделью (3) гиперэрланговского закона распределения, т.к. в аналитической модели предполагается мгновенная передача заявок с заданной вероятностью p на первую фазу, а с вероятностью $1-p$ – на вторую фазу [7-9,12].

СВЯЗЬ

Текст программы	Комментарии
10 ERL1 FVARIABLE (GAMMA(1,0,0.605,2))	; Переменная для первой фазы гиперэрланга
20 ERL2 FVARIABLE (GAMMA(1,0,6.78,2))	; Переменная для второй фазы гиперэрланга
30 TEST L (RN1),082,MET_1	; Если значение случайной величины
40 GENERATE V\$ERL2	; меньше p_1 , то генерировать первую фазу и
50 TRANSFER ,MET_2	; встать в очередь к устройству "CHAN",
60 MET_1 GENERATE V\$ERL1	; если нет, то переход по метке 1 для
70 MET_2 QUEUE QCHAN	; генерирования второй фазы
80 SEIZE CHAN	; Встать в очередь к устройству "CHAN"
90 DEPART QCHAN	; Занять устройство "CHAN"
100 ADVANCE (Exponential (1,0,1,0))	; Покинуть очередь к устройству "CHAN"
110 RELEASE CHAN	; Задержать транзакт на единичное время
120 TERMINATE 1	; Освободить устройство "CHAN"
130 START 1000000	; Удалять по одному транзакту
	; Прогон 1 млн. транзактов

Анализ результатов прогона модели (рис. 1) показывает, что в этом случае на первую фазу направляется примерно 82 тыс. транзактов, а на вторую фазу 918 тыс. транзактов, что полностью соответствует заданным вероятностям 0,082 и 0,918. Коэффициент загрузки равен 0,9 и среднее время обслуживания – единица, т.е. исходные данные и промежуточные результаты моделирования совпадают. Средняя задержка в очереди 6,553 не соответствует аналитической модели [5,6], которая дает 22,59 единиц времени.

Выше мы убедились, что в имитационном моделировании копирование аналитического представления гиперэрланговского распределения не дает нужного эффекта. Дискретно-событийное моделирование работает по строго определенному алгоритму продвижения модельного времени от события к событию, где в качестве событий фигурируют моменты поступления и ухода требований из системы.

```
LABEL LOC BLOCK TYPE ENTRY COUNT CURRENT COUNT RETRY
 1  TEST          0        0        0
 2  GENERATE      81886    0        0
 3  TRANSFER      81886    0        0
MET_1 4  GENERATE      918139   0        0
MET_2 5  QUEUE        1000025  24       0
 6  SEIZE         1000001  1        0
 7  DEPART        1000000  0        0
 8  ADVANCE        1000000  0        0
 9  RELEASE        1000000  0        0
10  TERMINATE     1000000  0        0

FACILITY ENTRIES UTIL. AVE.TIME AVAIL. OWNER PEND INTER RETRY DELAY
CHAN      1000001  0.901   1.001   1  1000001  0  0  0  24

QUEUE MAX CONT. ENTRY ENTRY(0) AVE.CONT. AVE.TIME AVE.(-0) RETRY
QCHAN    58      25 1000025 128109   5.898   6.553   7.515  0
```

Рис. 1. Результаты прогона имитационной модели

Теперь внимательно смотрим на двухфазное формирование гиперэрланговского распределения для имитационного моделирования (рис. 2). На рисунке 2 показано, что с вероятностью p сформированный транзакт отправляется на первую фазу гиперэрланговского закона со средним интервалом $2/\lambda_1$, а с вероятностью $1-p$ – на вторую фазу со средним интервалом $2/\lambda_2$. В схему включены логические переключатели с двумя состояниями: включен, выключен.

Эти два состояния управляются с помощью логического оператора LOGIC X A. Здесь A – идентификатор переключателя, а X задает тип операции: S – включить, R – выключить.

Таким образом, в схеме в зависимости от значения вероятности p должны будут попеременно работать два переключателя, которые в тексте программы обозначены Kluch1 и Kluch2. Введение в схему логических переключателей еще не решает проблему создания имитационной модели, т.к. в соответствующие фазы нужно впустить сгенерированный прежде транзакт при включенном переключателе.

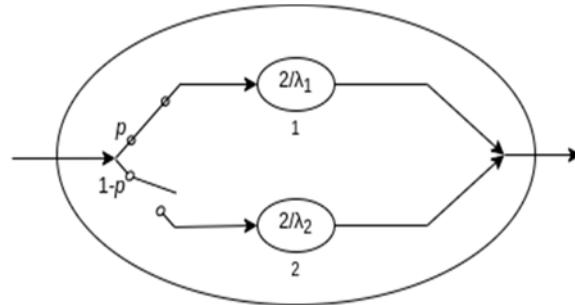


Рис. 2. Формирование двухфазного гиперэрланговского распределения

Это достигается следующим логическим оператором GATE (впустить), имеющий формат: GATE X A, [B]. В нашем случае объектом А является переключатель Kluch1 или Kluch2, а положение объекта LS – логический ключ включен.

В имитационной модели с применением логических ключей необходимо указать еще продолжительность их работы, в тексте программы – это время для первого ключа равно T1#3.1, а для второго – T_2#3.1. Здесь T_1 и T_2 – средние интервалы для фаз, # операция арифметического умножения. Константа 3.1 должна подбираться экспериментально так, чтобы показатели работы СМО не отклонялись от реальных значений. В этом состоит недостаток имитационной модели с использованием составных распределений и логических переключателей.

Ниже приведен текст программы с комментариями.

Текст программы	Комментарии
10 P_1 EQU 0.082	; Значение вероятности p_1 1-й эрланговской фазы
20 P_2 EQU (1-P_1)	; Значение вероятности p_2 2-й эрланговской фазы
30 T_1 EQU 3.39	; Значение среднего интервала 1-й фазы
40 T_2 EQU 0.302	; Значение среднего интервала 2-й фазы
50 GENERATE ...1	; Генерация одного транзакта управления
60 Switch TRANSFER P_1,Met_2,Met_1	; ключами выбора фазы
70 Met_1 TRANSFER ,Kluch1	; Включение 1-го ключа с вероятностью p_1 ,
80 Met_2 TRANSFER ,Kluch2	; а 2-го с вероятностью p_2
90 Kluch1 LOGIC S Kluch1	; Отправить транзакт на 1-й ключ "Kluch1"
100 ADVANCE (T_1#3.1)	; Отправить транзакт на 2-й ключ "Kluch2"
110 LOGIC R Kluch1	; Включить ключ 1-й эрланговской фазы
120 TRANSFER ,Switch	; Выключить ключ 1-й эрланговской фазы
130 Kluch2 LOGIC S Kluch2	; Отправить транзакт на выбор рабочего ключа
140 ADVANCE (T_2#3.1)	; Выключить ключ 2-й эрланговской фазы
150 LOGIC R Kluch2	; Время работы ключа
160 TRANSFER ,Switch	; Выключить ключ 2-й эрланговской фазы
170 GENERATE (GAMMA(11,0,T_1,2))	; Отправить транзакт на выбор рабочего ключа
180 GATE LS Kluch1,Met_10	; Время работы ключа
190 TRANSFER ,Met_20	; Время работы ключа
200 GENERATE (GAMMA(21,0,T_2,2))	; Генерация 1-й эрланговской фазы
210 GATE LS Kluch2,Met_10	; Генерация 2-й эрланговской фазы
220 Met_20 QUEUE QCHAN	; Определение состояния 2-го ключа
230 SEIZE CHAN	; Встать в очередь к устройству "CHAN"
240 DEPART QCHAN	; Занять устройство "CHAN"
250 ADVANCE (Exponential(31,0,1,0))	; Освободить одно место в очереди
260 RELEASE CHAN	; Задержать на обслуживании на единичное
270 TERMINATE 1	; время
280 Met_10 TERMINATE	; Освободить устройство "CHAN"
290 START 1000000	; Удалить транзакты из модели
	; Прогон 1 млн. транзактов

Из результатов имитации на рисунке 3 следует, что коэффициент загрузки составляет 0,9, а среднее время обслуживания – единицу времени, т.е. исходные данные для примера и результаты моделирования совпадают.

Результаты имитации: средняя задержка в очереди 22,623 единицы времени практически совпадает с результатом численного моделирования 22,59, а средняя длина очереди в модели 20,30 также практически совпадает с результатом численного моделирования 20,33.

LABEL	LOC	BLOCK	TYPE	ENTRY	COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
	1	GENERATE		1	0	0	0	
SWITCH	2	TRANSFER		645960	0	0	0	
MET_1	3	TRANSFER		53243	0	0	0	
MET_2	4	TRANSFER		592717	0	0	0	
KL_1	5	LOGIC		53243	0	0	0	
	6	ADVANCE		53243	1	0	0	
	7	LOGIC		53242	0	0	0	
	8	TRANSFER		53242	0	0	0	
KL_2	9	LOGIC		592717	0	0	0	
	10	ADVANCE		592717	0	0	0	
	11	LOGIC		592717	0	0	0	
	12	TRANSFER		592717	0	0	0	
	13	GENERATE		163979	0	0	0	
	14	GATE		163979	0	0	0	
	15	TRANSFER		82361	0	0	0	
	16	GENERATE		1844133	0	0	0	
	17	GATE		1844133	0	0	0	
MET_20	18	QUEUE		1000002	1	0	0	
	19	SEIZE		1000001	1	0	0	
	20	DEPART		1000000	0	0	0	
	21	ADVANCE		1000000	0	0	0	
	22	RELEASE		1000000	0	0	0	
	23	TERMINATE		1000000	0	0	0	
MET_10	24	TERMINATE		1008110	0	0	0	

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE.TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
CHAN	1000001	0.898	1.000	1	2008099	0	0	0	1

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(0-)	RETRY
QCHAN	175	2	1000002	52010	20.300	22.623	23.864	0

Рис. 3. Результаты прогона окончательной имитационной модели

Решение задачи для СМО с гиперэкспоненциальным и экспоненциальным распределениями

По аналогии с предыдущим разделом, проиллюстрируем разработку имитационной модели на примере системы, сформированной функциями плотности

$$a(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (8)$$

как вероятностной смеси экспоненциальных распределений и экспоненциального распределения

$$b(t) = \mu e^{-\mu t}. \quad (9)$$

При построении любой имитационной модели необходимо задавать исходные данные. В нашем случае это будут значения моментных характеристик распределений Н₂ и М, а через определим неизвестные параметры распределений (8) и (9). Моментные характеристики определим через преобразование Лапласа функции (8):

$$A^*(s) = p\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + s}\right) + (1-p)\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + s}\right).$$

Тогда два первых начальных момента будут равны:

– для интервалов поступлений

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}, \quad \bar{\tau}_\lambda^2 = \frac{2p}{\lambda_1^2} + \frac{2(1-p)}{\lambda_2^2}, \quad (10)$$

– для времен обслуживания

$$\bar{\tau}_\mu = 1/\mu, \quad \bar{\tau}_\mu^2 = 2/\mu^2.$$

Уравнения (10) по аналогии с предыдущим разделом совместно с определением квадрата коэффициента вариации $c_\lambda^2 = \sigma_\lambda^2 / \bar{\tau}_\lambda^2 = (\bar{\tau}_\lambda^2 - \bar{\tau}_\lambda^2) / \bar{\tau}_\lambda^2$ также позволяют найти все три параметра λ_1, λ_2, p распределения (8). Выпишем эти значения

$$\lambda_1 = 2p / \bar{\tau}_\lambda, \quad \lambda_2 = 2(1-p) / \bar{\tau}_\lambda, \\ p = [1 + (c_\lambda^2 - 1) / (c_\lambda^2 + 1)] / 2. \quad (12)$$

Для построения и отладки имитационной модели для системы Н₂/М/1 снова возьмем коэффициент загрузки $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda = 0,9$, коэффициент вариации интервалов поступлений $c_\lambda = 2$ и единичное время обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$. Тогда исходные данные для имитационной модели имеют вид:

$$p = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{\frac{c_\lambda^2 - 1}{c_\lambda^2 + 1}}) = 0,887, \quad 1 - p = 0,113, \\ \lambda_1 = 1,597, \quad \lambda_2 = 0,203.$$

Отсюда средние значения для первой и второй фаз гиперэкспоненциального распределения $2/\lambda_1 = 1,252, 2/\lambda_2 = 9,86$ единиц времени.

После определения исходных данных с помощью аналитического моделирования перейдем к формированию имитационной модели для этой системы.

На рисунке 4 показано, что с вероятностью p сформированный транзакт отправляется на первую фазу гиперэкспоненциального закона со средним интервалом $1/\lambda_1$, а с вероятностью $1-p$ – на вторую фазу со средним интервалом $1/\lambda_2$. В схему опять включаем логические переключатели с двумя состояниями: включен, выключен.

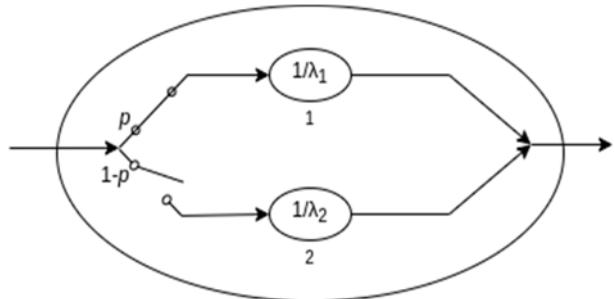


Рис. 4. Формирование двухфазного гиперэкспоненциального распределения

В схеме попеременно в зависимости от значения вероятности p должны будут работать два переключателя, которые в тексте программы обозначены Kluch1 и Kluch2. В имитационной модели с применением логических ключей необходимо указать еще продолжительность их работы, в тексте программы — это время для первого ключа равно T_1#1.93, а для второго — T_2#1.93. Здесь T_1 и T_2 — средние интервалы для фаз, # операция арифметического умножения. Константа 1.93 должна подбираться экспериментально так, чтобы показатели работы СМО не отклонялись от реальных значений. В этом и состоит недостаток имитационной модели с использованием составных распределений и логических переключателей. Поэтому таких генераторов нет в библиотеках систем

имитационного моделирования. Ниже приведен текст программы с комментариями, а на рисунке 5 – результаты прохождения имитационной модели для системы с гиперэкспоненциальным и экспоненциальным распределениями.

Таким образом, в ходе разработки имитационных моделей для обеих систем был использован сложный механизм логических переключателей фаз закона распределения, который позволил получить адекватные результаты имитационного моделирования.

Текст программы

	Комментарии
10 P_1 EQU 0.113	; Значение вероятности p_1 1-й фазы
20 P_2 EQU (1-P_1)	; гиперэкспоненциального распределения
30 T_1 EQU 4.926	; Значение вероятности p_2 2-й фазы
40 T_2 EQU 0.626	; гиперэкспоненциального распределения
50 GENERATE ...1	; Значение среднего интервала 1-й фазы
60 Switch TRANSFER P_1, Met_2, Met_1	; Значение среднего интервала 2-й фазы
70 Met_1 TRANSFER ,KL_1	; Генерация одного транзакта управления
80 Met_2 TRANSFER ,KL_2	; ключами выбора фазы
90 KL_1 LOGIC S Kluch1	; Включение 1-го ключа с вероятностью p_1
100 ADVANCE (T_1,1.93)	; а 2-го - с вероятностью p_2
110 LOGIC R Kluch1	; Отправить транзакт на 1-й ключ "KL_1"
120 TRANSFER ,Switch	; Отправить транзакт на 2-й ключ "KL_2"
130 KL_2 LOGIC S Kluch2	; Включить ключ 1-й фазы
140 ADVANCE (T_2,1.93)	; Время работы ключа
150 LOGIC R Kluch2	; Выключить ключ 1-й фазы
160 TRANSFER ,Switch	; Отправить транзакт на выбор рабочего ключа
170 GENERATE (Exponential(11,0,T_1))	; "Switch"
180 GATE LS Kluch1, Met_10	; Включить ключ 2-й фазы
190 TRANSFER ,Met_20	; Время работы ключа
200 GENERATE (Exponential(21,0,T_2))	; Выключить ключ 2-й фазы
210 GATE LS Kluch2, Met_10	; Отправить транзакт на выбор рабочего ключа
220 Met_20 QUEUE QCHAN	; "Switch"
230 SEIZE CHAN	; Генерация 1-й эрланговской фазы
240 DEPART QCHAN	; Определение состояния 1-го ключа (если
250 ADVANCE (Exponential(31,0,1.0))	; "включен" – переход к следующей строке программы,
260 RELEASE CHAN	; если "выключен" – переход на Met10)
270 TERMINATE 1	; Переход по метке
280 Met_10 TERMINATE	; Генерация 2-й фазы
290 START 1000000	; Определение состояния 2-го ключа
	; Встать в очередь к устройству "CHAN"
	; Занять устройство "CHAN"
	; Освободить одно место в очереди
	; Задержать на обслуживании на единичное время
	; Освободить устройство "CHAN"
	; Удалить по одному транзакту
	; Удалить транзакты из модели
	; Прогон 1 млн. транзактов

LABEL	LOC	BLOCK	TYPE	ENTRY	COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
	1	GENERATE			1	0	0	
SWITCH	2	TRANSFER		517670	0	0	0	
MET_1	3	TRANSFER		58772	0	0	0	
MET_2	4	TRANSFER		458898	0	0	0	
KL_1	5	LOGIC		58772	0	0	0	
	6	ADVANCE		58772	1	0	0	
	7	LOGIC		58771	0	0	0	
	8	TRANSFER		58771	0	0	0	
KL_2	9	LOGIC		458898	0	0	0	
	10	ADVANCE		458898	0	0	0	
	11	LOGIC		458898	0	0	0	
	12	TRANSFER		458898	0	0	0	
	13	GENERATE		226691	0	0	0	
	14	GATE		226691	0	0	0	
	15	TRANSFER		113740	0	0	0	
	16	GENERATE		1778237	0	0	0	
	17	GATE		1778237	0	0	0	
MET_20	18	QUEUE		1000028	27	0	0	
	19	SEIZE		1000001	1	0	0	
	20	DEPART		1000000	0	0	0	
	21	ADVANCE		1000000	0	0	0	
	22	RELEASE		1000000	0	0	0	
	23	TERMINATE		1000000	0	0	0	
MET_10	24	TERMINATE		1004900	0	0	0	

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
CHAN	1000001	0.899	1.000	1	2004894	0	0	0	27
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY(0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY		
QCHAN	222	28	1000028	51979	20.159	22.440	23.670	0	

Рис. 5. Результаты прохождения имитационной модели для второй системы

Выводы

В работе представлены разработанные алгоритмы и имитационные модели для имитации функционирования СМО с составными распределениями второго порядка, образованными из эрланговского и экспоненциального распределений с весами. Выше было отмечено, что эти законы распределения обеспечивают большой диапазон коэффициентов вариаций.

В ходе разработки имитационных моделей был использован сложный механизм логических переключателей фаз закона распределения, что позволил построить адекватные имитационные модели продвижения транзактов внутри модели. Полученные результаты публикуются впервые.

Литература

1. *Боев В.Д.* Моделирование систем. Инstrumentальные средства GPSS World: Учеб. пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.
2. *Кудрявцев Е.М.* GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004. 320 с.
3. *Алиев Т.И.* Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
4. *Шрайбер Т. Дж.* Моделирование на GPSS. М.: Машиностроение, 1980. 592 с.
5. *Тарасов В. Н.* Анализ и сравнение двух систем массового обслуживания с гиперэрланговскими входными распределениями // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2018. №4 (47). С. 61-70.
6. *Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф., Када О.* Математическая модель телетрафика на основе системы НЕ₂/М/1 // Информационные технологии – 2019. - № 4. - С. 205-210.
7. *Тарасов В. Н., Липилина Л. В., Бахарева Н. Ф.* Автоматизация расчета характеристик систем массового обслуживания для широкого диапазона изменения их параметров // Информационные технологии. 2016. № 12. С. 952-957.
8. *Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф.* Компьютерное моделирование вычислительных систем. Теория, Алгоритмы, Программы. Оренбург, 2005. 183 с.
9. *Бахарева Н. Ф.* Уравнения равновесия потоков в сетевых моделях на основе математических операций мультиплексирования и демультиплексирования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 4 (12). С. 12-25.
10. *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.
11. *Whitt W.* Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30. N. 1, pp. 125-147.
12. *Алиев Т.И.* Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2(84). С. 88-93.
13. *Gromoll H.C., Terwilliger B. & Zwart B.* Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times // Queueing Systems. 2018. Vol. 89. No. 3, pp. 213-241.
14. *Legros B.* M/G/1 queue with event-dependent arrival rates // Queueing Systems. 2018. Vol. 89. No. 3, pp. 269-301.

**SIMULATION MODELING OF QUEUING SYSTEMS
BASED ON COMPOSITE DISTRIBUTIONS – PROBABILISTIC MIXTURES**

Veniamin N. Tarasov, Povelzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara Russia,

veniamin_tarasov@mail.ru

Nadezhda F. Bakhareva, Povelzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara Russia,

nadin1956_04@inbox.ru

Abstract

This article presents the results obtained on the development of software pseudo-random sequence generators for QS simulation in the GPSS WORLD discrete-event simulation system with hyper-Erlang (HE2) and hyper-exponential (H2) input distributions. Data in this subject area, neither in foreign nor in domestic scientific literature, were found by the authors. There are no such generators in the GPSS WORLD library either. It is known that the distributions of HE2 and H2 are the most general and provide a large range of the coefficient of variation. The latter play an important role in estimating the delay of requests in the queue in queuing systems, since the average queue delay is directly proportional to their squares. For the distributions of HE2 and H2, the authors previously obtained numerical-analytical results based on the method of spectral solution of the Lindley integral equation. The article presents the obtained algorithms and programs on GPSS WORLD to simulate the functioning of the QS with the specified input distributions. The adequacy of the obtained results was confirmed by comparing the simulation results with the results of numerical simulation in the Mathcad environment. The authors hope that the presented results will be in demand by specialists in the field of simulation modeling in the GPSS WORLD environment.

Keywords: GPSS WORLD simulation system, queuing systems, average waiting time, average queue length

References

1. Boev V.D. Modelirovaniye sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World: Ucheb. posobie. SPb: BHV-Peterburg, 2004. 368 p.
2. Kudryavcev E.M. GPSS World. Osnovy imitacionnogo modelirovaniya razlichnyh sistem. Moscow: DMK Press, 2004. 320 p.
3. Aliev T.I. Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem. SPb: SPbGU ITMO, 2009. 363 p.
4. SHrajber T.Dzh. Modelirovaniye na GPSS. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 592 p.
5. Tarasov V. N. Analysis and Comparison of two Queueing Systems with hypererlangian input Distributions. *Radio Electronics Computer Science Control*, 2018, Vol. 47, no.4, pp. 61-70.
6. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kada Othmane. The mathematical model of teletraffik based on the HE2/M/I system. *Informacionnye technologii*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 205-210.
7. Tarasov V.N., Lipilina L.V., Bakhareva N.F. Automation for Calculating Characteristics Queueing System for a wide Range Changing their Parameters. *Informacionnye technologii*, 2016, vol. 22, no.12, pp. 952-957.
8. Tarasov V.N., Bahareva N.F. Komp'yuternoe modelirovaniye vychislitel'nyh sistem. Teoriya, Algoritmy, Programmy. Orenburg, 2005. 183 p.
9. Bahareva N.F. Equilibrium Equations of Flows in Network Models Based on Mathematical Operations of Multiplexing and Demultiplexing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povelzhskij region. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 4 (12), pp. 12-25.
10. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/I queue with bursty arrivals. Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683-688.
11. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125-147.
12. Aliev T.I. Approximation of probability distributions in queuing models. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2(84), pp. 88-93.
13. Gromoll H.C., Terwilliger B. & Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times. *Queueing Systems*. 2018, vol. 89, no. 3, pp. 213-241.
14. Legros B. M/G/I queue with event-dependent arrival rates. *Queueing Systems*. 2018, vol. 89, no. 3, pp. 269-301.

Information about authors:

Veniamin N. Tarasov, Head of the Department of Control in Technical Systems, Povelzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara Russia
Nadezhda F. Bakhareva, Head of the Department of Informatics and Computing, Povelzhskiy state university of telecommunications and informatics, Samara Russia

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОДНОРАНГОВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26

Татарникова Татьяна Михайловна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, tm-tatarn@yandex.ru

Миклуш Виктория Александровна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия, miklush-v@yandex.ru

Manuscript received 10 February 2023;
Accepted 12 March 2023

Ключевые слова: одноранговая беспроводная сенсорная сеть, Mesh сеть, маршрут от источника к адресату, вероятностно-временные характеристики доставки данных, установление соединения

В статье приводится описание разработанной имитационной модели Mesh сеть. Имитационная модель является средством для оценки вероятностно-временных характеристик доставки данных, как основного показателя качества предоставляемого Mesh сетью сервиса. Mesh сеть является сложным объектом моделирования: подвижность узлов, отсутствия фиксированной инфраструктуры и централизованного управления, ограничения беспроводной среды передачи и ресурсов узлов – это основные особенности, которые отличают Mesh сети от проводных сетей связи. Перечисленные особенности влияют на выбор маршрута доставки данных и показатели качества предоставляемого Mesh сетью сервиса. В имитационной модели учтены особенности Mesh сети, в частности, рассмотрены особенности моделирования состояний и загрузки узлов сети, длины очереди на обслуживание, изменение уровня остаточной энергии узла. С помощью имитационного эксперимента на модели Mesh сети с заданными параметрами и внешними воздействиями можно не только оценить вероятностно-временные характеристики доставки данных, но и с учетом допустимых значений на показатели качества предоставляемого сервиса рекомендовать структуру Mesh сети.

Информация об авторах:

Татарникова Татьяна Михайловна, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной информатики, доктор технических наук, профессор, г. Санкт-Петербург, Россия

Миклуш Виктория Александровна, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационных систем и технологий, старший преподаватель, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Татарникова Т.М., Миклуш В.А. Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 20-26.

For citation:

Tatarnikova T.M., Miklush V.A. (2023) Simulation model of a peer-to-end wireless sensor network. T-Comm, vol. 17, no.3, pp. 20-26.
(in Russian)

Введение

В силу особых свойств беспроводных сенсорных сетей (БСС): подвижности узлов, отсутствия фиксированной инфраструктуры и централизованного управления, ограничения беспроводной среды передачи и ресурсов узлов, для БСС остается актуальной задача гарантированной доставки данных с соблюдением требований на качество предоставляемого сервиса [1-3]. В статье обсуждается БСС с ячеистой топологией – Mesh сеть.

В Mesh сети доставка данных выполняется по установленному соединению от источника (И-узел) к адресату (А-узел) через активные транзитные узлы (Т-узел). Соответственно каждый Т-узел, должен находиться в зоне чувствительности своего ближайшего соседа – тоже Т-узла [4,5]. И таких соединений должно быть несколько из-за возможной потери связности между узлами или смены режима функционирования сенсорных узлов [6,7].

Таким образом, необходимы модели оценки вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доставки данных, которые соответствуют требуемому качеству сервиса. Как правило, в роли такого инструмента применяется имитационная модель, в которой учитываются особенности сложного объекта моделирования, каким является Mesh сеть.

Описание процесса выбора маршрута в Mesh сети

Известно, что любая стратегия маршрутизации основывается на построении таблиц маршрутизации, сохраняемых в сетевых узлах, позволяющих в зависимости от характеристик узлов, выстраивать путь доставки данных А-узлу. Таким образом создается множество альтернативных путей для каждой пары «И-узел-А-узел» [8,9].

Предлагается при формировании таблицы маршрутизации на каждом Т-узле, записывать не только адрес узла и число Т-узлов до адресата, но и уровень заряда аккумулятора, производительность узла, наличие очереди, состояние узла и его загрузка. Эти показатели будут учитываться при принятии решения о выборе оптимального маршрута доставки данных.

Установление сквозного соединения от И-узла к А-узлу позволяет обеспечить гарантированную доставку данных. Установление соединения начинается с посылки пакета ROUTE REQUEST, при получении которого на каждом узле формируется множество альтернативных маршрутов доставки данных (рис. 1) [10].

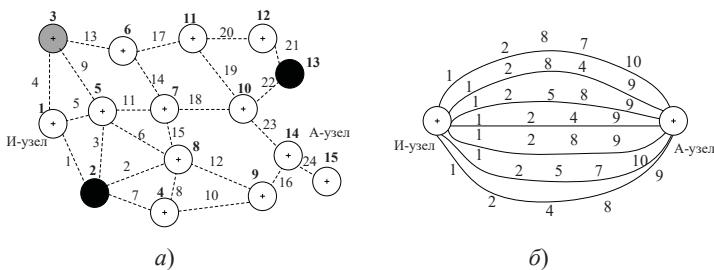


Рис. 1. Формирование маршрутов доставки данных:
а – БСС; б – множество альтернативных маршрутов между
И-узлом и А-узлом

Если любой Т-узел на маршруте находится в состоянии сна, переместился или занят обработкой собственных данных или произошла коллизия, то вызов через такой Т-узел не проходит и должен быть передан по альтернативному маршруту – выполняется рестарт к предшествующему узлу, либо к И-узлу для повторной посылки. Эта особенность должна быть отражена в модели.

Таким образом, конечный результат установления сквозного соединения имеет два исхода:

1) вызов дойдет до А-узла, будут зарезервированы ресурсы Т-узлов. По этому маршруту передается пакет данных. Время доставки оценивается как

2) вызов не дойдет до А-узла (во всем множестве R альтернативных маршрутов наличествуют полностью занятые нагрузкой транзиты).

Время доставки данных T в Mesh сети будем оценивать по (1) и (2):

$$T = t_d + t_m + \sum_{i=1}^n (t_i^{\text{обр}} + t_i^{\text{пер}}), \quad (1)$$

где t_d – время, необходимое на подготовку данных;

t_m – время построения маршрута;

n – число хоппов от И-узла к А-узлу;

$t_i^{\text{обр}}$ – время обработки пакета на i -м узле;

$t_i^{\text{пер}}$ – время передачи пакета от i -го узла.

Время построения маршрута t_m :

$$t_m = \sum_{i=1}^n t_i^{\text{пер}} + n_{\text{att}} t_{\text{out}}, \quad (2)$$

где n_{att} – число попыток установления доступа к соседним узлам; t_{out} – время истечения тайм-аута.

На построенном множестве маршрутов R методом Монте-Карло разыгрываются значения характеристик узлов маршрута. Эти характеристики разыгрываются один раз перед началом эксперимента. По факту установления соединения между И-узлом и А-узлом фиксируются значения n_{att} и t_{out} и основанное на них значение времени построения маршрута t_m из (2). Далее, поскольку все остальные составляющие выражения (1) – времени доставки данных T являются детерминированными, то их оценка сводится к простым вычислениям:

$$t_i^{\text{обр}} = \sum_{i=1}^n \frac{L}{S_i}, \quad (3)$$

$$t_i^{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{L}{\Lambda_i}, \quad (4)$$

где L – длина пакета, [бит];

S_i – производительность i -го узла маршрута, [пакетов/с];

n – число узлов в маршруте;

Λ_i – пропускная способность i -го канала, [пакетов/с].

После очередной отправки данных по маршруту уровень остаточной энергии каждого узла маршрута корректируется согласно

$$E^- = E^+ - (E'L + E''Ld^2),$$

где E^+ и E^- – уровень остаточной энергии узла до и после отправки данных соответственно.

СВЯЗЬ

E' – энергия, необходимая для генерации одного бита, Дж/бит; E'' – энергия необходимая для передачи одного бита Дж/бит·м²; d – расстояние до соседнего узла маршрута.

Для получения устойчивых результатов оценки T эксперимент повторяется несколько раз при заданной топологии.

Описание имитационной модели построения маршрута и оценки BBX доставки данных

Состояние узла «активный» или «сон» разыгрывается как простое случайное событие, исходы всех остальных характеристик узлов как группа несовместных случайных событий.

Состояние множества маршрутов R после применения моделирования простого случайного события ко всем узлам БСС получаем некоторое число непроводящих Т-узлов. В результате векторы R_1, R_2, \dots, R_n , получают конкретную комбинацию из l единиц и $(n-l)$ нулей. С учетом условий построения маршрута вычисляется значение $\xi(n|l)_k = f[R_{ij}^k]$, где

$\xi(n|l)_k$ – исход наличия или отсутствия маршрута при k -м испытании; $\xi(n|l)_k \in (0,1)$. Значение $\xi(x|\eta)_k = 0$ означает, что маршрут от И-узла до А-узла не построен: все маршруты множества R содержать нули, либо число попыток разрешения коллизий превысило порогового значения.

Коэффициент загрузки ρ для каждого узла разыгрываем как дискретную случайную величину $z \in [0,1]$ – «метод испытания по жребию». Длину очереди также разыгрываем методом «испытание по жребию» из диапазона, заданного функцией принадлежности: $[0; 10]$.

Имитационная модель построения маршрута в Mesh сети – то программная модель, позволяющая:

- во-первых, создать сеть с заданной топологией взаимодействия сетевых узлов,

- во-вторых, проводить имитационный эксперимент на Mesh сети с целью определения BBX доставки данных.

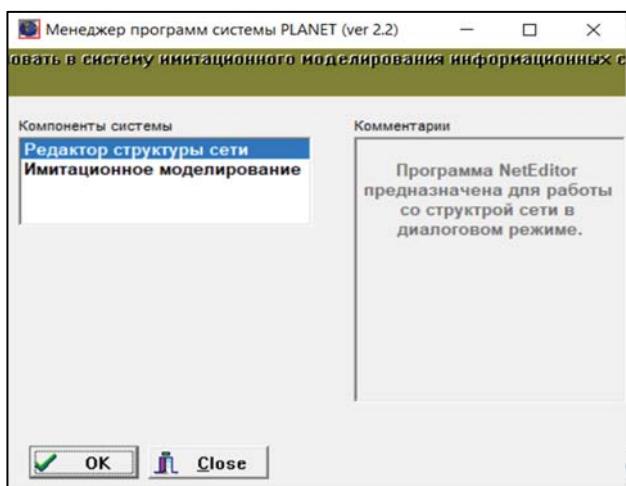


Рис. 2. Интерфейс программной реализации имитационной модели построения маршрутов доставки данных в Mesh сети

В редакторе структуры сети при нажатии на вкладку «Добавить» → «Добавить УК» в поле моделирования добавляется новый узел, при нажатии на вкладку «Добавить» → «Добавить КС» в поле моделирования добавляется канал связи (рис. 3).

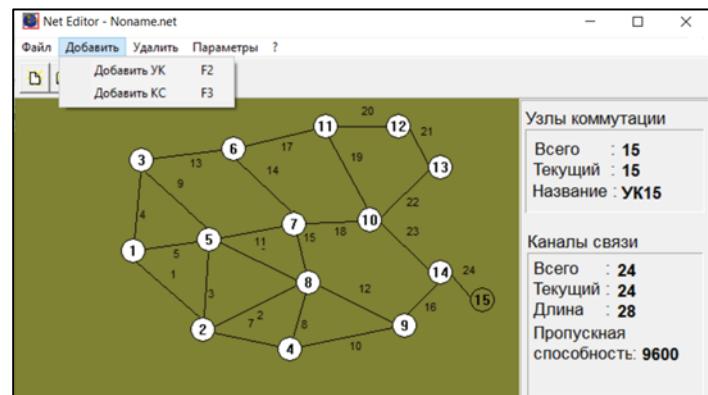


Рис. 3. Интерфейс редактора структуры сети (добавление узлов и каналов)

Во вкладке «Параметры» задаются параметры сетевого узла и канала соответственно. Для сетевого узла – это вероятность перехода в «спящий» режим (рис. 4), для канала связи – это радиус действия сигнала, скорость передачи данных и вероятность разрыва соединения (рис. 5). По умолчанию параметры имеют минимальное значение: вероятность перехода в «спящий» режим – 10^{-3} ; радиус действия сигнала – 64 м; скорость передачи данных – 9,6 Кбит/с и вероятность разрыва соединения – $5 \cdot 10^{-5}$.

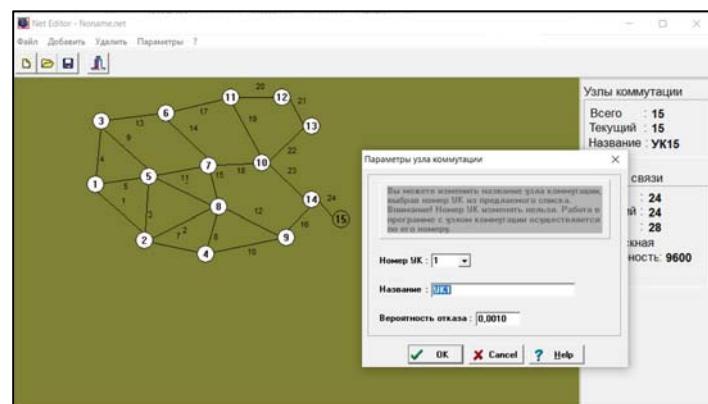


Рис. 4. Ввод параметров узла

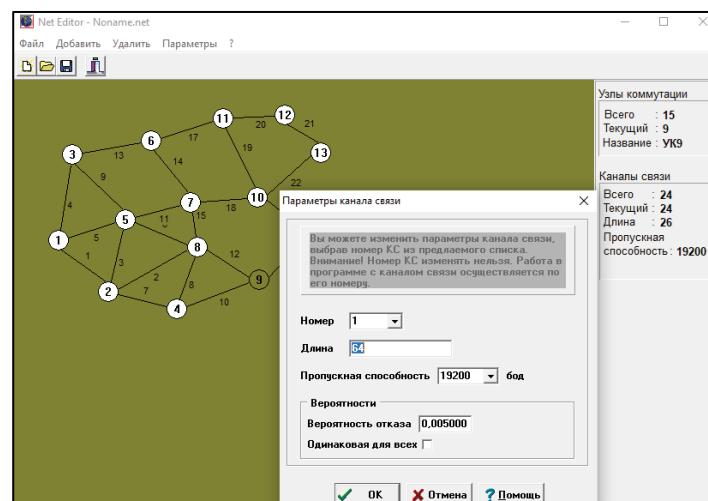


Рис. 5. Ввод параметров канала

Выполнение имитационного эксперимента на модели БСС заключается в том, что в каждой новой попытке установить соединение между выбранными узлами источника и адресата (на рис. 6 – красным цветом) определяется число сетевых узлов и каналов связи, через которые не может быть установлено соединение. Это либо «спящие» узлы (на рис. 7 – черные кружочки), либо разорванные связи (на рис. 8 – пунктирная линия).

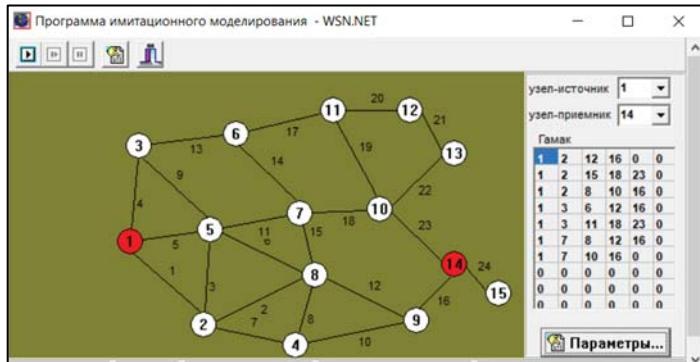


Рис. 6. Окно визуализации эксперимента на модели



Рис. 7. Окно визуализации эксперимента на модели (спящие узлы – черные кружочки)

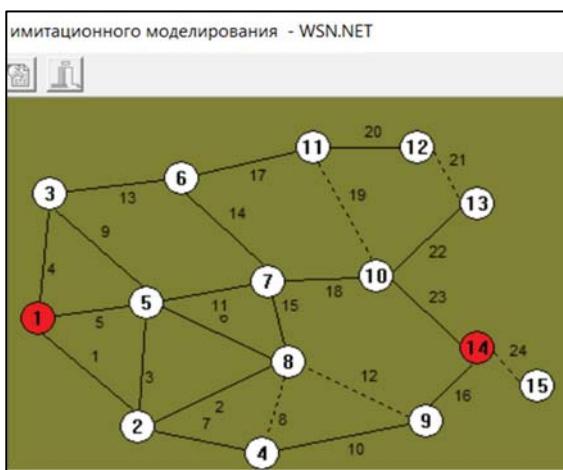


Рис. 8. Окно визуализации эксперимента на модели (непроводящие каналы – пунктирная линия)

При установленном сквозном соединении – маршрута доставки фиксируется время t_m и к нему добавляется время доставки самих данных, вычисляемое по (1) и (2).

По окончании эксперимента в окне «Статистика» публикуются результаты имитационного моделирования – ВВХ установления соединения в Mesh сети (рис. 9).

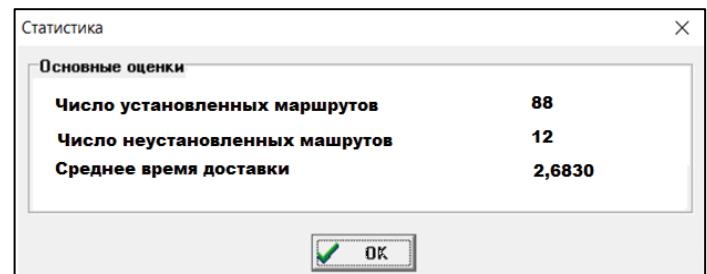


Рис. 9. Окно визуализации результатов эксперимента

На рисунке 10 приведено окно смены приоритета отправки.

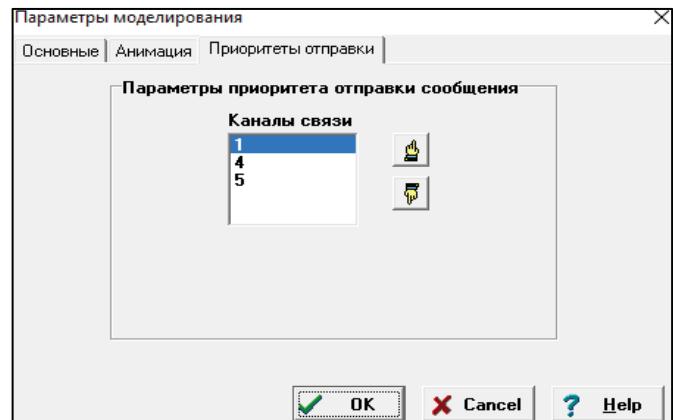


Рис. 10. Окно для смены приоритета отправки

По умолчанию стоит приоритет, заданный исходящим каналом с наименьшим номером. Для узла 1 рассматриваемой в эксперименте БСС таких приоритетов будет: 1, 4 и 5. Для каждого приоритета эксперимент проводится отдельно и решение о выборе приоритета решается по результатам ВВХ.

Анализ результатов имитационного эксперимента по оценке ВВХ доставки данных

Заданы следующие параметры, характеризующие УК и КС:

- Вероятность перехода узла в спящий режим – 0,01;
 - Пропускная способность канала – 9,6 Кбит/с
 - Вероятность перемещения узла – $5 \cdot 10^{-3}$
 - Число попыток разрешения коллизий – задается
 - Время тайм-аута – 0,7 мс
 - Количество экспериментов – 100
- Построим зависимости T от:
- количества недоступных каналов n_d (узел вышел из сети или переместился), рис. 10;

– количества попыток установления соединения n_{att} с соедним узлом (рис. 11).

— серии эксперимента (каждая серия включает 100 экспериментов), рис. 12.

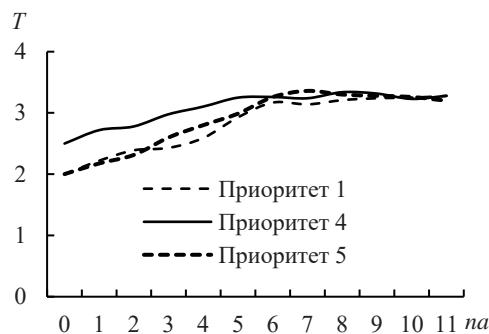


Рис. 10. Зависимость T от n_a

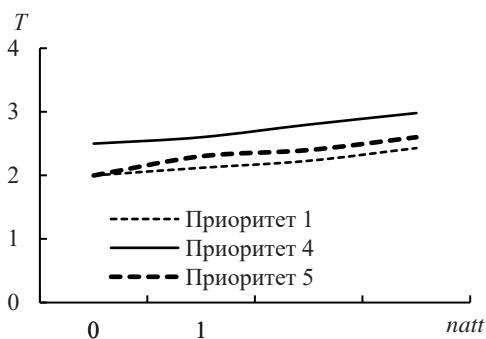
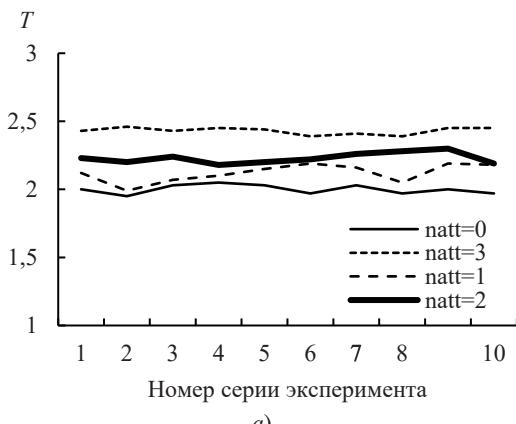
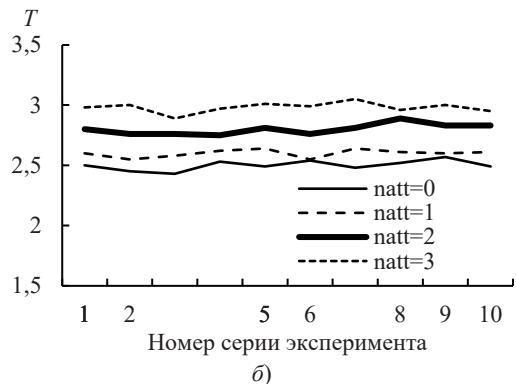


Рис. 11. Зависимость T от n_{att}



а)



б)

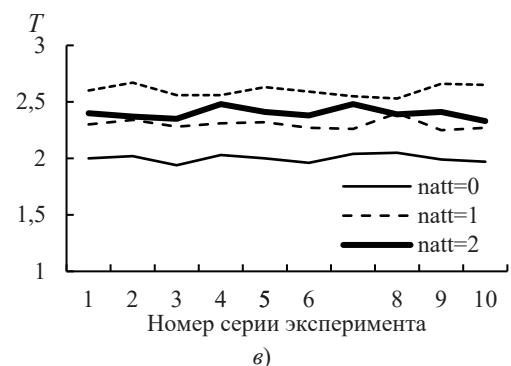


Рис. 12. Зависимость T от серии эксперимента:
а – для приоритета 1; б – для приоритета 2; в – для приоритета 3

С увеличением количества недоступных каналов увеличивается время доставки данных из-за необходимости поиска альтернативных путей доставки. Так, время доставки по приоритету 1 при доступности всех каналов на пути от И-узла (узел 1) к А-узлу (узел 14) составит 2 мс, и при увеличении недоступных каналов по всей БСС до 10-ти увеличивается до 3,23 с. Аналогичные выводы можно сделать и о времени доставки по приоритетам 4 и 5.

При приближении числа недоступных каналов к 50% от общего числа каналов на всей Mesh сети время доставки данных сходится к одному значению – возможности по поиску альтернативных маршрутов сужаются. Так, при 11 недоступных каналах из 24-х каналов на заданной топологии Mesh сети сходятся в одну точку – 3,25 мс (рис. 10). Также видно, что для разных приоритетов отправки пакетов время доставки разное, что создает альтернативу выбора маршрута.

Количество попыток разрешения коллизий также влияет на время доставки данных (рис. 11) – время увеличивается, но более одной попытки разрешения коллизий, по сути, увеличивает вероятность доставки данных.

Графики на рисунке 12 показывают значения измеренного времени доставки данных в каждой серии эксперимента, дисперсия не превышает $1,4 \cdot 10^{-3}$.

Построим зависимости вероятности доставки данных P при $n_{att} = 3$ от:

- количества недоступных каналов n_a (рис. 13).
- количества «спящих» узлов n_s (рис. 14).
- количества попыток установления соединения n_{att} с соединимым узлом (рис. 15).

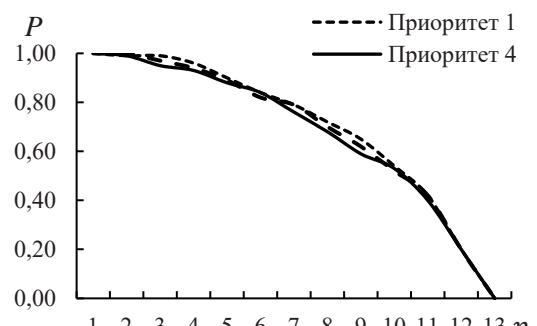
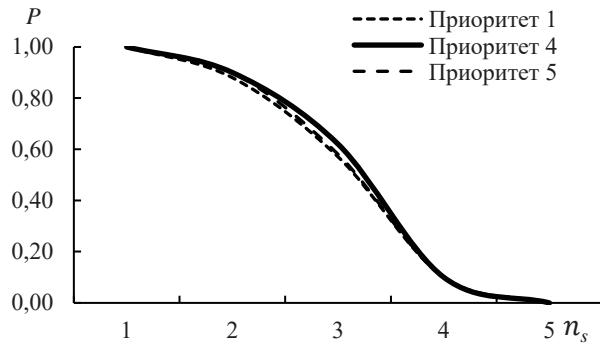
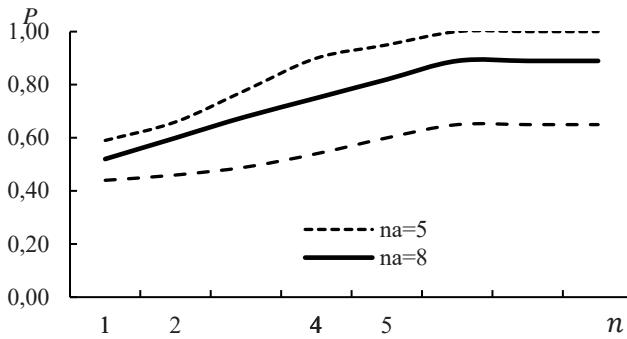


Рис. 13. Зависимость P от n_a

Рис. 14. Зависимость P от n_s Рис. 15. Зависимость P от n_{att}

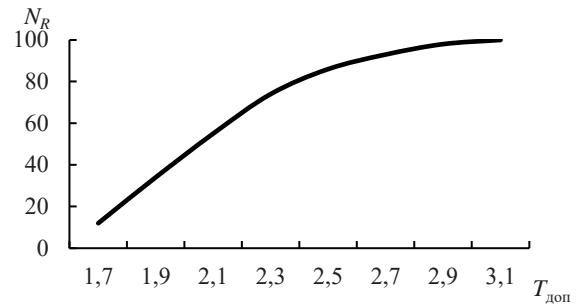
Вероятность доставки данных будет снижаться с увеличением количества недоступных каналов и «спящих» узлов. С увеличением количества недоступных каналов к 50% от общего количества каналов Mesh сети вероятность доставки данных быстро падает до нуля (рис. 13). При числе «спящих» узлов более 3-х сеть быстро теряет функцию доставки данных, так что вероятность построения маршрута сходится к нулю (рис. 14).

Вероятность доставки данных также увеличивается с ростом числа попыток установления соединения с соседним узлом, но до определенного значения – с большим числом недоступных каналов, например 10, увеличение числа попыток установления соединения с соседними узлами уже не влияет на вероятность доставки данных (рис. 15).

Этот эксперимент устанавливает предельное количество «спящих» узлов и недоступных каналов, меняющих структуру Mesh сети, но позволяющих сохранить ее работоспособность, а также количество попыток установления соединения с соседними узлами, приводящее к гарантированной доставке данных при заданной топологии Mesh сети.

В имитационной модели предусмотрен эксперимент при заданном требуемом времени доставки данных $T_{\text{доп}}$, что позволяет рекомендовать значение $T_{\text{доп}}$ для конкретной Mesh сети. На рисунке 16 приведены зависимости количества построенных маршрутов N_R от $T_{\text{доп}}$, при этом зафиксируем $n_{att}=3$, $n_a=3$ для отправки данных по приоритету 1 (рис. 16).

По результатам на рисунке 16 можно сделать вывод о том, что с увеличением времени, отводимого на доставку пакета, соответственно увеличивается количество маршрутов доставки, это означает, что вероятность доставки будет приближаться к единице.

Рис. 16. Зависимость количества построенных маршрутов от $T_{\text{доп}}$

Таким образом, при определенных исходных данных можно находить гарантированное время доставки.

На рисунке 17 приведена динамика потери узлов Mesh сети при истощении энергии узлов.

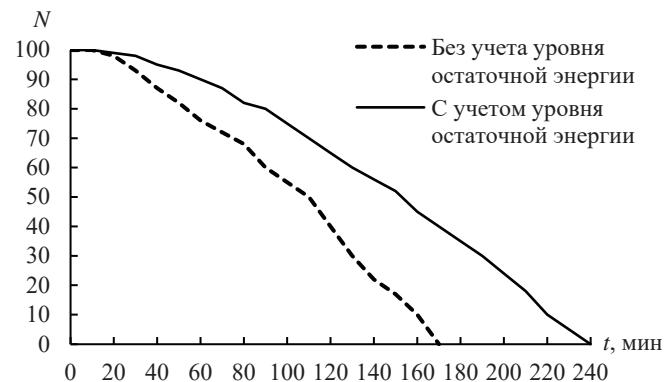


Рис. 17. Динамика числа узлов в жизненном цикле БСС

Если не учитывать уровень остаточной энергии узлов при выборе маршрута доставки данных, а выбирать кратчайшие маршруты только по времени доставки данных, как это реализуется в инфраструктурных сетях передачи данных, то время жизни t Mesh сети будет сокращаться значительно быстрее в сравнении с этой же сетью, но в которой учитывается уровень остаточной энергии узлов при выборе маршрута доставки данных.

Это связано с тем, что при каждой отправке от И-узла к А-узлу будет выбираться один и тот же маршрут, что быстро приведет к истощению энергии узлов маршрута и, соответственно, всей Mesh сети, т.к. узлы маршрута являются транзитными узлами и других маршрутов. В данной топологии учет уровня остаточной энергии узлов Mesh сети позволяет увеличить t на один час.

Заключение

Разработана имитационная модель самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети с ячеистой топологией – Mesh сети, которая является средством для исследования работы данного класса инфокоммуникационных сетей. В модели учтены особенности Mesh сети, влияющие на выбор маршрута от узла источника узлу адресата и значения показателей качества предоставляемого сервиса доставки данных.

С помощью имитационного эксперимента на модели Mesh сети с заданными параметрами и внешними воздействиями можно не только оценить вероятностно-временные характеристики доставки данных, но и с учетом допустимых значений на показатели качества предоставляемого сервиса рекомендовать структуру Mesh сети.

Литература

- Алзагир А.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 6. С. 2-7. DOI: 10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- Мулярчик К.С., Полочанский А.С. Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. № 2. С. 65-70.
- Татарникова Т.М., Богданов П.Ю., Краева Е.В. Предложения по обеспечению безопасности системы умного дома, основанные на оценке потребляемых ресурсов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 4. С. 88-94.
- Киреев С.А. Оптимизация передачи информации в самоорганизующихся сетях // Процессы управления и устойчивость. 2020. Т. 7. №1. С. 381-386.
- Миклуш В.А., Татарникова Т.М. Решение задачи расположения датчиков различной физической природы при организации беспроводной сенсорной сети с топологией Mesh // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76, № 12. С. 15-20. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202212-03>
- Кашкаров Д.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Модель и метод использования множественных связей для реализации сверхнадежных соединений в сети 5G // Электросвязь. 2021. № 8. С. 16-22. DOI: 10.34832/ELSV.2021.21.8.001
- Татарникова Т.М. Аналитико-статистическая модель оценки живучести сетей с топологией mesh // Информационно-управляющие системы. 2017. №1(86). С. 17-22. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2017.1.17.
- Pham V. D., Kisel V., Kirichek R., Koucheryavy A., Shestakov A. Evaluation of a mesh network based on Lora technology. 24th International Conference on Advanced Communication Technology: Artificial Intelligence Technologies toward Cybersecurity. 2022, pp. 1280-1285. doi:10.23919/ICACT53585.2022.9728830
- Lysogor I., Voskov L., Rolich A., Efremov S. Study of data transfer in a heterogeneous Lora-satellite network for the internet of remote things // Sensors. 2019. V. 19, no. 15. P. 3384.
- Федоров А. Е., Легков К.Е. Моделирование упреждающего и реагирующего протоколов маршрутизации в беспроводной мобильной адаптивной сети // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2014. №1. С. 362-65.

SIMULATION MODEL OF A PEER-TO-END WIRELESS SENSOR NETWORK

Tatyana M. Tatarnikova, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, tm-tatarn@yandex.ru
Viktoria A. Miklush, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, miklush-v@yandex.ru

Abstract

The article provides a description of the developed simulation model Mesh network. The simulation model is a tool for assessing the probabilistic and temporal characteristics of data delivery, as the main indicator of the quality of the service provided by the Mesh network. A mesh network is a complex object of modeling: the mobility of nodes, the lack of a fixed infrastructure and centralized control, the limitations of the wireless transmission medium and node resources are the main features that distinguish Mesh networks from wired communication networks. These features affect the choice of the data delivery route and the quality indicators of the service provided by the Mesh network. The simulation model takes into account the features of the Mesh network, in particular, the features of modeling the states and loading of network nodes, the length of the queue for service, and the change in the level of residual energy of the node are considered. With the help of a simulation experiment on a Mesh network model with given parameters and external influences, it is possible not only to evaluate the probabilistic and temporal characteristics of data delivery, but also, taking into account the acceptable values for the quality indicators of the provided service, recommend the structure of the Mesh networks.

Keywords: peer-to-peer wireless sensor network, Mesh network, route from source to destination, probabilistic-temporal characteristics of data delivery, connection establishment.

References

1. Alzagir, A.A., Paramonov, A.I., Koucheryavy, A.E. (2022), "Study of quality of service in 5G and next-generation networks", Elektrosvyaz, no. 6, pp. 2-7. DOI: 10.34832/ELSV.2022.31.6.001 (In Russian)
2. Mulyarchik, K.S., Polochansky, A.S. (2017), "Quality of service in wireless sensor networks", Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika, no. 2, pp. 65-70. (In Russian)
3. Tatarnikova, T.M., Bogdanov, P.Yu., Kraeva, E.V. (2020), "Smart home security proposals based on assessment of consumption resources", Problems of information security. Computer systems, no 4, pp. 88-94. (In Russian)
4. Kireev, S.A. (2020). "Data transfer optimization in Ad Hoc networks", Protsessy upravleniya i ustoychivost', vol. 7, no. 1, pp. 381-386. (In Russian)
5. Miklush, V.A., Tatarnikova, T.M. (2022), "Problem solution of different sensors location in organizing a Mesh topology wireless sensor network", Achievements of Modern Radioelectronics, vol. 76, no. 12, pp. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202212-03>
6. Kashkarov, D. V., Paramonov, A. I., Kucheryavy, A. E. (2021), A model and method of multi-connectivity for ultra-reliable 5G connections. Elektrosvyaz, no. 8, pp. 16-22. DOI: 10.34832/ELSV.2021.21.8.001 (In Russian)
7. Татарникова, Т.М. (2017), "Analytical-Statistical Model of Mesh Network Survivability Evaluation", Information and control systems, vol. 1(86), pp. 17-22, DOI: 10.15217/issnl684-8853.2017.1.17.
8. Pham, V. D., Kisel, V., Kirichek, R., Koucheryavy, A., Shestakov, A. (2022), Evaluation of a mesh network based on Lora technology. 24th International Conference on Advanced Communication Technology: Artificial Intelligence Technologies toward Cybersecurity, pp. 1280-1285. doi: 10.23919/ICACT53585.2022.9728830
9. Lysogor I., Voskov L., Rolich A., Efremov S. Study of data transfer in a heterogeneous Lora-satellite network for the internet of remote things. Sensors. 2019. Vol. 19, no. 15. P. 3384.
10. Federov A.E., Legkov K.E. (2014), Modeling proactive and reactive routing protocols in a wireless mobile adaptive. Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki, no. 1, pp. 362-65. (In Russian)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-27-33

Manuscript received 14 February 2023;
Accepted 16 March 2023

Аль-Дулаими Омар Хатем Заидан,
 Воронежский государственный технический университет,
 г. Воронеж, Россия, oamar1982@yandex.ru

Ключевые слова: вероятностная нейронная сеть,
 классификация, успеваемость учащихся, качество
 образования

Традиционный метод определения качества образования слишком однозначен и необоснован, что не подходит для комплексной оценки способностей учащихся. Целью статьи является обоснование использования алгоритма вероятностной нейронной сети. **Методы исследования.** Достоверность представленных результатов обеспечивается анализом научной литературы, моделированием вероятностной нейронной сети, сравнительным анализом моделей и оценкой эффективности модели. Результаты исследований. В этой статье алгоритм вероятностной нейронной сети (PNN) используется для определения качества образования путем рассмотрения важного влияния между различными достижениями учащихся. Алгоритм PNN происходит от байесовского правила принятия решений и использует нелинейное окно Гаусса Парзена в качестве функции плотности вероятности. Поскольку модель PNN обладает сильными нелинейными и антиинтерференционными свойствами, она подходит для определения качества образования путем классификации достижений учащихся. Кроме того, в этой статье также обсуждается влияние различных моделей оценки на точность и эффективность классификации. Кроме того, также обсуждается влияние значения спреда на модель PNN. **Область применения.** Наконец, фактические данные используются для определения качества образования. **Выходы.** Экспериментальные результаты показывают, что точность обнаружения может достигать 95%, а время обнаружения составляет всего 0,0156 с на основе предложенного метода. То есть метод представляет собой очень практичный алгоритм обнаружения с высокой точностью и эффективностью. Кроме того, в нем также содержится информация о том, как еще больше улучшить качество преподавания. Доказано, что использование модели PNN позволяет точно классифицировать достижения студентов по критерию качества.

Для цитирования:

Аль-Дулаими Омар Хатем Заидан. Использование алгоритма вероятностной нейронной сети для измерения уровня качества образования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 27-33.

For citation:

Al-Dulaimi Omar Hatem Zaidan. Using a probabilistic neural network algorithm to measure the level of education quality. *T-Comm*, vol. 17, no.3, pp. 27-33. (in Russian)

1. Введение

С быстрым развитием информационных технологий многие университеты используют систему определения качества профессионального образования для оценки способностей студентов. Однако существующая система обнаружения недостаточна для эффективной оценки качества образования. В последние годы, с расширением высшего образования и быстрым ростом числа студентов, достижения студентов производят большое количество данных.

Таким образом, необходимо использовать комплексный метод многоракурсного обнаружения для замены обычного метода одиночного обнаружения. В настоящее время, с учетом реальных потребностей системы определения качества образования, она должна использовать передовые информационные технологии для получения эффективной оценки достижений учащихся и, таким образом, выявления корреляции между достижениями и способностями учащихся. То есть очень важно всесторонне и объективно оценивать качество образования на основе передового метода обнаружения. Важным средством определения качества образования является классификация достижений учащихся.

Его основная цель – построить правильную модель классификации для анализа эффективной информации, скрытой в достижениях учащихся. На данный момент существует множество методов классификации, таких как моментные инварианты [1], случайный лес [2,3], метод опорных векторов [4], анализ главных компонентов [5], марковские случайные поля [6], оптимизация роя частиц. [7], дискретное вейвлет-преобразование [8] и др. Кроме того, в [9] предлагается новая структура сложного сетевого классификатора для решения проблемы классификации сетей, которая показывает, что предложенный метод хорошо работает в крупномасштабных сетях. В [10] он использует метод предметно-состязательного обучения для классификации текста с низкими ресурсами и может получить хорошие результаты. В [11] представлен метод обнаружения и классификации десяти коротких замыканий в распределительных сетях, что доказывает эффективность предложенного метода.

Предложен алгоритм распознавания изображений SAR путем объединения сверточной нейронной сети и алгоритма экстремальной обучающей машины, а точность распознавания изображений составляет 100%.

В этой статье модель PNN используется для классификации достижений учащихся. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод может повысить эффективность классификации, чтобы улучшить качество обучения и способствовать реформе обучения. Оставшаяся часть статьи структурирована следующим образом: в разделе 2 вводится модель PNN и связанная с ней концепция. В разделе 3 приводится экспериментальный метод, обсуждения и анализ представлены на основе экспериментальных результатов. В разделе 4 дается заключение.

2. Вероятностный нейросетевой алгоритм

В технологии нейронной сети модель PNN использует экспоненциальную функцию для замены функции активации S-образной формы. Это нейронная сеть с прямой связью, которая подходит для классификации данных.

2.1. Основная концепция модели PNN

Структура PNN содержит четыре слоя, такие как входной слой, слой шаблона, слой суммирования и выходной слой. PNN структура показана на рисунке 1.

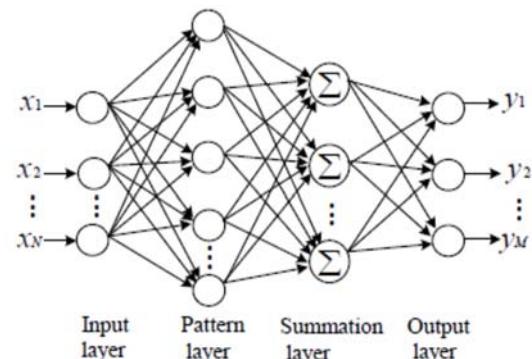


Рис. 1. Структура модели PNN

Эффект каждого слоя описан на рис. 2.

Слой шаблона: вычислить взвешенную сумму между входным слоем и скрытым слоем

Слой суммирования: суммирование и сопоставление шаблонов классификации и нейронов.

Выходной слой: выбор нейронов с максимальной апостериорной плотностью вероятности в качестве выходных данных из оцененных различных плотностей вероятности.

Рис. 2. Функции каждого слоя

К основным преимуществам модели PNN можно отнести следующие аспекты:

- (1) Простая структура и высокая скорость обучения, которая подходит для обработки данных в реальном времени.
- (2) Каждая обучающая выборка определяет нейрон скрытого слоя, и значение веса нейрона берется непосредственно из значения входной выборки.
- (3) Он может реализовать нелинейную аппроксимацию произвольно, результат классификации нечувствителен к форме базисной функции.
- (4) Каким бы сложным ни был процесс классификации, при наличии достаточного количества обучающих данных можно получить оптимальное решение по правилу байесовской классификации.

(5) Нет необходимости переобучать при добавлении новых образцов.

(6) Используйте алгоритм линейного обучения, чтобы выполнить задачу алгоритма нелинейного обучения. Кроме того, он также обладает такими достоинствами, как высокая точность классификации, хорошая расширяемость и хорошая отказоустойчивость и др.

Обычно базовый алгоритм PNN показан на рис. 3. Конечно, следует отметить, что PNN делает три предположения для функции плотности вероятности.

(1) Функция плотности вероятности каждой категории идентична.

(2) Функция плотности вероятности удовлетворяет распределению Гаусса.

(3) Вариационная матрица функции плотности вероятности распределения Гаусса является диагональной матрицей, и значения каждого диагонального элемента равны.

Модель PNN имеет хорошие характеристики, основанные на вышеупомянутых предположениях.



Рис. 3. Базовый алгоритм PNN

Конкретно алгоритм PNN можно описать следующим образом:

(1) Используйте каждую выборку в качестве вектора и постройте начальные обучающие векторы из исходных данных.

(2) Количество нейронов во входном слое равно размерности векторов признаков. Входные узлы — это просто узлы распределения, которые обеспечивают одинаковые входные значения для всех узлов шаблона, и векторы признаков передаются каждому узлу в слой узора. (3) Количество нейронов

в слое шаблона равно количеству входных выборок. Когда входные данные даны, он создаст вектор. На этом шаге оператор функции активации выражается как:

$$g(z_j) = \exp[(z_j - 1)/\sigma^2] \quad (1)$$

В уравнении (1) z_j является выходным значением. На этом шаге каждое значение входной выборки будет умножено на весовой коэффициент слоя шаблона. Выходное значение каждой единицы в слое шаблона выражается как:

$$f_A(x) = \sum \exp\left(-\frac{\|x - x_{ij}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

В уравнении (2), $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ — входная выборка, X_{ij} — матрица весов между входным слоем и слоем шаблона, это означает, что j обучающая выборка принадлежит i категории, $i = 1, 2, \dots, M$, $j = i, 2, \dots, N$ — общее количество проб, N — номер категории i . σ — коэффициент сглаживания, уникальное значение, которое можно регулировать. Как правило, σ устанавливается между 0 и 1.

Условная вероятность атрибуции выборки выражается функцией плотности вероятности.

$$f_A(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \frac{1}{m} \sum \exp\left[-\frac{\|x - x_{ij}\|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

В уравнении (3), n — размерность характеристических векторов пространства выборки, m представляет количество выборок, принадлежащих категории i . (4) Как показано в уравнении (4), слой суммирования соединяет все виды единиц слоя образца и выборочно добавляет вероятность, принадлежащую к одной и той же категории в том же слое. В этом слое количество нейронов равно количеству выборок.

$$f_A = \sum_{i=1}^m g(z_i) \quad (4)$$

(5) Выходной слой представляет собой конкурентный нейронный решающий слой, где конкурентная функция выбирает максимальную вероятность, которая является конкурентным выходом другой функции плотности вероятности, и каждый нейрон соответствует одной категории соответственно.

Количество нейронов в выходном слое равно количеству обучающих выборок. Обычно данные тестирования близки к данным выборки. В итоге в конкурирующем процессе побеждает только один нейрон. Выход нейрона с максимальной вероятностью равен 1, а категория соответствует положительному результату классификации выборки, а остальные нейроны — отрицательным результатам классификации выборки.

2.2 Метод классификации на основе модели PNN

Модель PNN относится к контролируемому сетевому классификатору, обладает характеристиками быстрого обучения, хорошей отказоустойчивостью и способностью точной классификации. Метод классификации, основанный на модели PNN, можно описать следующим образом:

Предположим, что есть две категории θ_A , θ_B . Для каждой выборки $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ она принадлежит θ_A или θ_B . Он должен удовлетворять правилу Байеса:

Если $h_A l_A f_A(X) > h_B l_B f_B(X)$, то $X \in \theta_A$; если $h_A l_A f_A(X) < h_B l_B f_B(X)$, то $X \in \theta_B$;

Где h_A и f_B – априорные вероятности, и они удовлетворяют условию $h_A = N_A/N$, $h_B = N_B/N$. N_A и N_B – количество обучающих выборок θ_A и θ_B соответственно. N – общее количество обучающих выборок. l_A и l_B - функции потерь с неправильным решением соответственно. f_A и f_B – функции плотности вероятности категорий θ_A и θ_B соответственно.

PNN – это искусственная нейронная сеть, основанная на статистическом принципе. Он поглощает преимущества радиальной базисной функции и классического принципа оценки функции плотности вероятности. По сравнению с традиционной нейронной сетью с прямой связью она имеет более значительные преимущества в классификации.

3. Эксперименты и результаты

Значительную роль в определении качества образования играет классификация достижений учащихся. Для объективной, справедливой и разумной оценки качества образования очень важно точно и правильно оценивать учащихся в соответствии с их достижениями. Модель PNN имеет характеристики быстрой скорости классификации, высокой точности и стабильных результатов тестирования.

В этой статье мы в основном устанавливаем модель PNN, чтобы выяснить основные факторы, влияющие на успеваемость учащихся. Кроме того, она классифицирует достижения учащихся на основе метода диверсифицированной оценки, чтобы обеспечить руководство для реформы образования. Классификация достижений студентов включает следующие несколько частей, которые представлены на рисунке 4.



Рис. 4. Следующая схема классификации на основе модели PNN

На рисунке 4 достижения студентов в первую очередь приобретаются деканатом. Затем он создает сеть PNN на основе представленного выше метода. После этого он обучает и проверяет достижения студентов. В этом процессе данные обучения и данные тестирования выбираются случайным образом для повышения точности результатов классификации. Наконец, он получает экспериментальные результаты, и результаты анализируются на основе точности и эффективности соответственно.

С помощью мощной характеристики PNN можно получить удовлетворительные результаты классификации. Достижения учащихся в основном включают обычное поведение, домашнюю работу, промежуточный экзамен и выпускной экзамен и др. В частности, обычное поведение включает посещение (20%), просмотр видео MOOK (15%), взаимодействие (10%), обсуждение (15%), ответ (15%), небольшие эксперименты (15%), краткое эссе (10%). На самом деле, обычное поведение может действительно и эффективно отражать состояние обучения учащихся и их способность к обучению.

Кроме того, поскольку диверсифицированный метод оценки может выявить всесторонние способности учащихся, создается диверсифицированная модель руководства по классификации, основанная на достижениях учащихся.

В таблице 1 показано распределение успеваемости учащихся. Эти данные взяты из курса «Аналоговые электронные технологии», который является отличным провинциальным открытым онлайн-курсом.

Таблица 1
Достижения студентов

Номер	Обычное поведение	Домашняя работа	Средний срок	Окончательный	Всего
1	95	85	85	72	77
2	85	85	83	73	76
3	90	80	83	73	76
4	60	60	80	67	67
5	100	90	85	75	80
6	94	95	79	65	72
7	80	70	70	38	49
8	95	85	75	66	72
9	100	96	96	87	90
10	95	79	82	66	72
11	95	75	81	56	64
12	60	60	68	69	67
13	95	85	87	68	74
14	100	94	92	84	87

Разделяет достижения учащихся на пять категорий: отлично, хорошо, средне, удовлетворительно и неудовлетворительно. На самом деле, полезно изучить потенциальные способности учащихся и обеспечить полезное справочное значение для реформы образования путем всесторонней оценки достижений учащихся. Что касается модели PNN, то она содержит множество параметров. Различные параметры оказывают большое влияние на его производительность. Значение спреда – один из важных параметров, от которого зависит точность тестирования. Влияние величины спреда на PNN показано на рисунке 5.

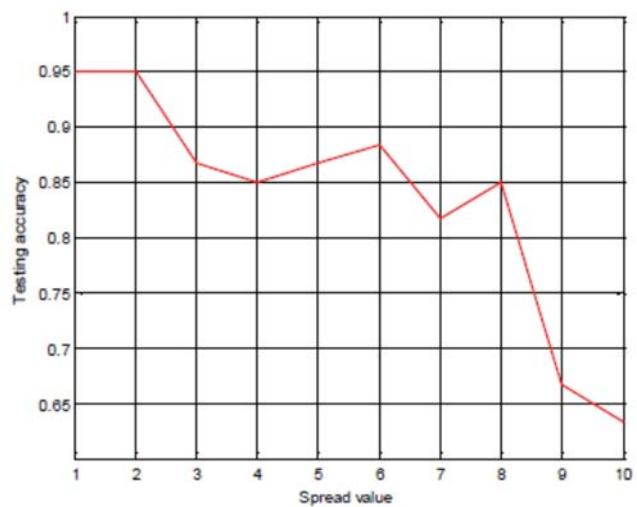


Рис. 5. Влияние величины спреда на PNN

На рисунке 5 видно, что показатель точности тестирования имеет тенденцию к снижению с увеличением значения спреда.

В частности, когда значение разброса установлено на 10, показатель точности тестирования составляет всего 63,33%, что не способствует классификации достижений учащихся. Поэтому важно выбрать разумное значение спреда. В этой статье значение спреда установлено равным 1 на основе приведенного выше анализа.

Достижения учащихся делятся на пять оценок, соответствующих 15 моделям PNN. 15 моделей показаны в таблице 2.

Таблица 2

Соответствующая связь между моделью входными переменными

Оценки	Модель	Обычное поведение	Домашняя работа	Средний срок	Окончательный	Всего
1	1	✓	✓	✓	✓	✓
2	2		✓	✓	✓	✓
3	3			✓	✓	✓
4	4				✓	✓
5	5					✓
6	6	•	•	•	•	•
7	7		•	•	•	•
8	8			•	•	•
9	9				•	•
10			○	○	○	○
11				○	○	○
12					○	○
13				■	■	■
14					■	■
15					❖	❖

Различные модели будут давать разную точность тестирования. Чтобы продемонстрировать способность PNN классифицировать достижения учащихся, модель общей регрессионной нейронной сети (GRNN) также используется для одновременной классификации достижений учащихся, а диаграмма сравнения точности тестирования 15 моделей показана на рисунке 5.

На рисунке 6 можно получить более высокую точность тестирования с использованием модели GRNN, чем у модели PNN во время моделирования с 1 по модель 12. Однако в модели 14 и модели 15 точность тестирования на основе модели PNN выше, чем у GRNN. модель. Кроме того, он может достичь точности тестирования только 93,33% на основе модели GRNN, в то время как самая высокая точность тестирования может достигать 95% на основе модели PNN.

Кроме того, согласно приведенным выше результатам тестирования, мы можем сделать соответствующие предложения по учебной ситуации студентов. Например, как показано в таблице 1, № 2 и № 3 имеют одинаковые общие баллы, но их обычное поведение и домашние задания разные. Таким образом, мы можем выдвинуть конкретные предложения для двух студентов на основе полученных результатов. Кроме того, мы можем выдвинуть некоторые мнения в соответствии с рациональностью классификации студентов, чтобы студенты увидели свои преимущества и недостатки и лучше спланировали свое будущее обучение.

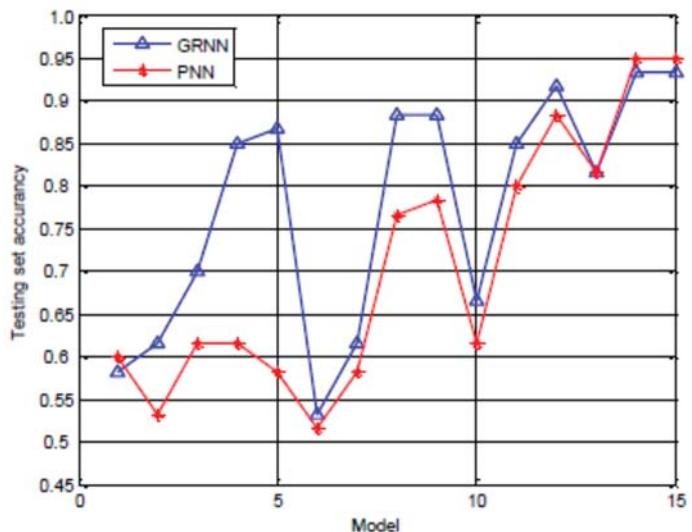


Рис. 6. Диаграмма сравнения точности тестирования на разных моделях

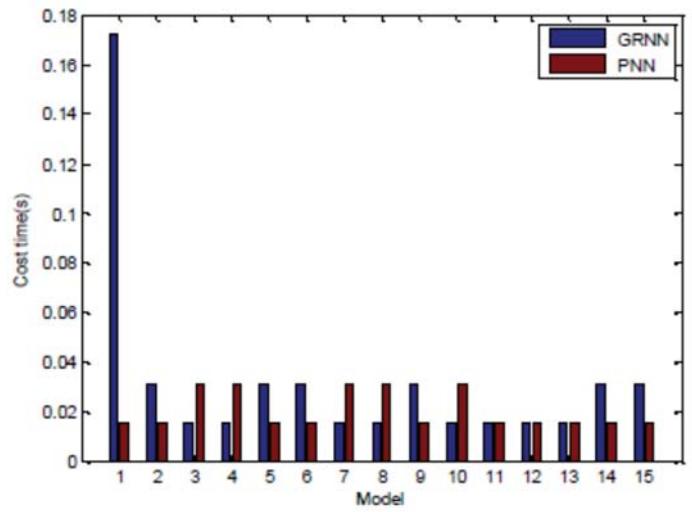


Рис. 7. Диаграмма сравнения стоимости и времени на основе моделей GRNN и PNN

Что касается системы обнаружения, эффективность является еще одним фактором, заслуживающим внимания. Обычно использование другой модели требует разного времени. Как показано на рис. 7, на основе модели GRNN потребуется больше времени, чем на основе модели PNN. Самое длинное время составляет 0,1716 с на основе модели GRNN, в то время как самое длинное время составляет 0,0312 с, а самое короткое время составляет всего 0,0156 с на основе модели PNN. Очевидно, что 14-я и 15-я модели имеют значительные преимущества в эффективности классификации.

В соответствии с точностью и эффективностью классификации мы используем 15-ю модель GRNN и PNN для классификации достижений учащихся соответственно. Результат классификации показан на рисунке 8.

На рисунке 8 представлены 3 категории ошибок во время 60 тестовых выборок на основе модели PNN, а 4 категории ошибок возникают в модели GRNN.

Кроме того, мы классифицируем достижения учащихся с использованием модели PNN, время затрат составляет всего 0,0156 с, а точность классификации составляет 95%, что доказывает, что это эффективный метод определения качества образования, основанный на модели PNN.

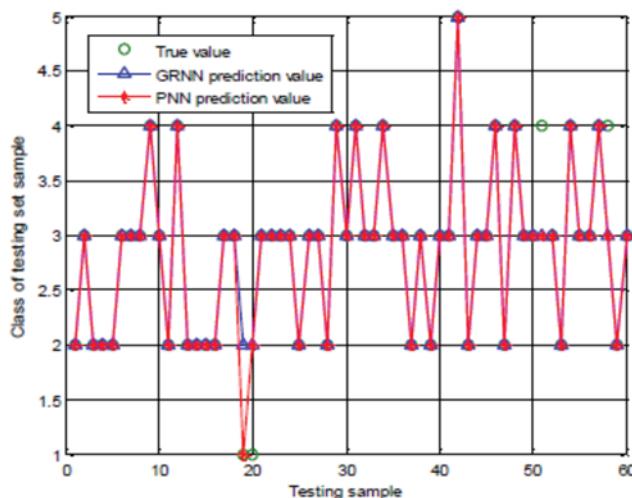


Рис. 8. Классификация выборки тестовой выборки на основе моделей GRNN и PNN

Вывод

Модель PNN включает в себя входной слой, слой шаблона, слой суммирования и выходной слой. Он использует байесовский классификатор и теорию принятия решений для построения модели системы. В этом процессе в качестве функции активации используется нелинейная функция Гаусса. Он обладает преимуществами быстрой скорости и высокой точности классификации, поэтому он подходит для определения качества образования путем классификации достижений учащихся. В этой статье достижения и способности студентов полностью рассматриваются с использованием модели PNN для классификации их достижений. Экспериментальные результаты доказывают, что предложенный метод обладает высокой точностью и эффективностью классификации. Это эффективный и обоснованный метод определения качества образования.

В дальнейшем дальнейшие исследования могут быть проведены со следующих аспектов:

(1) Увеличить разнообразие классов и количество выборок данных.

(2) Увеличить разнообразие индекса оценки качества обучения студентов.

(3) Применить продвинутую теорию глубокого обучения, такую как сверточная нейронная сеть, сеть глубокого убеждения и т. д., для анализа образцов данных и использовать

больше методов для сравнения с предлагаемым методом, чтобы еще больше повысить эффективность определения качества обучения учащихся.

Литература

1. Мухамед Бен Хай Роума, Йовиша Жунич, Мухаммед Чачан Юнис. Инвариантны моментов для многокомпонентных форм с приложениями к классификации листьев // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. 2017. № 142(А). С. 326-337. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.029>.
2. Фаллата Ахмад, Джонс Саймон, Митчелл Дэвид. Классификация случайных лесов на основе объектов для выявления неформальных поселений на Ближнем Востоке: пример из Джидды // Международный журнал дистанционного зондирования. 2020. № 41(11). С. 4421-4445. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1718237>
3. Ко Б.К., Гим Дж.В., Нам Дж.И. Классификация изображений ячеек на основе признаков ансамбля и случайного леса // Электроника Письма. 2011. №47 (11). С. 638-У72. <http://dx.doi.org/10.1049/el.2011.0831>
4. Сара Н., Алями, Сандей О. Олатунджи. Применение машины опорных векторов для классификации арабских настроений с использованием набора данных на основе Twitter // Журнал управления информацией и знаниями. 2020. № 19 (01)2040018. С. 1-13. <https://doi.org/10.1142/S0219649220400183>
5. Арируджанамби Д., Варун Кумар К.А., Сиби Чаккараварти С. и др. Классификация вредоносного трафика с использованием анализа основных компонентов и искусственной нейронной сети для экстремального наблюдения // Компьютерные коммуникации. 2019. №147. С. 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.08.003>.
6. Хамид Ганбари, Саид Хомаюни, Абдолреза Сафари и др. Модель гауссовой смеси и марковские случайные поля для классификации гиперспектральных изображений // Европейский журнал дистанционного зондирования. 2018. № 51(1). С. 889-900. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1503565>
7. Мирвазири Х., Мобараке З.С. Улучшение классификации изображений движений на основе ЭЭГ с использованием оптимизации роя частиц на основе топологии кольца // Биомедицинская обработка сигналов и контроль. 2017. № (32). С. 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.10.015>
8. Anibou C, Saidi MN, Aboutajdine D. Классификация текстурированных изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования и слияния информации // Журнал систем обработки информации. 2015. № 11(3). С. 421-437. <https://doi.org/10.3745/JIPS.02.0028>
9. Синь Р.Ю., Чжан Дж., Шао Ю.Т. Сложная сетевая классификация со сверточной нейронной сетью // Цинхуа Наука и техника. 2020. № 25(4). С. 447-457. <https://dx.doi.org/10.26599/TST.2019.9010055>
10. Грисшабер Д., Ву Н.Т., Маучер Дж. Классификация текста с низким уровнем ресурсов с использованием обучения с состязательной областью // Компьютерная речь и язык. 2020. № 62. С.101056. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2019.101056>
11. Чжан Чao, Wan Цзяндун, Xuan Цзянь и др. Обнаружение и классификация коротких замыканий в распределительных сетях на основе подхода Fortescue и регрессии softmax // Международный журнал по электроэнергетике и энергетической системе. 2020. С. 118-105812. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105812>

USING A PROBABILISTIC NEURAL NETWORK ALGORITHM TO MEASURE THE LEVEL OF EDUCATION QUALITY

Al-Dulaimi Omar Hatem Zaidan, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, oamar1982@yandex.ru

Abstract

The traditional method of determining the quality of education is too unambiguous and unreasonable, which is not suitable for a comprehensive assessment of students' abilities. The purpose of the article is to justify the use of a probabilistic neural network algorithm. Research methods. The reliability of the presented results is ensured by the analysis of scientific literature, modeling of a probabilistic neural network, comparative analysis of models and evaluation of the effectiveness of the model. Research results. In this paper, a probabilistic neural network (PNN) algorithm is used to determine the quality of education by considering the important influence between different student achievements. The PNN algorithm comes from the Bayesian decision rule and uses the nonlinear Gauss-Parsen window as a probability density function. Since the PNN model has strong nonlinear and anti-interference properties, it is suitable for determining the quality of education by classifying student achievements. In addition, this article also discusses the impact of various evaluation models on the accuracy and effectiveness of classification. In addition, the influence of the spread value on the PNN model is also discussed. Scope of application. Finally, evidence is used to determine the quality of education. Conclusions. Experimental results show that the detection accuracy can reach 95%, and the detection time is only 0.0156 s based on the proposed method. That is, the method is a very practical detection algorithm with high accuracy and efficiency. In addition, it also contains information on how to further improve the quality of teaching. It is proved that the use of the PNN model makes it possible to accurately classify the achievements of students according to the quality criterion.

Keywords: probabilistic neural network; classification; student performance; quality of education.

References

1. Mohamed Ben Hai Rouma, Jovisha Junic, Mohammed Chachan Yunis. Moment invariants for multicomponent forms with applications to leaf classification. *Computers and electronics in agriculture*. 2017, no. 142(A), pp. 326-337. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.029>.
2. Fallata Ahmad, Jones Simon, Mitchell David. Classification of random forests based on objects to identify informal settlements in the Middle East: an example from Jeddah. *International Journal of Remote Sensing*. 2020, no. 41(11), pp. 4421-4445. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1718237>
3. Ko B.K., Gim J.V., Nam J.Y. Classification of cell images based on ensemble features and random forest. *Electronic Letters*. 2011, no. 47(11), pp. 638-U72. <http://dx.doi.org/10.1049/el.2011.0831>
4. Sara N., Alami, Sunday O. Olatunji. Application of a support vector machine to classify Arab sentiments using a Twitter-based dataset. *Journal of Information and Knowledge Management*. 2020, no. 19 (01)2040018, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1142/S0219649220400183>
5. Arivudainambi D., Varun Kumar K.A., Sibi Chakkaravarti S. et al. Classification of malicious traffic using the analysis of the main components and an artificial neural network for extreme surveillance. *Computer communications*. 2019, no. (147), pp. 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.08.003>
6. Hamid Ghanbari, Said Khomayuni, Abdolreza Safari. and others. Gaussian mixture model and Markov random fields for classification of hyperspectral images. *European Journal of Remote Sensing*. 2018, no. 51(1), pp.: 889-900. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1503565>
7. Mirvaziri H., Mobarake Z.S. Improving the classification of motion images based on EEG using particle swarm optimization based on ring topology. *Biomedical signal processing and control*. 2017, no. (32), pp. 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.10.015>
8. Anibou C, Saidi MN, Aboutajdine D. Classification of textured images based on discrete wavelet transformation and information fusion. *Journal of information processing systems*. 2015, no. 11(3), pp. 421-437. <https://doi.org/10.3745/JIPS.02.0028>
9. Xin R.Yu., Zhang J., Shao Y.T. Complex network classification with convolutional neural network. *Tsinghua Science and Technology*. 2020, no. 25(4), pp. 447-457. <https://dx.doi.org/10.26599/TST.2019.9010055>
10. Grisshaber D., Wu N.T., Moucher J. Classification of low-resource text using adversarial domain learning. *Computer speech and language*. 2020, no. 62, p.101056. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2019.101056>
11. Zhang Chao, Wang Jiangdong, Huang Jian, etc. Detection and classification of short circuits in distribution networks based on the Fortescue approach and softmax regression. *International Journal of Electric Power and Energy System*. 2020, pp. 118-105812. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105812>

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЯХ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-34-40

Manuscript received 20 February 2023;
Accepted 16 March 2023

Гураль Дмитрий Александрович,
 Научно-исследовательский институт телевидения,
 г.Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: методика оценивания, средства наблюдения за космическим пространством, космические объекты, информационное обеспечение, сход с орбиты, автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве, космический мусор

В данной статье представлена структура и содержание основных этапов методики оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве при наблюдении за космическими объектами на высоких орbitах оптическими средствами наблюдения за космическим пространством с применением программно-аппаратного комплекса сбора информации. Постановка задачи: разработка методики обнаружения отклонения космических объектов с расчетных орбит их движения наземными средствами наблюдения за космическим пространством учитывая различные варианты построения орбитальных группировок и сети наземных оптических средств наблюдения. **Результаты:** Разработана методика оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве учитывая различные способы организации системы информационного обеспечения и позволяющая динамически оценивать оперативность обнаружения отклонения космических объектов с расчетных орбит. **Практическая значимость:** предложенная методика позволяет выделить оптимальные способы организации информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве на основе оценки оперативности обнаружения отклонения космических объектов с расчетных орбит при динамическом изменении космической обстановки и состояния функционирования средств наблюдения за космическим пространством и сформировать рекомендации по совершенствованию информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве. **Обсуждение:** новизна предложенной постановки задачи состоит в том, что структура разработанной методики позволяет учитывать различные способы организации системы информационного обеспечения и строить вероятностные оценки оперативности ее функционирования на основе динамического изменения космической обстановки и состояния наземных средств наблюдения за космическим пространством.

Информация об авторах:

Гураль Дмитрий Александрович, соискатель ученой степени кандидата наук, Научно-исследовательский институт телевидения, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Гураль Д.А. Методика оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 34-40.

For citation:

Gural D.A. (2023) Methodology for assessing the efficiency of information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth space. T-Comm, vol. 17, no. 3, pp. 34-40. (in Russian)

Введение

В настоящее время остро стоит вопрос безопасности вывода космических аппаратов и поддержание их работоспособности на орbitах их движения в связи с непреклонно увеличивающимся количеством космических объектов (КО) в околоземном космическом пространстве различного типа, в том числе и «космического мусора». Для решения задач, связанных с отслеживанием движения космических объектов и предупреждения опасных ситуаций создаются автоматизированные системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП), которые представляют собой информационно-аналитические центры как правило опираются на информацию, предоставляемую существующими системами наблюдения за космическим пространством различного назначения, открытыми источниками и средствами наблюдения создаваемыми в рамках развертывания таких систем. Так, АСПОС ОКП создаваемая отечественной корпорацией «Роскосмос» использует информацию, предоставляемую следующими источниками:

1. главным информационно-аналитическим центром (ГИАЦ);
2. сегментом мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит;
3. сегментом по расчету параметров солнечной и геомагнитной активности;
4. комплексом специализированных оптико-электронных средств (КСОЭС), размещенных как на территории Российской Федерации, так и за рубежом.
5. Сегментами и специализированными оптико-электронными средствами, работающими по заданиям ГИАЦ АСПОС ОКП.

Сеть из представленных систем и средств наблюдения за космическим пространством можно определить, как систему информационного обеспечения АСПОС ОКП состоящую из большого числа различных средств наблюдения за космическим пространством (СНКП) имеющих различные характеристики и предназначенные для решения различных целевых задач [1]. Организация автоматизированного сбора информации с такой сети гетерогенных СНКП является сложной задачей в следствии чего, не всегда достигается требуемый уровень оперативности обнаружения отклонения космических объектов с расчетных орбит при численном росте таких событий в ОКП. С целью оценивания оперативности обнаружения отклонения космических объектов с расчетных орбит предложена методика оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве

Разработка методики оценивания оперативности информационного обеспечения автоматизированных систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве

Целью методики является оценивание значений выбранного показателя оперативности для различных вариантов

космической обстановки, состояния оптических средств и параметров информационной системы.

Частная постановка задачи для оценки оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП демонстрирует сложность решения задачи выбора оптимального способа сбора информации ввиду большого количества данных и ограничений, а также гетерогенности получаемой информации от привлекаемых СНКП и неопределенности данных о состоянии системы и имеющихся в ней информации.

В статье разрабатываются процедуры, основанные на использовании текущей информации, собранной в процессе выполнения планов сопровождения наблюдаемых КО.

Для повышения оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП разработана методика оценивания оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП (рис. 1), которая состоит из следующих этапов:

На первом этапе определяются исходные данные о параметрах информационно-вычислительных ресурсов, о состоянии космической обстановки и наземных средств наблюдения, о параметрах способа сбора информации о космической обстановке;

На втором этапе определяются условия формирования вариантов космической обстановки по интенсивности сходов КО с расчетных орбит путем создания 30 вариантов различной интенсивности, что позволяет выявить зависимость оперативности применения того или иного способа организации информационного обеспечения от интенсивности изменения космической обстановки.

В первом варианте с расчетной орбите сходит один КО, а в тридцатом – сход осуществляют 30 КО, соответственно: W_j – j-вариант осмической обстановки.

На втором этапе осуществляется формирование совокупности способов организации информационного обеспечения посредством реализации методики определения способов информационного обеспечения АСПОС ОКП.

На третьем этапе проводится имитационное моделирование процесса сбора координатной информации по КО с определением значений показателей оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП при реализации каждого из способов организации информационного обеспечения, относительно сформированной методики, при всех вариантах интенсивности изменения космической обстановки [2,3].

Имитационная модель позволяет имитировать состояние СНКП: изменения технического состояния узлов опираясь на статистику их работы, изменения погодных условий в районе расположения СНКП исходя из истории метеорологических прогнозов в географическом районе, изменения условий оптической видимости для СНКП рассчитывается с помощью моделей вращения небесных тел, и определяет время суток, положение солнца и другие условия необходимые для работы оптических средств наблюдения [8].

Блок-схема имитационной модели представлена на рисунке 2. Так же в модель добавлен расчет времени сближения и расчет времени обработки информации с оптических СНКП с целью определения достаточности оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП для организации предупреждения и разрешения опасной ситуации в ОКП.

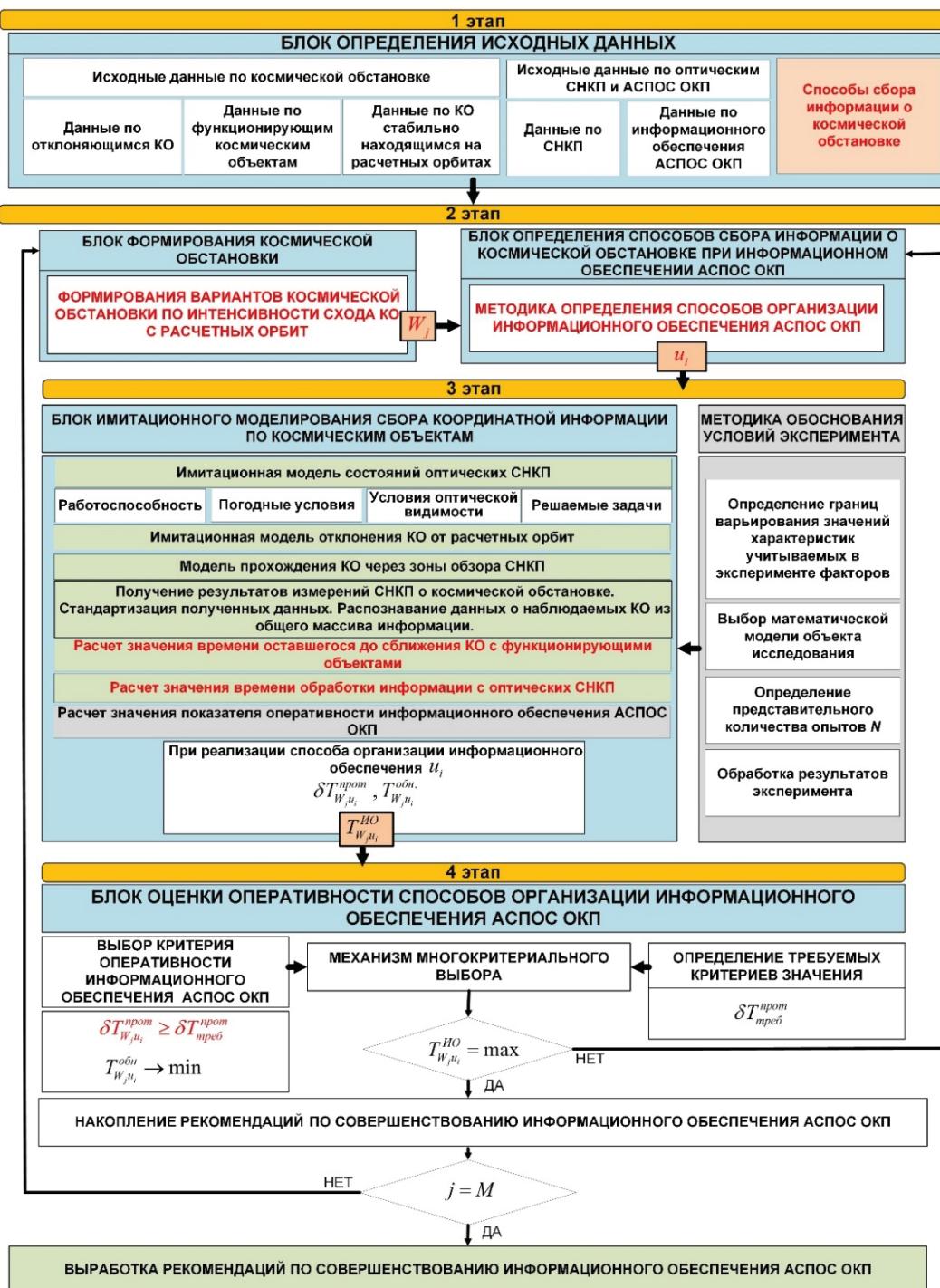


Рис. 1. Структурная схема методики оценивания оперативности информационного обеспечения АСПОС

На четвертом этапе используя выбранный критерий оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП – доля оперативно обнаруженных сходов КО с расчетных орбит $\delta T^{\text{прот}}$, который рассчитывается выражением:

$$\delta T^{\text{прот}} = \frac{\sum_{i=1}^{T_{i=1}^{\text{OM}}} P_{\text{СП}}}{N},$$

Где:

$T_{i=1}^{\text{OM}}$ – время до сближения;

$P_{\text{СП}}$ – вероятность своевременного предупреждения;
 N – количество экспериментов.

Производится выбор рационального способа организации информационного обеспечения u_i , для заданных условий обстановки [5]. При несоответствии требуемому критерию доли оперативно обнаруженных сходов КО с орбит $\delta T_{\text{треб}}^{\text{прот}}$ проводится корректировка способа. В результате анализа отобранных способов осуществляется накопление рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения АСПОС ОКП.

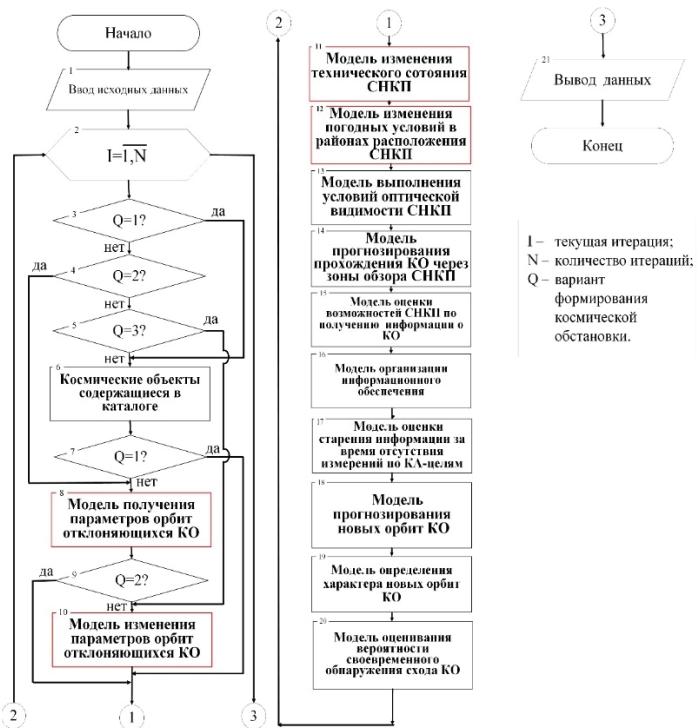


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели сбора информации по отклоняющимся КО

Для решения задачи формирования множества исследуемых способов организации информационного обеспечения используется разработанная методика определения способов информационного обеспечения АСПОС ОКП (рис. 3).



Рис. 3. Методика определения способов информационного обеспечения АСПОС ОКП

В методику определения способов информационного обеспечения АСПОС ОКП включены разработанные методики, представленные в рекомендациях по совершенствованию информационного обеспечения АСПОС ОКП:

1. Методика организации сбора координатной информации о КО – позволяющая на основе постоянно обновляющейся информации о состоянии СНКП составлять план

сопровождения КО используя для наблюдения только средства способные дать наиболее точную и своевременную информацию о КО;

2. Методика определения и классификации движения КО – позволяющая распределить задачу поиска КО между средствами наблюдения ведущими работы в расчетных секторах появления КО и оперативно классифицировать новую орбиту на опасную.

Реализация данного шага осуществляется последовательностью следующих этапов:

на первом этапе осуществляется определение варианта космической обстановки по интенсивности схода КО с расчетных орбит, для которого будут применяться сформированные способы;

на втором этапе определяется состав оптических средств наблюдения, необходимый для оперативного контроля за космической обстановкой;

на третьем этапе определяется множество способов организации информационного обеспечения исходя из ранее установленных классификационных признаков, с последующим формированием множества способов организации информационного обеспечения АСПОС ОКП.

Для каждого сформированного способа организации информационного обеспечения было проведено моделирование исследуемого процесса для различных вариантов космической обстановки. Используя метод доверительных интервалов, было определено потребное количество реализаций моделирования для каждого сформированного способа.

В результате реализации методики были сформированы 8 способов информационного обеспечения АСПОС ОКП. Указанные способы являются входными данными имитационной модели и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Способы организации информационного обеспечения АСПОС ОКП

№ п/п	Содержание способов организации информационного обеспечения СПКП	Признак новизны варианта
1	Сбор информации со всех источников при ее появлении с заданной периодичностью, выявление сходящегося с орбиты КО с применением существующих методик, обработка информации в ядре АСПОС ОКП	Новый
2	Сбор информации со всех источников при ее появлении с заданной периодичностью, выявление сходящегося с орбиты КО с применением разработанной методики, обработка информации в ядре АСПОС ОКП	Новый
3	Сбор информации со всех источников при ее появлении с заданной периодичностью, выявление сходящегося с орбиты КО с применением разработанной методики, обработка частной информации вычислительными средствами СРНП до передачи в ядро АСПОС ОКП	Новый
4	Сбор информации со всех источников при ее появлении с заданной периодичностью, выявление сходящегося с орбиты КО с применением существующих методик, обработка частной информации вычислительными средствами СНКП до передачи в ядро АСПОС ОКП	Новый

5	Sбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО, выявление сходящего с орбиты КО с применением разработанной методики, обработка частной информации вычислительными средствами СНКП до передачи в ядро АСПОС ОКП	Новый
6	Sбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО, выявление сходящего с орбиты КО с применением существующих методик, обработка частной информации вычислительными средствами СНКП до передачи в ядро АСПОС ОКП	Новый
7	Sбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО, выявления сходящего с орбиты КО с применением существующих методик, обработка информации в ядре АСПОС ОКП	Новый
8	Sбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО, выявления сходящего с орбиты КО с применением разработанной методики, обработка информации в ядре АСПОС ОКП	Новый

В результате проведенного моделирования вычислены значения показателей оперативности информационного обеспечения $T^{I/O}(\delta T_{\text{прот}}, T^{\text{обн}})$ при реализации каждого из способов организации информационного обеспечения АСПОС ОКП. Результаты анализа полученных значений показателей составили эмпирическую основу для формирования следующих существенных выводов:

Выявление зависимости оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП от реализуемого способа организации информационного обеспечения АСПОС ОКП и варианта космической обстановки.

Реализация рекомендуемых способов № 1, 2, 3, 4 подразумевающих сбор информации о космической обстановке со всех оптических СНКП с заданной периодичностью. Такой вариант сбора предполагает получение всех измерений о космической обстановке, что приводит к увеличению времени необходимого для обработки информации и выявлению КО сходящих с расчетных орбит. В ходе разработки методики установлено, что при вариантах космической обстановки с низкой интенсивностью сходов КО с расчетных орбит оперативность информационного обеспечения АСПОС ОКП остается на высоком уровне и падает при увеличении количества сходящих с расчетных орбит КО.

В способе 2 используется разработанная методика определения и классификации орбит КО, позволяющая сократить время на обнаружение сходящего с орбиты КО на новой орбите. Оперативность информационного обеспечения при использовании разработанной методики возрастает с повышением интенсивности сходов КО.

В способе 3 предлагается проводить часть обработки информации непосредственно на средствах СНКП, что позволяет повысить оперативность информационного обеспечения при необходимости оперативной обработки большого количества информации.

Такая необходимость возникает при поиске большого КО на новых орbitах после интенсивного схода КО с орбит, но значительно компенсируется использованием разработанной

методики определения и классификации орбит КО. В 4 способе также используется вариант обработки информации непосредственно на средствах СНКП, что снижает потери оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП, возникающие при поиске большого количества КО на новых орбитах с применением существующих методик.

Реализация рекомендуемых способов № 5, 6, 7, 8 подразумевающих основной особенностью сбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО. Такой вариант сбора предполагает получение измерений о космической обстановке в соответствии с приоритетностью КО согласно плана сопровождения, что приводит к упорядоченному поступлению информации в ядро АСПОС ОКП и сокращению времени необходимого для обработки информации и выявлению сходящих с расчетных орбит КО. В ходе разработки методики установлено, что при повышении интенсивности схода КО с расчетных орбит возрастает и оперативность применения таких способов в сравнении с предыдущими.

На основе применения разработанной методики были получены данные характеризующие зависимость оперативности информационного обеспечения АСПОС ОКП от выбранного способа организации информационного обеспечения сложности космической обстановки представленные на рисунке 4.

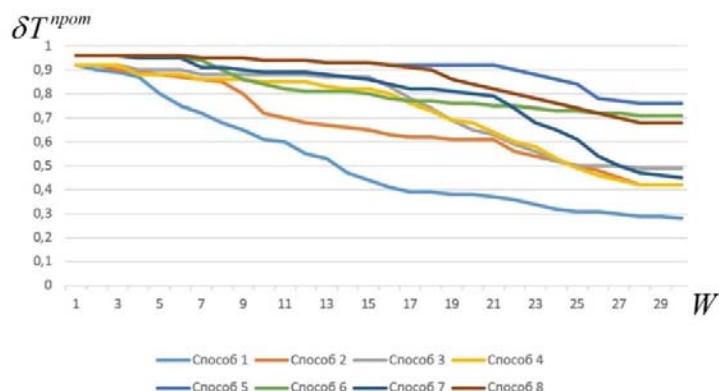


Рис. 4. Оперативность информационного обеспечения АСПОС ОКП

Полученные экспериментальные результаты в ходе разработки методики позволили сформировать эмпирическую базу для выработки рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения ПКСП.

Рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения ПКСП

Предложены рекомендации по классификации наблюдаемых КО с целью определения приоритетности обработки информации вычислительным комплексом, что позволяет снизить нагрузку на ВК и повысить оперативность обнаружения КО:

- 1 класс – космические объекты с нестабильными орбитами и новые КО;
- 2 класс – космические объекты для которых существует возможность перехода на орбиты сближения с функционирующими КО;
- 3 класс – остальные космические объекты.

Предложены рекомендации по повышению оперативности получения информации о космической обстановке (рис. 5) на основе применения матриц состояний СНКП, что позволяет контролировать состояние наземных СНКП. Формирование и поддержание актуальности матриц состояния СНКП позволяет реализовывать способы информационного обеспечения СНКП, заранее составлять план сопровождения приоритетных КО и организовывать сбор информации только со СНКП участвующих в сопровождении, не влияя на выполнение их задач. Рекомендации представляют собой методику по повышению оперативности получения информации о космической обстановке [4, 6, 7].



Рис. 5. Рекомендации по повышению оперативности получения информации о космической обстановке

А также предложены рекомендации по контролю КО при обнаружении схода с расчетной орбиты (рисунок 6) которые позволяют при обнаружении схода оценить его характер, построить план сопровождения в ожидаемых точках на основе матриц состояния СНКП.



Рис. 6. Рекомендации по контролю КО при обнаружении его схода с расчетной орбиты

Комплексное использование разработанных рекомендаций по совершенствованию информационного обеспечения АСПОС ОКП позволяет повысить оперативность информационного обеспечения АСПОС ОКП на 17-22 % (для заданных экспериментальных условий).

Вывод

Представленная методика позволяет оценить оперативность информационного обеспечения АСПОС ОКП рассчитать время входа космических объектов в зоны действия

наземных оптических средств наблюдения за космическим пространством, оценить влияние разных способов организации информационного обеспечения и вариантов изменения космической обстановки, учитывая различные варианты построения орбит движения космических объектов и получать вероятностные значения времени обнаружения схода КО с расчетных орбит в зависимости применяемого способа и учитывая динамическое изменение технического состояния наземных средств наблюдения и условий окружающей среды в районе их расположения. Позволяет сформировать рекомендации по совершенствованию информационного обеспечения АСПОС ОКП.

Положительный эффект практической реализации предложенного научно-методического подхода увеличивается по мере усложнения космической обстановки. Максимальное значение прироста показателя доли успешных обнаружений схода КО с расчетных орбит достигается при условиях реализации способов, предусматривающих сбор информации со всех источников с применением методики организации сбора координатной информации о КО, выявления сходящегося с орбиты КО с применением разработанной методики, при этом обработка информации может проводится в ядре АСПОС ОКП.

Литература

1. Новиков П.В., Олейников И.И. обоснование требований к системам предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве исходя из критерия минимума среднего риска // космонавтика и ракетостроение. 2012. №4. С. 199-206.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Обеспечение эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами на основе процедур оперативного управления ресурсами информационных служб // Информация и космос. 2017. №3. С. 64-72.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей. Математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 480 с.
4. Гураль Д.А. Методика оперативного обнаружения космических объектов на высоких орbitах // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2022. Т. 12. №1. С. 12-17
5. Гураль Д.А., Леференко В.Д., Легков К.Е. Методика оценивания оперативности принятия решения на применение средств зондирования околоземного космического пространства // I-Methods. 2021. Т.13. №4. С.48-57
6. Orkin V.V., Legkov K.E. Algorithm of selecting procedures of distributed program control by applications flows in the information system in conditions of perturbations // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018. С. 8456942.
7. Емельянов А.В., Левко И.В., Легков К.Е. Методика оперативного решения информационно-расчетных задач программно-техническим комплексом на основе рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 129-134.
8. Легков К.Е., Емельянов А.В. Имитационная модель процесса функционирования программно-технического комплекса при решении разнородных информационно-расчетных задач // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 135-141.
9. Лиференко В.Д., Гураль Д.А., Легков К.Е. Моделирование функционирования информационно-управляющей сети распределенными гетерогенными информационно-вычислительными ресурсами в интересах системы поддержки и принятия решения специального назначения // I-methods. 2022. Т. 14. № 4. С. 1-16.

10. Гураль Д.А., Легков К.Е. Программный комплекс моделирования процессов получения информации от средств сопровождения космических объектов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021680088, 07.12.2021. Заявка № 2021669737 от 29.11.2021.
11. Гураль Д.А., Легков К.Е. Программный комплекс моделирования информационных подсистем автоматизированных систем управления объектами специального назначения. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021680877, 15.12.2021. Заявка № 2021669953 от 22.11.2021.
12. Легков К.Е. Способ многоуровневого управления потоками в инфокоммуникационных системах в условиях деструктивных изменений на основе вероятностно-игрового метода. Патент на изобретение RU 2699062 C1, 03.09.2019. Заявка № 2018137089 от 22.10.2018.
13. Легков К.Е. Способ интеллектуального зондового управления инфокоммуникационными сетями в условиях значительных деструктивных изменений. Патент на изобретение RU 2700545 C1, 17.09.2019. Заявка № 2018137088 от 22.10.2018.
14. Легков К.Е. Способ управления ресурсами инфокоммуникационной системы. Патент на изобретение RU 2702502 C1, 08.10.2019. Заявка № 2018137087 от 22.10.2018.
15. Легков К.Е. Способ управления структурой инфокоммуникационной системы. Патент на изобретение RU 2642380 C2, 24.01.2018. Заявка № 2016121535 от 31.05.2016.
16. Легков К.Е. Способ управления качеством предоставляемых инфокоммуникационной системой услуг. Патент на изобретение RU 2665232 C2, 28.08.2018. Заявка № 2016115004 от 18.04.2016.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF INFORMATION SUPPORT FOR AUTOMATED WARNING SYSTEMS ABOUT DANGEROUS SITUATIONS IN NEAR-EARTH SPACE

Dmitry A. Gural, Scientific Research Institute of Television, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Introduction: this article presents the structure and content of the main stages of the methodology for assessing the efficiency of information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth outer space when observing space objects in high orbits by optical means of observing outer space with the use of a software and hardware information collection complex. **Problem statement:** development of a technique for detecting deviations of space objects from the calculated orbits of their movement by ground-based means of observing outer space, taking into account various options for constructing orbital groupings and a network of ground-based optical means of observation. **Results:** A methodology has been developed for assessing the efficiency of information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth outer space, taking into account various ways of organizing an information support system and allowing dynamically evaluating the efficiency of detecting deviations of space objects from calculated orbits. **Practical significance:** the proposed methodology makes it possible to identify optimal ways of organizing information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth outer space based on an assessment of the efficiency of detecting deviations of space objects from calculated orbits with dynamic changes in the space environment and the state of operation of space surveillance facilities and to form recommendations for improving information support for automated warning systems about dangerous situations in near-Earth outer space. **Discussion:** the novelty of the proposed formulation of the problem lies in the fact that the structure of the developed methodology allows us to take into account various ways of organizing the information support system and to build probabilistic estimates of the efficiency of its functioning on the basis of dynamic changes in the space situation and the state of ground-based means of observing outer space.

Keywords: assessment methodology, means of observing outer space, space objects, information support, de-orbiting, automated warning system for dangerous situations in near-Earth outer space, space debris.

References

1. Novikov P.V., Oleynikov I.I. substantiation of requirements for warning systems about dangerous situations in near-Earth outer space based on the criterion of the minimum average risk. *Cosmonautics and rocket science*. 2012. No. 4. Pp. 199-206.
2. Burenin A.N., Legkov K.E. Ensuring the effective functioning of information subsystems of automated control systems for complex organizational and technical objects based on procedures for operational management of information services resources. *Information and Space*. 2017. No. 3. Pp. 64-72.
3. Gmurman V.E. Probability theory. Mathematical statistics. Moscow: "Higher school", 2004. 480 p.
4. Gural D.A. Methodology of operational detection of space objects in high orbits. *DSPA: Issues of application of digital signal processing*. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 12-17.
5. Gural D.A., Leferenko V.D., Legkov K.E. Methodology for assessing the efficiency of decision-making on the use of near-Earth space sensing tools. *I-Methods*. 2021. Vol. 13. No. 4. Pp. 48-57.
6. Orkin V.V., Legkov K.E. Algorithm of selecting procedures of distributed program control by applications flows in the information system in conditions of perturbations. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018*. 2018. P. 8456942.
7. Emelyanov A.V., Levko I.V., Legkov K.E. Methods of operational solution of information and computational tasks by a software and hardware complex based on rational distribution of information and computing resources. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2018. No. 4. Pp. 129-134.
8. Legkov K.E., Emelyanov A.V. Simulation model of the process of functioning of a software and hardware complex in solving heterogeneous information and computational problems. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2018. No. 4. Pp. 135-141.
9. Liferenko V.D., Gural D.A., Legkov K.E. Modeling the functioning of an information management network by distributed heterogeneous information and computing resources in the interests of a special purpose support and decision-making system. *I-methods*. 2022. Vol. 14. No. 4. pp. 1-16.
10. Gural D.A., Legkov K.E. A software package for modeling the processes of obtaining information from the means of tracking space objects. Certificate of registration of the computer program 2021680088, 07.12.2021. Application No. 2021669737 dated 11/29/2021.
11. Gural D.A., Legkov K.E. Software package for modeling information subsystems of automated control systems for special purpose objects. Certificate of registration of the computer program 2021680877, 12/15/2021. Application No. 2021669953 dated 11/22/2021.
12. Legkov K.E. Method of multilevel flow control in infocommunication systems in conditions of destructive changes based on the probabilistic-game method. Patent for the invention RU 2699062 C1, 03.09.2019. Application No. 2018137089 dated 22.10.2018.
13. Legkov K.E. Method of intelligent probe control of infocommunication networks in conditions of significant destructive changes. Patent for the invention RU 2700545 C1, 17.09.2019. Application No. 2018137088 dated 10/22/2018.
14. Legkov K.E. A method for managing infocommunication system resources. Patent for the invention RU 2702502 C1, 08.10.2019. Application No. 2018137087 dated 10/22/2018.
15. Legkov K.E. Method of managing the structure of an infocommunication system. Patent for the invention RU 2642380 C2, 24.01.2018. Application no. 2016121535 dated 31.05.2016.
16. Legkov K.E. Method of quality management of the services provided by the infocommunication system. Patent for the invention RU 2665232 C2, 28.08.2018. Application no. 2016115004 dated 04/18/2016.

Information about author: Dmitry A. Gural, candidate of the academic degree of candidate of Sciences, St. Petersburg, Russia

SSB SIGNALS WITH CONTROLLED PILOT LEVEL

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47

Sergey S. Dvornikov,

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation";

Radio Communication of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia,

dvornik92@mail.com**Manuscript received** 12 February 2023;**Accepted** 20 March 2023**Kirill D. Zheglov,**

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation",

St. Petersburg, Russia, zheglov.k@gmail.com**Sergey V. Dvornikov,**

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation";

Radio Communication of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia,

practiccsv@yandex.ru

Keywords: single-sideband modulation, adjustable pilot signal level, single-sideband modulation signal synthesis, noise immunity of receiving single-sideband modulation signals

An approach to the formation of single-sideband modulation signals based on quadrature synthesis is considered. The relevance of the use of single-sideband modulation signals for decameter radio communication systems is demonstrated. The analytical generality of the signals of amplitude and single-sideband modulation is shown in the transition to the analytical form of their representation. An analysis of the known methods for generating signals of single-sideband modulation with a suppressed carrier has been carried out. Their advantages and disadvantages are shown. The structural commonality of amplitude modulation signals and single-sideband modulation signals with a preserved carrier wave is demonstrated. The introduction of an additional parameter is justified, which makes it possible to adjust the level of the stored pilot signal in single-sideband modulation signals. The developed analytical model of the single-sideband modulation signal is presented, in which, unlike the known models, the pilot signal level can be adjusted at the stage of its formation. The results obtained open up new possibilities for redistributing the output power between the pilot signal and sideband information components depending on the level of interference in the channel. It is shown that the developed approach based on quadrature synthesis makes it possible to form single-sideband modulation signals with a stored pilot signal without additional filtering procedures. The gain in noise immunity of reception during the transition from amplitude modulation to single-sideband is demonstrated. A block diagram of the formation of single-sideband modulation signals with a given pilot signal level has been developed. The results of analytical modeling are demonstrated.

Information about authors:

Sergey S. Dvornikov, Associate Professor of the Department of Design and Technologies of Electronic and Laser Means (Department 23) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Researcher of the Research Department, Military Academy of Communications, candidate of technical sciences, St. Petersburg, Russia

Kirill D. Zheglov, postgraduate student of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes (Department 21) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", St. Petersburg, Russia

Sergey V. Dvornikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes (Department 21) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Professor of the Department of Radio Communication of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia

Для цитирования:

Дворников С.С., Жеглов К.Д., Дворников С.В. Однополосно модулированный сигнал с контролированным уровнем остатка несущей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 41-47.

For citation:

Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V. (2023) SSB signals with controlled pilot level. T-Comm, vol. 17, no.3, pp. 41-47. (in Russian)

Introduction

Single-sideband modulation (SSB), in the English version single-sideband modulation (SSB), was developed thanks to the work of J.R. Carson, who received a patent for a signal transmission method with efficient use of the channel spectrum [1]. In the general case, the use of SSB signals allows minimizing the frequency band while maintaining the information transfer rate with respect to amplitude modulation (AM) signals [2, 3]. The theoretical foundations for the synthesis and processing of SSB signals are well developed, which made it possible to obtain their wide practical application [4, 5].

Currently, OM signals are mainly used on shortwave communication lines [6, 7], as well as in frequency division multiplexing (FDM) technology [8, 9], in optical and wired communication systems for voice traffic transmission [10, 11]. Since the mid-1950s, single-sideband modulation has been used as the main standard for communication with aircraft in the air.

At the same time, the analysis of publication activity related to the study of SSB technology showed that SSB signals still arouse a certain interest among a wide range of specialists in the field of telecommunications and radio engineering, which indicates the relevance of this direction [12-15].

Given this fact, this article presents the results of the development of a modulator that allows you to adjust the level of the carrier wave. This technology is called single-sideband suppressed-carrier modulation (SSB-SC).

Theoretical foundations of the synthesis of SSB signals

In analog systems, SSB signals were formed by filtering the AM signal spectrum, which resulted in complete suppression of the upper or lower sideband [16]. However, this approach is quite difficult to physically implement, since it requires a filter with a rather narrow transition band and a very low level of side lobes [17, 18].

Currently, the synthesis of SSB signals is carried out in accordance with the concept of transition to the analytical form of representation of the processed signal [19, 20]. It should be noted that the procedures for generating SSB signals are based on the technology of quadrature synthesis of amplitude modulation signals [3, 4].

$$s_{\text{AM}}(t) = [1 + m_{\text{AM}} s(t)] \cos(\omega_0 t) + [1 + m_{\text{AM}} s(t)] \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

where m_{AM} – amplitude modulation index; $s(t)$ – modulating signal; $\omega_0 = 2\pi f_0$; f_0 – carrier frequency.

In the interests of substantiating this thesis, let us consider the synthesis of an SSB signal modulated by a low-frequency harmonic.

In the general case, they can be considered as a special case in which, instead of addition, the quadrature components are subtracted

$$s_{\text{SSB}}(t) = s(t) \cos(\omega_0 t) - s^*(t) \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

where $s(t)$ – modulating signal; * – Hilbert complex conjugation sign; $\omega_0 = 2\pi f_0$; f_0 – carrier frequency.

The use of the complex conjugation procedure in expression (1) provides a transition to the analytical form of the signal

representation $s_a(t)$, according to which in the resulting spectrum $S_a(f)$ only positive components are observed

$$S_a(f) = \begin{cases} 2S(f), & f > 0; \\ S(f), & f = 0; \\ 0, & f < 0, \end{cases} \quad (3)$$

where $S_a(f)$ and $S(f)$ – respectively, the spectral representations of the signals $s_a(t)$ and $s(t)$, obtained as a result of the Fourier transform.

Considering that the spectrum of the analytical signal contains only positive components, then, accordingly, the Fourier transform of the shift function $S_a(f - f_0)$ will contain only one of the frequency bands (components in the harmonic oscillation) of the spectrum $S(f)$ [21, 22].

$$s_{\text{SSB}}(t) + js_{\text{SSB}}^*(t) = \Phi^{-1}\{S_a(f - f_0)\} = s_a(t) \exp(j2\pi f_0 t). \quad (4)$$

In the formula (4) Φ^{-1} – inverse Fourier transform procedure; j – imaginary unit sign [23].

For a detailed disclosure of the essence of the considered procedures, in fig. 1 shows a temporal representation of AM signals (AM signal received at $m_{\text{AM}} = 1$) and SSB signal modulated by low-frequency harmonics.

The legitimacy of the procedures defined by formula (4) is confirmed by the following transformations.

$$\begin{aligned} s_{\text{SSB}}(t) &= \operatorname{Re}\{s_a(t) \exp(j2\pi f_0 t)\} = \\ &= \operatorname{Re}\{[s(t) + js^*(t)][\cos(2\pi f_0 t) + j\sin(2\pi f_0 t)]\} = \\ &= s(t) \cos(2\pi f_0 t) - s^*(t) \sin(2\pi f_0 t). \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 1. Time representation of AM $s_{\text{AM}}(t)$ and SSB $s_{\text{SSB}}(t)$ signals

And in figure 2 – modules of their spectral representations $|S_{\text{AM}}(f)|$ and $|S_{\text{SSB}}(f)|$.

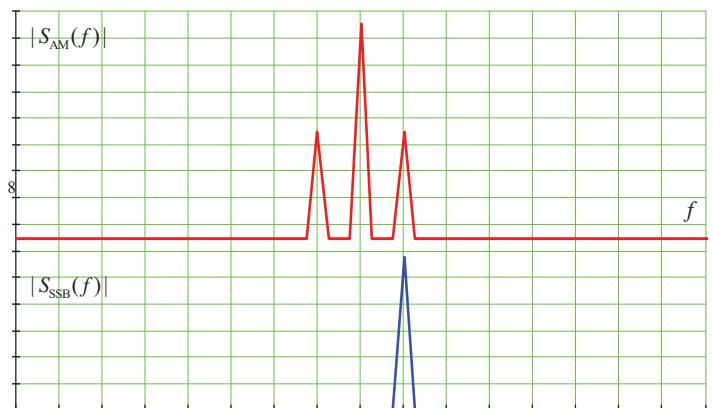


Fig. 2. Spectral representation of AM $s_{\text{AM}}(t)$ and SSB $s_{\text{SSB}}(t)$ signals

It should be noted that, with the initial energy being equal, the AM and SSB signals, as well as their spectral representations, have a rather different structure. Thus, the limits of change in the amplitude of the AM signal are almost three times higher than those for the SSB signal. At the same time, the energy of the

spectral component of the SSB signal is twice the energy of one of the side bands of the AM signal.

For a more detailed understanding of the features of the spectral representation of the SSB signal, consider its synthesis when using as a modulating signal $s(t)$ a low-frequency harmonic oscillation with a zero value of the initial phase $s(t) = A \cos(\Omega t)$, where A is the oscillation amplitude. Then, substituting this value into formula (2), and assuming that the amplitude of the carrier oscillation is equal to U_0 , and $s^*(t) = A \sin(\Omega t)$, we obtain, taking into account the well-known trigonometric transformation $\cos(\alpha+\beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$

$$\begin{aligned} s_{\text{SSB}}(t) &= s(t) \cos(\omega_0 t) - s^*(t) \sin(\omega_0 t) = \\ &= A \cos(\Omega t) U_0 \cos(\omega_0 t) - A \sin(\Omega t) U_0 \sin(\omega_0 t) = \\ &= AU_0 \cos([\omega_0 + \Omega]t). \end{aligned} \quad (6)$$

According to expression (6), the resulting SSB signal contains only one cosine component with a frequency equal to the sum of the frequencies of the modulating and modulated oscillations, and an amplitude equal to the product of the amplitudes of the modulating and modulated oscillations, which is confirmed by the result shown in figure 2.

It should be noted that the presented results are aimed at synthesizing the OM signal with the upper sideband.

Synthesis of an OM signal with a lower sideband is possible upon transition to a modulating oscillation of the form $s(t) = A \sin(\Omega t)$ and correspondingly, $s^*(t) = A \cos(\Omega t)$. Then, using the trigonometric transformation of the form $\cos(\alpha - \beta + \pi/2) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$.

Suppressed carrier signals

At the same time, despite the obvious simplicity of implementing the considered approach, OM signals have not been widely used due to the fact that the reception of such signals is associated with certain difficulties. So, in order to ensure the transmission of messages without distortion, the receiver must be accurately tuned to the frequency of the transmitter. However, due to the instability of reference oscillators and channel distortions, this is actually an unsolvable problem [24, 25]. As a result, OM-based transmissions can sound very unnatural with poor intelligibility.

To reduce the negative consequences of this effect, in practice, OM signals with a partially retained (suppressed) carrier (SSB-SC) are used [26]. The presence of a carrier oscillation provides at the reception the possibility of frequency adjustment of the reference oscillator of the receiver. At its core, SSB-SC transmissions are similar to AM transmissions, but use a frequency band that is twice as narrow. Therefore, the mode of operation with a full or partially suppressed carrier is called the amplitude modulation equivalent (AME) mode [27].

Technologically, the AME mode is not efficient, although its use just makes it possible to maintain the required quality and high speech intelligibility, since its implementation leads to harmonic distortions that can reach a value of the order of 25% [16], and the resulting intermodulation distortions are much higher than in traditional modes with AM.

In theory and practice, two transmission methods are widely used.

The first method is based on the joint use of amplitude and phase modulation, called compatible single sideband (CSSB) [27]. This approach provides for the presence of a phase converter with a highly stable phase response at all passband frequencies. The disadvantage of such a system is the high level of second-order intermodulation components, which, with a modulation index $m_{\text{AM}} < 100\%$, the fight against which leads to asymmetry of the sideband structure. As a result of the resulting asymmetry, the signal is shifted and its spectrum occupies only about half of the usual frequency band. This leads to the fact that during speech transmission, the high-frequency components of the spectrum in the 3 kHz band are suppressed by almost 20 dB in relation to the low-frequency ones.

Another feature of this method is that a logarithmic function is used for phase modulation, the nature of which depends significantly on the carrier level. Therefore, with a very small modulation index, the CSSB signal becomes close in structure to the SSB signals, which leads to loss of synchronization at the reception.

The second method was developed by Leonard R. Kahn [26], who suggested using pre-distortion procedures in order to reduce the level of second-order intermodulation components. To do this, he proposed a modulator based on arcsin functions. But such an implementation is quite technically complicated, since in order to generate an accurate arcsin waveform, it is necessary to use multiple feedback loops in both the modulator when the signal is generated, and in the demodulator when it is received. Despite this, this technology has been developed as the STR-84 method [27].

At the same time, the analysis of expression (1) suggests that the change of sign, similarly in expression (2), will lead to the synthesis of the signal

$$s_{\text{SSBC}}(t) = [1 + m_{\text{AM}} s(t)] \cos(\omega_0 t) + [1 + m_{\text{AM}} s^*(t)] \sin(\omega_0 t). \quad (7)$$

On figure 3 shows diagrams of the AM signal and the SSBC signal synthesized in accordance with formula (7), which we define as a single-sideband modulation signal with a carrier (CSSB).

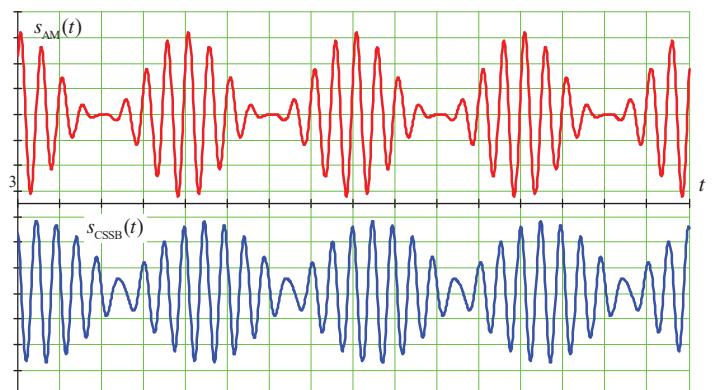


Fig. 3. Time representation of AM $s_{\text{AM}}(t)$ and SSBC $s_{\text{SSBC}}(t)$ signals

Analysis of the results presented in fig. 3 shows that externally the AM and CSSB signals have a similar structure. But if the AM signal has a phase inversion when the modulating signal changes, then the CSSB signals do not have a phase break. On figure 4 – modules of their spectral representations $S_{\text{AM}}(f)$ и $S_{\text{SSBC}}(f)$.

The signal $s_{\text{SSBC}}(t)$, judging by the results of Fig. 5 has a pronounced unsuppressed carrier, which in its structure fully corresponds to the carrier of the AM signal.

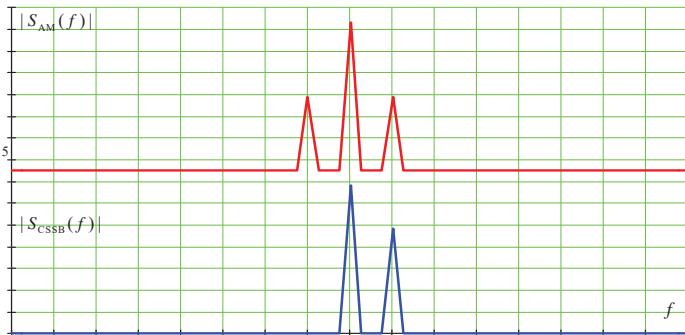


Fig. 4. Spectral representation of AM $s_{AM}(t)$ and SSBC $s_{CSSB}(t)$ signals

Obviously, the presence of a powerful carrier significantly reduces the noise immunity of reception. Therefore, it is necessary to search for the possibility of controlling its energy parameters. The conducted studies have shown that the desired effect can be achieved by introducing an additional m_{SSB} parameter. As a result of its introduction, expression (7) is transformed to the form

$$s_{SSB}(t) = [m_{SSB} + m_{AM}s(t)]\cos(\omega_0 t) + [m_{SSB} + m_{AM}s^*(t)]\sin(\omega_0 t). \quad (8)$$

The control of the m_{SSB} parameter allows, while maintaining the energy allocated to the sideband, to control the level of the carrier wave. Given that

$$m_{SSB} \in [0; 1] \quad (9)$$

The signal synthesized by formula (8) is defined as a single-sideband signal with an adjustable pilot signal level (SSBC). Carrier level control is provided from zero, at $m_{SSB} = 0$, to its maximum value, at $m_{SSB} = 1$. As an example, in fig. 5 and 6 show the temporal and spectral representations of the $s_{SSB}(t)$ signal at $m_{SSB} = 0.5$ against the background of $s_{CSSB}(t)$ signal at $m_{SSB} = 1$.

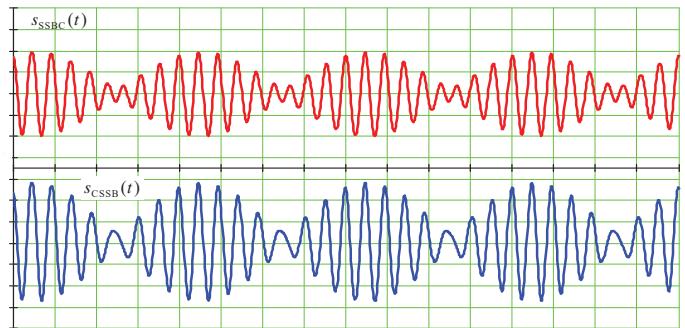


Fig. 5. Time representation of SSBC $s_{SSB}(t)$ and CSSB $s_{CSSB}(t)$ signals

An analysis of the time representation diagrams shows that a decrease in the m_{SSB} value does not lead to a redistribution of the total signal energy between the side component and the carrier wave. Due to quadrature synthesis, the energy of the in-phase and quadrature components is mutually compensated. And when $m_{SSB} = 0$, the signal $s_{SSB}(t)$ will degenerate into the signal $s_{CSSB}(t)$. On fig. 6 shows the spectra of the $s_{SSB}(t)$ signals at $m_{SSB} = 1$ and $m_{SSB} = 0.5$, where a decrease in the energy of the carrier vibration is demonstrated while the side component is retained.

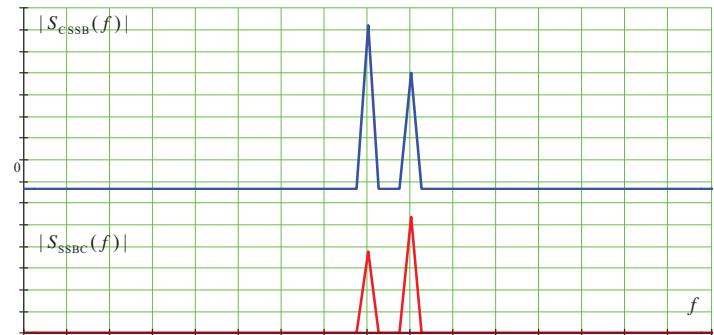


Fig. 6. Spectral representation of SSB $s_{CSSB}(t)$ and SSBC $s_{SSB}(t)$ signals

SSBC and SSB signals modulator

From the standpoint of the methodology of quadrature synthesis, the modulator of SSB signals generated in accordance with formula (2) can be represented as a block diagram in Figure 7.

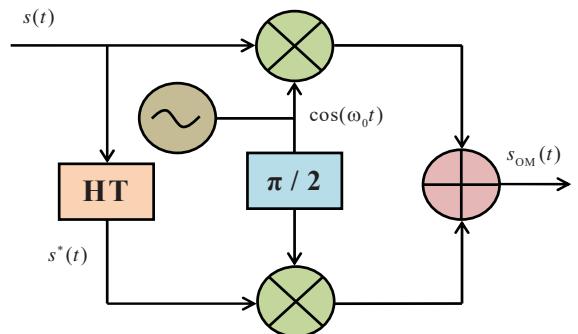


Fig. 7. Block diagram of the SSB signal modulator $s_{SSB}(t)$

In accordance with the presented structure, the basis of the modulator is the Hilbert Transformer (HT), which provides the formation of the complex conjugate form $s^*(t)$ of the modulating signal $s(t)$. The quality of the SSB signal depends on the conversion to HT. The OM modulator itself is built according to the classical technology of quadrature synthesis [28, 29].

Given that the structure of the SSB modulator is determined by an analytical expression, it is proposed, taking formula (8) as a basis, to represent the SSBC modulator in the following form, see Figure 8.

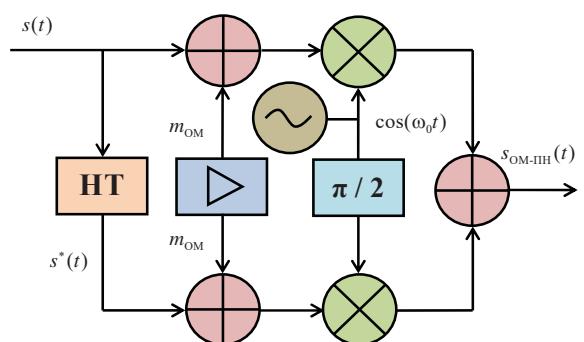


Fig. 8. Block diagram of the SSBC signal modulator $s_{SSB}(t)$

A distinctive feature of the structure of the SSBC modulator is the use of additional adders in the signal paths $s(t)$ and $s^*(t)$ to the second inputs of which the voltage of the DC voltage amplifier is applied, which ensures the formation of a level corresponding to a given value m_{SSB} . Shown in Fig. 8, the modulator generates SSBC signals at a value of $m_{AM} = 1$.

Noise immunity of SSBC signals reception

To assess the noise immunity of SSB signals, as a rule, a generalized gain indicator B is used, which characterizes the ratio of signal power to interference power at the output and input of the demodulator. Such an approach, in particular, was used in [16, 30] when evaluating analog signals.

Thus, for AM signal receivers, the generalized gain is defined as

$$B_{AM} = \frac{U_0^2 \Delta F_{in} v^2}{v_0^2 \Delta F_{out} (1 + \Pi^2)} \approx \frac{1}{(1 + \Pi^2)}, \quad (10)$$

where v^2 and v_0^2 are the interference power at the output and input of the receiver; P is the crest factor of the signal; ΔF_{in} and ΔF_{out} are the bandwidth at the input and output of the receiver; U_0 is the carrier frequency voltage amplitude.

Accordingly, for receivers of SSB signals, the generalized gain will be equal to

$$B_{SSB} = \frac{\Delta F_{out} v^2}{v_0^2 \Delta F_{in}}. \quad (11)$$

Since the ratio of the bandwidths at the input and output of the receiver is preserved for the SSB signal, then with the Gaussian nature of the noise, when the identity $v^2 = v_0^2$ is satisfied, the generalized gain will be equal to 1.

At the same time, taking into account the fact that the peak factor of speech is approximately equal to $\Pi \approx 3.3 \dots 3.9$ [30], we get that $B_{SSB} \approx 0.084 \dots 0.062$. That is, the noise immunity of SSB signal reception is 12 to 16 times higher in relation to the noise immunity of AM signal reception.

Conclusion

The study showed that the further development of technologies for generating SSB signals based on quadrature synthesis opens up new opportunities for their application in software and hardware systems and radio communication complexes.

According to the authors, the capabilities of the proposed SSBC modulator will be revealed to the greatest extent when it is used in decameter radio communication lines, which are characterized by fading.

The authors associate further research with the evaluation of the noise immunity of receiving SSBC signals.

References

- What is SSB: Single Sideband Modulation" Electronics Notes. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/single-sideband-ssb-basics.php>.
- Sidebands - n overview (pdf) | Science Direct Topics. (n.d.). Retrieved January 27, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/sidebands/pdf>.
- A-Imam Al-Sammak, Ahmed J Jameel, Ayman Alaiwi Bahrain Polytechnic. Graphical Analysis of Single Sideband Modulation.
- Ye Zhou, Jun Ming, Leilei Wang, Dongyan Wu, Li Zhao and Jiangnan Xiao. Optical Polarization Division Multiplexing Transmission System Based on Simplified Twin-SSB Modulation. *Sensors* 2022, 22(20), 7700; <https://doi.org/10.3390/s22207700>.
- A. Kulkarni, S. Kothavade and D. Patel, "Assessment of SSB, Modified-SSB and VSB Modulation Techniques based on Modulation Index, Extinction Ratio, Chromatic Dispersion and Received RF power," *2021 International Conference on Communication information and Computing Technology (ICCICT)*, Mumbai, India, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCICT50803.2021.9509947.7.
- Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Avanesov M.Yu. Model of destructive influence of cognitive character. *Information and space*. 2018. No. 2, pp. 22-29.
- Rakhlin V.P., Sak P.V. Improving the energy performance of a HF transmitter with single-sideband modulation of speech information when using automatic mode control. *Radio communication technology*. 2021. No. 4 (51), pp. 37-43.
- Dvornikov S.V. Demodulation of signals based on the processing of their modified time-frequency distributions. *Digital Signal Processing*. 2009. No. 2, pp. 7-11.
- Rosepreet Kaur Bhogal1 and Manoj Sindhwani. Generation of Single Sideband-Suppressed carrier (SSB-SC) Signal Based on Stimulated Brillouin Scattering. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2327, 4th International Conference on Intelligent Circuits and Systems. 2327 (2022) 012025 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2327/1/012025.
- Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Burykin D.A. Structural and functional model of a signal constellation with increased noise immunity. *Information and space*. 2015. No. 2, pp. 4-7.
- Hualong Ye., Leihong Zh., Kaimin W., Dawei Zh. Study on the key technology of ghost imaging based on orthogonal frequency division multiplexing. *Opticheskii Zhurnal*. 2021. V. 88. No. 8, pp. 20-31.
- K. Kassan, Haïfa Farès, D. Christian Glattli, Yves Louët. performance vs. spectral properties for single-sideband continuous phase modulation. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7), pp. 4402-4416. ff10.1109/TCOMM.2021.3073792ff. ffhal-03268769f
- Alekseev A.A., Zheleznyak V.K., Komarovich V.F., Dvornikov S.V. Automated system for monitoring the intensity of physical fields of signal scattering. *Nauchnoe priborostroenie*. 2000. Vol. 10. No. 3, pp. 77-87.
- Sinicina E.A., Davydov V.V., Galichina A.A., Lukianov A.S., Shishkov A.N., Podstrigaev A.S. A study of temperature dependence of phase shift in optoelectronic path of direction finder channels. In the collection: *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. p. 012075.
- Podstrigaev A.S., Nguyen Ch.N., Smolyakov A.V., Loginov I.V. Comparative analysis of signal processing methods in the intermediate frequency band of radio monitoring facilities. *Marine radioelectronics*. 2022. No. 2 (80), pp. 26-29.
- Dongxu LU, Xian ZHOU, Fei LIU, Jiahao HUO, Jinhui YUAN, Keping LONG. High spectral efficiency SSB-PAM-DD scheme with high linewidth tolerance. *Journal on Communications*, 2022, no. 43(5), pp. 36-44.
- Podstrigaev A.S. Broadband matrix-parallel receiver of electronic intelligence with reduced ambiguity in determining the frequency of radar signals: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.12.14 / St. Petersburg. state electrotechnical un-t. SPb., 2016. 168 p.
- Dvornikov S.V., Borodin E.Yu., Madzhar Kh., Makhluf Yu.Kh. Time-Frequency Estimation of Signal Parameters Based on the Envelope Functions of Their Energy Distribution Density. *Information and Space*. 2007. No. 4, pp. 41-45.
- Podstrigaev A.S., Likhachev V.P. Ambiguity in determining the frequency in the matrix receiver // *Journal of radio electronics: electronic journal*. 2015. No. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text>.
- Dvornikov S. V. Theoretical foundations for the synthesis of bilinear distributions. St. Petersburg: Publishing house of Politehn. un-ta, 2007. 268 p.

21. Makarenko S.I., Mikhailov R.L., Novikov E.A. Research of channel and network parameters of a communication channel in a dynamically changing signal-noise environment. *Journal of radio electronics*. 2014. No. 10. P. 2.
22. Alekseev A.A., Zheleznyak V.K., Komarovich V.F., Dvornikov S.V. Automated system for monitoring the intensity of physical fields of signal scattering. *Nauchnoe priborostroenie*. 2000. Vol. 10. No. 3. pp. 77-87.
23. Zavalov S.V., Smirnova E.N. Algorithm for generating and receiving SEFDM signals based on FFT / IFFT blocks for the SDR platform. DSPA: Issues of digital signal processing. 2018. Vol. 8. No. 2, pp. 5-10.
24. Driga I.A., Vasiliev R.M. Investigation of the influence of frequency instability of reference generators on the operation of tracking systems of GLONASS/GPS navigation equipment. *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 2, pp. 2 23.
25. Polikarovskikh A.I. Modern reference generators for frequency and signal synthesis systems. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2014. Vol. 10. No. 4, pp. 100-108.
- 26 Leonard R Kahn (July 1952). "Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration". *Proceedings of the IRE*, no. 40(7), pp. 803-806. doi:10.1109/JRPROC.1952.273844. S2CID 51669401.
27. The History of Single Sideband Modulation Archived 2004-01-03 at the Wayback Machine, Ing. Peter Weber.
28. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S., Burykin D.A., Kuznetsov D.A. Theoretical provisions for increasing the noise immunity of signal-code structures of quadrature signals. *Information and space*. 2015. No. 3, pp. 13-16.
29. Pan, X.; Zhang, B.; Liu, X. Mitigation of crosstalk between RSB and LSB signals generated by one I/Q modulator. *Opt. Express* 2020, no. 28, pp. 2238-2250.
30. X. Gao, Y. Cai, B. Xu, F. K. Deynu, K. Qiu, "Zero guard band multi-TWIN-SSB system in single fiber bidirectional PON transmission," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26814-26826, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971538>.
31. Dvornikov A.S., Gudkov M.A., Ayukov B.A., Fedosov A.Yu., Podgorny A.V., Zasedatelev A.N., Dvornikov S.V., Kryachko A.F., Pshenichnikov A.V. Analysis of the noise immunity of transmissions with single-sideband modulation in channels with fluctuation noise. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*. 2022. No. 4, pp. 58-64.

ОДНОПОЛОСНО МОДУЛИРОВАННЫЙ СИГНАЛ С КОНТРОЛИРОВАННЫМ УРОВНЕМ ОСТАТКА НЕСУЩЕЙ

Дворников Сергей Сергеевич, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, dvornik92@mail.com

Жеглов Кирилл Дмитриевич, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия, zheglov.k@gmail.com

Дворников Сергей Викторович, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, practicdsv@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрен подход к формированию сигналов однополосной модуляции, основанный на квадратурном синтезе. Показана актуальность использования сигналов однополосной модуляции для декаметровых систем радиосвязи. Аналитическая общность сигналов амплитудной и однополосной модуляции проявляется при переходе к аналитической форме их представления. Проведен анализ известных способов формирования сигналов однополосной модуляции с подавленной несущей. Показаны их преимущества и недостатки. Показана структурная общность сигналов амплитудной модуляции и сигналов однополосной модуляции с сохраненной несущей. Обосновано введение дополнительного параметра, позволяющего регулировать уровень сохраняемого пилот-сигнала в сигналах однополосной модуляции. Представлена разработанная аналитическая модель сигнала однополосной модуляции, в которой, в отличие от известных моделей, уровень пилот-сигнала может регулироваться на этапе его формирования. Полученные результаты открывают новые возможности для перераспределения выходной мощности между пилот-сигналом и информационными компонентами боковой полосы в зависимости от уровня помех в канале. Показано, что разработанный подход на основе квадратурного синтеза позволяет формировать сигналы однополосной модуляции с сохраненным пилот-сигналом без дополнительных процедур фильтрации. Продемонстрирован выигрыш в помехоустойчивости приема при переходе от амплитудной модуляции к однополосной. Разработана структурная схема формирования сигналов однополосной модуляции с заданным уровнем пилот-сигнала. Демонстрируются результаты аналитического моделирования.

Ключевые слова: однополосная модуляция, регулируемый уровень пилот-сигнала, синтез сигнала однополосной модуляции, помехоустойчивость приема сигналов однополосной модуляции.

Литература

1. What is SSB: Single Sideband Modulation?" Electronics Notes. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/single-sideband-ssb-basics.php>.
2. Sidebands - An overview (pdf) | ScienceDirect Topics. (n.d.). Retrieved January 27, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/sidebands/pdf>.
3. A-Imam Al-Sammak, Ahmed J Jameel, Ayman Alaiwi Bahrain Polytechnic. Graphical Analysis of Single Sideband Modulation // International Journal of Computing and Digital Systems. April 2021 IJCDs Journal 10(1). DOI:10.12785/ijcds/1001111.

4. Ye Zhou, Jun Ming, Leilei Wang, Dongyan Wu, Li Zhao and Jiangnan Xiao. Optical Polarization Division Multiplexing Transmission System Based on Simplified Twin-SSB Modulation // Sensors 2022, 22(20), 7700; <https://doi.org/10.3390/s22207700>.
5. A. Kulkarni, S. Kothavade and D. Patel. Assessment of SSB, Modified-SSB and VSB Modulation Techniques based on Modulation Index, Extinction Ratio, Chromatic Dispersion and Received RF power // 2021 International Conference on Communication information and Computing Technology (ICCICT), Mumbai, India, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCICT50803.2021.9509947.7.
6. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Аванесов М.Ю. Модель деструктивного воздействия когнитивного характера // Информация и космос. 2018. № 2. С. 22-29.
7. Рахлин В.П., Сак П.В. Повышение энергетических показателей КВ-передатчика с однополосной модуляцией речевой информации при применении автоматической регулировки режима // Техника радиосвязи. 2021. № 4 (51). С. 37-43.
8. Дворников С.В. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных частотно-временных распределений // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 7-11.
9. Rosepreet Kaur Bhogal and Manoj Sindhwani. Generation of Single Sideband-Suppressed carrier (SSB-SC) Signal Based on Stimulated Brillouin Scattering. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2327, 4th International Conference on Intelligent Circuits and Systems. 2327 (2022) 012025 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2327/1/012025.
10. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Бурыкин Д.А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. № 2. С. 4-7.
11. Hualong Ye, Leihong Zh, Kaimin W, Dawei Zh. Study on the key technology of ghost imaging based on orthogonal frequency division multiplexing // Opticheskii Zhurnal. 2021. Т. 88. № 8. С. 20-31.
12. K. Kassan, Haifa Fares, D. Christian Glattli, Yves Louet. Performance vs. spectral properties for single-sideband continuous phase modulation // IEEE Transactions on Communications, 2021, 69 (7), pp.4402-4416. ff10.1109/TCOMM.2021.3073792ff. ffhal-03268769f
13. Алексеев А.А., Железняк В.К., Комаров维奇 В.Ф., Дворников С.В. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов // Научное приборостроение. 2000. Т. 10. № 3. С. 77-87.
14. Sinicina E.A., Davydov V.V., Galichina A.A., Lukyanov A.S., Shishkov A.N., Podstrigayev A.S. A study of temperature dependence of phase shift in optoelectronic path of direction finder channels // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012075.
15. Подстригайев А.С., Нгуен Ч.Н., Смоляков А.В., Логинов И.В. Сравнительный анализ методов обработки сигналов в полосе промежуточных частот средств радиомониторинга // Морская радиоэлектроника. 2022. № 2 (80). С. 26-29.
16. Dongxi Lu, Xian Zhou, Fei Liu, Jiahao HUO, Jinhui Yuan, Keping Long. High spectral efficiency SSB-PAM-DD scheme with high linewidth tolerance // Journal on Communications, 2022, 43(5): 36-44.
17. Подстригайев А.С. Широкополосный матрично-параллельный приемник средств радиотехнической разведки с пониженной неоднозначностью определения частоты радиолокационных сигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14 / С.-Петербург. гос. электротехнический ун-т. СПб., 2016. 168 с.
18. Дворников С.В., Бородин Е.Ю., Маджар Х., Махлуф Ю.Х. Частотно-временное оценивание параметров сигналов на основе функций огибающих плотности распределения их энергии // Информация и космос. 2007. № 4. С. 41-45.
19. Подстригайев А.С., Лихачев В.П. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text>.
20. Дворников С. В. Теоретические основы синтеза билинейных распределений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 268 с. EDN: QMRKRH
21. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л., Новиков Е.А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2.
22. Алексеев А.А., Железняк В.К., Комаров维奇 В.Ф., Дворников С.В. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов // Научное приборостроение. 2000. Т. 10. № 3. С. 77-87.
23. Завьялов С.В., Смирнова Е.Н. Алгоритм формирования и приема SEFDM-сигналов на основе блоков БПФ/ОБПФ для SDR-платформы // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 2. С. 5-10.
24. Дрига И.А., Васильев Р.М. Исследование влияния нестабильности частоты опорных генераторов на работу следящих систем навигационной аппаратуры ГЛОНАСС/GPS // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 2. С. 22-23.
25. Поликаровских А.И. Современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 4. С. 100-108.
26. Leonard R Kahn (July 1952). Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration // Proceedings of the IRE. 40 (7): 803-806. doi:10.1109/JRPROC.1952.273844. S2CID 51669401.
27. The History of Single Sideband Modulation Archived 2004-01-03 at the Wayback Machine, Ing. Peter Weber.
28. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Манаenko С.С., Бурыкин Д.А., Кузнецов Д.А. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов // Информация и космос. 2015. № 3. С. 13-16.
29. Pan X., Zhang B., Liu X. Mitigation of crosstalk between RSB and LSB signals generated by one I/Q modulator. Opt. Express 2020, 28, 2238-2250.
30. X Gao, Y. Cai, B. Xu, F. K. Deuyu, K. Qiu. Zero guard band multi-TWIN-SSB system in single fiber bidirectional PON transmission // IEEE Access, vol. 8, pp. 26814-26826, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971538>.
31. Дворников А.С., Гудков М.А., Аюков Б.А., Федосов А.Ю., Подгороный А.Н., Дворников С.В., Крячко А.Ф., Пшеничников А.В. Анализ помехоустойчивости передач с однополосной модуляцией в каналах с флуктуационными помехами // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2022. № 4. С. 58-64.
34. Степанова И.В. Принципы и организация систем связи с фиксированным и мобильным доступом. МТУСИ, 2017. 104 с.
35. Adami D. New ns2 Module for Modeling MPLS Networks with point-to-multipoint LSP support // International Conference on IEEE Communications (ICC 2009), Dresden, Germany, June 2009, pp. 1-5.

Информация об авторах:

Дворников Сергей Сергеевич, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств (Кафедра 23) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Военная академия связи им. С.М. Буденного, к.т.н., Санкт-Петербург, Россия

Жеглов Кирилл Дмитриевич, аспирант кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", Санкт-Петербург, Россия

Дворников Сергей Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов (Кафедра 21) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

IDENTIFICATION OF THE STATES OF THE SYNCHRONIZATION SYSTEM BASED ON ITS ENTROPY ANALYSIS

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-48-53

Andrey K. Kanaev,
 Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
 St. Petersburg, Russia, kanaevak@mail.ru

Manuscript received 11 February 2023;
Accepted 17 March 2023

Eugenij V. Oparin,
 CJSC "Institute of telecommunications",
 St. Petersburg, Russia, Oparin@itain.ru

Ekaterina V. Oparina,
 Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
 St. Petersburg, Russia, sirayaekaterina@mail.ru

Keywords: identification, telecommunication system, synchronization system, differential entropy, pattern recognition

Purpose: To provide reasonable identification of the states of the process of functioning of the synchronization system in communication networks for making rational and operational decisions on its management and technical operation. It is proposed to achieve this goal by forming an entropy model of the dynamics of the synchronization system based on the analysis of the values of its diagnostic parameters. To identify the state of the process of functioning of the synchronization system, it is proposed to use differential entropy as a system-wide parameter for evaluating systems. The calculation of the differential entropy of the synchronization system is based on the values of the differential entropy of its elements, which are estimated based on the assessment of diagnostic parameters. Further identification of states is carried out by using pattern recognition algorithms. **Methods:** research methods are used in the work, which are based on the principles of the theory of networks and systems, system and mathematical analysis, entropy and mathematical modeling. **Results:** as a result of the research, an entropy model of the dynamics of the synchronization system was obtained, an approach was proposed for assessing the state of the synchronization system by analyzing its differential entropy as a system-wide parameter. **The theoretical significance** of the work lies in the expansion of the methodological base for the construction of control systems for the synchronization of communication networks. **The practical significance** of the work lies in the use of the obtained results for the design and modernization of synchronization control systems in the field of forming reasonable management decisions.

Information about authors:

Andrey K. Kanaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Communications, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Eugenij V. Oparin, Candidate of Technical Sciences, Leading specialist of the communication system development department, CJSC "Institute of telecommunications", St. Petersburg, Russia

Ekaterina V. Oparina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Strength of Materials and Structures, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Для цитирования:

Канаев А.К., Опарин Е.В., Опарина Е.В. Идентификация состояний системы синхронизации на основе её энтропийного анализа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №3. С. 48-53.

For citation:

Kanaev A.K., Oparin E.V., Oparina E.V. Identification of the states of the synchronization system based on its entropy analysis. T-Comm, vol. 17, no.3, pp. 48-53. (in Russian)

Introduction

The efficiency and quality of the process of functioning of modern and promising telecommunication systems significantly depends on the synchronization system that is part of it. The synchronization system is necessary for the formation, transmission and distribution of synchronization signals to the digital equipment of the telecommunication system in order to ensure their coordinated interaction, to maintain the required quality of communication services at the proper level. Thanks to the synchronization system in the telecommunication system, the clock frequency of the digital signals of the required level is maintained, as well as the stability of the master generators. The functioning of the synchronization system is carried out using the principle of forced synchronization. The need for synchronization signals arises both in networks with channels switching and in networks with packages switching. The occurrence of failures in the synchronization system helps to reduce the performance of related subsystems of the telecommunications system [1-3].

The synchronization system is a complex heterogeneous structure that closely interacts with adjacent subsystems of the telecommunications system. Elements of the synchronization system interact with each other through standard interfaces, which are defined by national and international recommendations. The high-quality functioning of the synchronization system is possible only with the organization of an effective management system, which, as a rule, has a multi-level hierarchical structure in accordance with the regions of synchronization.

Direct maintenance of the synchronization system is carried out through the technical operation system, which performs the functions of monitoring, conducting the necessary measurements, repairing and backing up if necessary. Delivery of synchronization signals to end users is carried out through a synchronization network, which includes various types of generator equipment, means of delivery, distribution, retiming, recovery, and conversion of synchronization signals [4, 5].

Thus, the generalized block diagram of the synchronization system has the form shown in Figure 1.

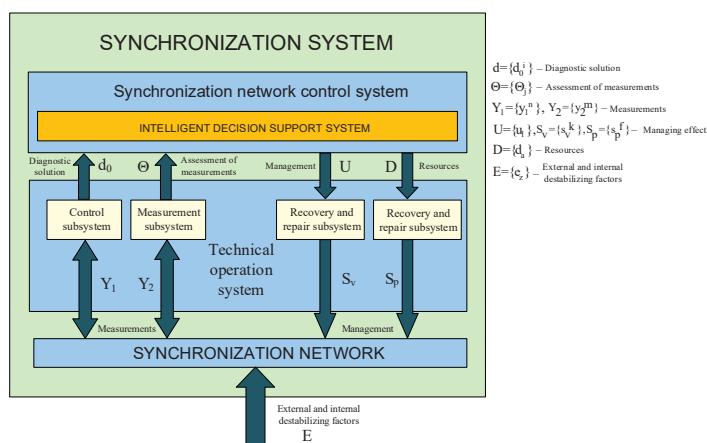


Fig. 1. Generalized structural diagram of the synchronization system

It should be noted that the synchronization system in general form is superimposed on the adjacent subsystems of the telecommunication system, so it includes elements of guide systems and transmission systems.

1. The use of differential entropy to assess the technical condition of the synchronization system and its elements

Entropy is a general system parameter, which is used to assess the state of various structures, regardless of the subject area of application. To assess the state of objects that differ in significant complexity and stochastic nature, which are characterized by many parameters and relationships, the use of differential entropy is possible [6].

In general, differential entropy is determined according to the formula (1) [7, 8]:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (1)$$

where $f(x)$ is the density of the distribution of the signal of the continuous source.

The synchronization system is a complex dynamic stochastic system, therefore, to assess its condition, it is possible to use differential entropy [7].

The assessment of differential entropy of the synchronization system can be made through an assessment of the differential entropy of its elements. To do this, it is necessary to represent each element of the synchronization system in the form of Y (2).

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \quad (2)$$

The elements of the vector (2) Y_1, Y_2, \dots, Y_m are the values of the diagnostic parameters. Each element of the synchronization system is characterized by its set of diagnostic parameters, so vectors (2) for various elements of the synchronization system will be different [7, 9].

As general diagnostic parameters of the synchronization system and its elements, according to regulatory documents, you can distinguish [1, 3]:

- relative deviation of the frequency of synchrosignal from its nominal value;

- the level of the phase of the synchrosignal phase at the entrance and output of equipment, expressed through MTIE and TDEV;

- accuracy of memorization and maintenance of frequency in the frequency retention mode;

- noise resistance to phase noise;

- the values of the gear characteristics for phase wandering.

For elements operating in networks with packages switching, the following diagnostic parameters are used [1, 3]:

- accuracy of synchronization of data on the current value of a second reference number;

- accuracy of the restoration of the interval of 1 Hz and the reference frequency;

- accuracy of synchronization of the initial phase of second references.

The listed diagnostic parameters are usually measured in predetermined control points of the synchronization network. These diagnostic parameters can be supplemented by common -set parameters obtained using the SNMP protocol or proprietary protocols of equipment manufacturers.

To estimate the differential entropy of an element of the synchronization system, we introduce the following assumptions:

- the vector $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ has a multivariate normal distribution;

– for a vector $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ it is possible to calculate the covariance matrix Σ (3).

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{Y_1}^2 & \text{cov}(Y_1, Y_2) & \dots & \text{cov}(Y_1, Y_m) \\ \text{cov}(Y_2, Y_1) & \sigma_{Y_2}^2 & \dots & \text{cov}(Y_2, Y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(Y_m, Y_1) & \text{cov}(Y_m, Y_2) & \dots & \sigma_{Y_m}^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

It is noted in [7] that the analytical determination of the entropy $H(Y)$ at the moment is possible only for a joint normal distribution. When using third-party distributions, there is no possibility of finding a value that is similar to the determinant of the correlation matrix for the joint normal distribution [7]. Nevertheless, the use of a multivariate normal distribution looks legitimate due to the significant complexity of the synchronization system and the diversity of its elements. Estimation of the covariance matrix of the vector Y is possible by analyzing the statistics of the technical operation of the synchronization system and its elements.

The differential entropy of an element of the synchronization system can be estimated using formula (4) [7]:

$$H(Y) = \frac{1}{2} \ln [(2\pi e)^m |\Sigma|] = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R| = H(Y)_\Sigma + H(Y)_R \quad (4)$$

where $|\Sigma|$ is the value of the determinant of the covariance matrix Σ of the vector Y ; $|R|$ is the value of the determinant of the correlation matrix R of the vector Y .

Expression (4) allows us to conclude that the entropy of an individual element of the synchronization system is the sum of two quantities. The value $H(Y)_\Sigma$ determines the limiting differential entropy, which corresponds to the complete independence of the diagnostic parameters of the element of the synchronization system (entropy of chaos). The value $H(Y)_R$ shows the degree of interrelationships between diagnostic parameters (entropy of self-organization). Expression (4) also shows that the differential entropy of an element of the synchronization system can change due to a change in the dispersion of the values of diagnostic parameters, as well as due to a change in the correlation of diagnostic parameters [7, 10].

Tracking in continuous mode the change in the differential entropy of an element of the synchronization system, you can track its state, for this it is necessary to evaluate the change in the entropy of chaos and the entropy of self-organization. If there was an increase in the entropy of chaos, then there was an increase in the scatter of the data of diagnostic parameters; with a decrease in the entropy of chaos, the scatter of the data decreased. Similarly, if the entropy of self-organization increased, then processes occurred in the element of the synchronization system that led to a decrease in the relationship of diagnostic parameters. With a decrease in the entropy of self-organization, the relationship between diagnostic parameters increased [7, 10]. By estimating the entropy of chaos and the entropy of self-organization, it is possible to track the contribution of each diagnostic parameter to the change in the state of an element of the synchronization system.

Applying the approach for estimating the differential entropy of an element of the synchronization system in a similar way, it is possible to estimate the differential entropy of the entire

synchronization system or its fragments. According to the dynamics of the change in differential entropy, it is possible to find failed elements, or elements whose functioning goes beyond the normative values.

2. Identification of the state of the synchronization system based on the estimation of its differential entropy

Identification of the states of the synchronization system is necessary in order to make informed decisions on its management. Each state of the synchronization system can be associated with a certain set of plans and strategies in the development of management decisions to maintain its functioning process.

There is the possibility of many states of the synchronization system to divide into subsets, each subset of the conditions put one or more typical managerial decisions into line. Thus, the task of managing the synchronization system is reduced to the classification and identification of its conditions. Each state is characterized by a certain set of diagnostic parameters, which means a certain set of values of the entropy of the elements of the synchronization system and the value of the entropy of the entire system.

To identify conditions, it is possible to use images recognition algorithms. The recognition of images in this case means attributing the state to one of the known classes [11, 12]. In general, three modes of recognition of images can be distinguished: recognition without training, recognition with partial learning and recognition with learning.

To identify the states of the synchronization system, it is possible to use learning recognition algorithms, since the synchronization system is a complex technical system with many conditions and is regularly undergoing modernization, reconfiguration of elements and means of synchrosignal delivery.

In recognition with training, many states of the synchronization system can be divided into classes $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$, each of which is characterized by certain values of entropy. The values of the elements of the synchronization system are calculated by expression (4) based on the values of diagnostic parameters at a given moment in time. Accordingly, classes can be represented by training samples (5):

$$\begin{aligned} \{X_{1_1}, X_{2_1}, \dots, X_{n_1}\} &\subset \omega_1, \\ \{X_{1_2}, X_{2_2}, \dots, X_{n_2}\} &\subset \omega_2, \\ \dots & \\ \{X_{1_k}, X_{2_k}, \dots, X_{n_k}\} &\subset \omega_k, \end{aligned} \quad (5)$$

where X_{n_k} is the value of the entropy of the element n of the synchronization system when related to the k -th state. In the general case, ω_k is a vector consisting of n elements [13].

The new or current state of the synchronization system must be attributed to one of the existing classes (5). In the general case, this condition may coincide with any of the conditions included in the classes $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ or to be in the range of classes of states.

Having thus identified the condition, it is possible to further correlate it from the already existing managerial decision.

Initially, it is necessary to determine the main possible states of the synchronization system. Among the main states, it is necessary to highlight the condition in which the synchronization system function with the characteristics that correspond to the regulatory values, and the conditions corresponding to the failures of

the elements, generator equipment and the delivery means of synchronization signals are also possible, and the release of intermediate states is also possible.

The correlation of the current state with reference ones is possible using the correlation algorithm and the distance in distance. The correlation algorithm consists in determining the correlation of the current state of the synchronization system with each of the reference states. When using this algorithm, the state X refers to the class of states for which the correlation coefficient is the largest [11-14].

The correlation coefficient (CC) between the states X_i, X_j determines the measure of their angular proximity and is expressed through their normalized scalar product (6):

$$\rho(X_i, X_j) = \frac{(X_i, X_j)}{|X_i| \cdot |X_j|}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

expression can be represented as (7):

$$\rho(X_i, X_j) = \frac{\sum_{s=1}^p x_{is} \cdot x_{js}}{\sqrt{\sum_{s=1}^p x_{is}^2} \cdot \sqrt{\sum_{s=1}^p x_{js}^2}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

The classes of states of the synchronization system $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ will be represented by our training samples.

We represent the training samples of states $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ as average entropy values for each state (8).

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X_{i_1} \\ \mu_2 &= \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} X_{i_2} \\ &\dots \\ \mu_k &= \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} X_{i_k} \end{aligned} \quad (8)$$

where k is the total number of reference states, μ_k is the standard (average value) of the entropy of the k -th class of states of the synchronization system, n is the number of elements of the synchronization system, according to which the entropy is calculated [11-14].

The correlation of states, which are a vector, is determined by the cosine of the angle between them. The cosine of the angle between the state vectors can be calculated from the scalar product of the vectors (9):

$$\begin{aligned} (X, \mu_1) &= |X| |\mu_1| \cos \alpha_1 \\ (X, \mu_2) &= |X| |\mu_2| \cos \alpha_2 \\ &\dots \\ (X, \mu_k) &= |X| |\mu_k| \cos \alpha_k \end{aligned} \quad (9)$$

where X is the current state vector. α_k is the angle between the current state vector and the k -th reference state vector.

From (9) we obtain (10):

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{(X, \mu_1)}{|X| |\mu_1|} \\ \cos \alpha_2 &= \frac{(X, \mu_2)}{|X| |\mu_2|} \\ &\dots \\ \cos \alpha_k &= \frac{(X, \mu_k)}{|X| |\mu_k|} \end{aligned} \quad (10)$$

The scalar product of vectors and their moduli can be calculated in terms of their coordinates in n -dimensional space:

$$\begin{aligned} X &= (X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \mu_1 &= (X_{1_1}, X_{1_2}, \dots, X_{1_n}) \\ \mu_2 &= (X_{2_1}, X_{2_2}, \dots, X_{2_n}) \\ &\dots \\ \mu_k &= (X_{k_1}, X_{k_2}, \dots, X_{k_n}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (X, \mu_1) &= X_1 X_{1_1} + X_2 X_{1_2} + \dots + X_n X_{1_n} \\ (X, \mu_2) &= X_1 X_{2_1} + X_2 X_{2_2} + \dots + X_n X_{2_n} \\ &\dots \\ (X, \mu_k) &= X_1 X_{k_1} + X_2 X_{k_2} + \dots + X_n X_{k_n} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} |X| &= \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2} \\ |\mu_1| &= \sqrt{X_{1_1}^2 + X_{1_2}^2 + \dots + X_{1_n}^2} \\ |\mu_2| &= \sqrt{X_{2_1}^2 + X_{2_2}^2 + \dots + X_{2_n}^2} \\ &\dots \\ |\mu_k| &= \sqrt{X_{k_1}^2 + X_{k_2}^2 + \dots + X_{k_n}^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Having calculated the cosines of the angles between the vectors, it is necessary to find the largest one (14).

$$\max_k \cos \alpha_{ik} = \cos \alpha_{ik_0} \quad (14)$$

The expression (14) suggests that the angle between the vector of the current state and the found vector found, and, accordingly, the current state of the synchronization system can be attributed to the found class of states [11-14].

If the condition of the equality of cosine values is fulfilled, and these cosine are the greatest, then the current state of the synchronization system can be attributed to any of these class classes.

Decisions obtained using the correlation algorithm are based on the angular proximity of state vectors. The algorithm is applicable if the angles between vectors within the same class are quite small in comparison with the corners between classes of classes. Decisions obtained by the correlation algorithm can be supplemented by decisions obtained when using the algorithm in distance.

When using the algorithm in distance, the distances are calculated from the current state to all possible in the n -dimensional space. Subsequently, it is necessary to compare the found distances and select the smallest (15).

$$\min_n r_{in} = r_{in_0} \quad (15)$$

The value of i , for which the distance is minimal, determines the class of states of the synchronization system. It should be noted that if the found distances are sufficiently large and greater than the minimum class diameter, then the current state should be assigned to a new class [11-14].

The block diagram of the methodology for identifying the states of the synchronization system is shown in Figure 2.

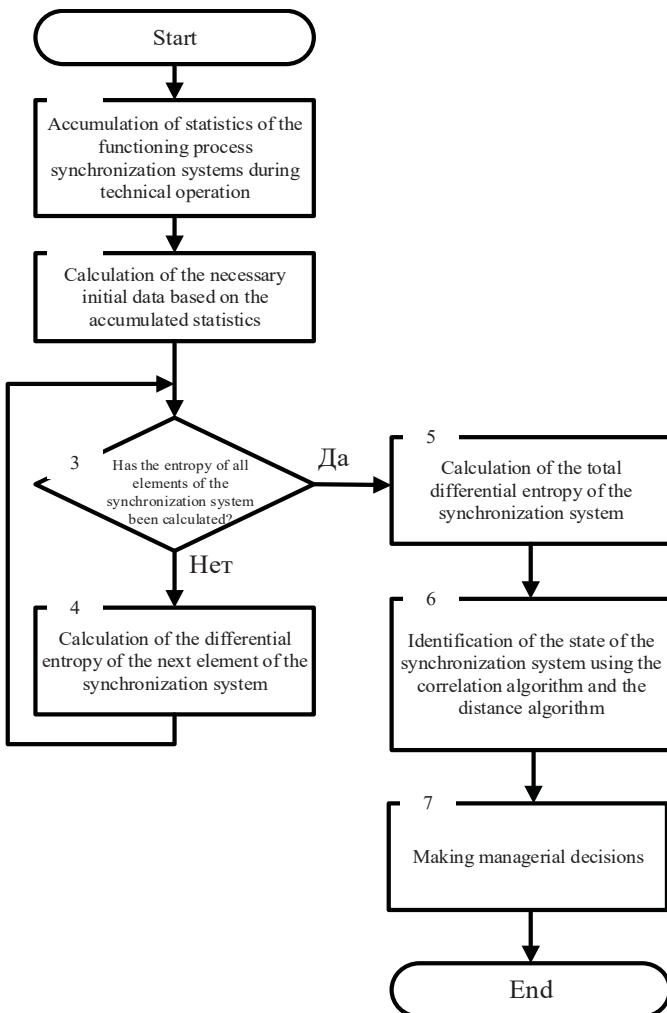


Fig. 2. Block diagram of the technique for identifying the states of the synchronization system

The integrated use of the above algorithms makes it possible to reliably identify the state of the synchronization system, which in the future will make it possible to reasonably make management decisions.

Conclusion

The synchronization system is a structure, the functioning of which determines the performance of the entire telecommunications system and the quality of communication services.

Refusals in the synchronization system apply to refusals in adjacent subsystems and the entire telecommunications system as a whole. Thus, the task of constructing an effective synchronization management system that can reasonably and quickly develop managerial decisions is relevant. The key issue in the development of managerial decisions is the identification of the state of the synchronization system. To resolve this issue, the use of differential entropy as a common -system parameter, which allows all possible diagnostic parameters to reduce to the same value and compare. The further issue of identification is reduced to the classification of states, the solution of which is made by using images recognition algorithms. The results can be used in existing and designed synchronization management systems by forming the relevant software systems.

References

- Ryzhkov A.V., Koltunov M.N., Nasonov A.Y., Schwartz M.L. Problems of comparing time scales in packet telecommunication networks. *T-Comm.* 2017. No. 11, pp. 10-16.
- Koltunov M.N., Shvarts M.L. Topical issues of the use of time-frequency equipment in the Unified Energy System of Russia. *Systems of synchronization, formation and processing of signals.* 2018. No. 2, pp. 113-120.
- Lobastova M.V., Matyukhin A.Yu. Evaluation of the reliability of the network element of clock network synchronization. *Radio engineering and telecommunication systems.* 2020. No. 3, pp. 27-36.
- Netes V.A. Service level agreement for the provision of synchronization signals. *Systems of synchronization, formation and processing of signals.* 2018. No. 2, pp. 137-140.
- Malygin S.V., Schwartz M.L. Features of building clock network synchronization systems for distributed communication networks. *Informatization and communication.* 2021. No. 1, pp. 29-40.
- Tsvetkov O.V. Entropy analysis of data in physics, biology, technology. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2015. 202 p.
- Lebedeva O.V. Entropy modeling of the dynamics of multidimensional stochastic systems: dis. for the competition scientist. degree of candidate of physical and mathematical sciences. Chelyabinsk, 2015. 174 p.
- Tyrsin A.N., Surina A.A. Entropy approach to risk analysis of critical infrastructure systems. *SUSU Science: Proceedings of the 66th Scientific Conference of the Section of Natural Sciences.* 2014, pp. 210-218.
- Tyrsin A.N., Vorfolomeeva O.V. Study of the dynamics of multidimensional stochastic systems based on entropy modeling. *Computer science and its applications.* 2013. Vol. 7. No. 4, pp. 3-10.
- Kanaev A.K., Oparin E.V., Oparina E.V. Method of monitoring the technical state of the clock network synchronization network based on the entropy analysis of the diagnostic parameters of its elements. *Issues of radio electronics. Series: TV Technique.* 2021. No. 3, pp. 108-117.
- Eremeev E.A. Pattern recognition in expert decision-making systems. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics.* 2019. Vol. 19. No. 4, pp. 704-713.
- Bolshakov A.A., Karimov R.N. Methods for processing multidimensional data and time series: a textbook for universities. Moscow: Hot-line-Telecom, 2007. 522 p.
- Belyavsky G.I., Danilova N.V. Data analysis. Pattern recognition. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2018. 72 p.
- Volokhin D.V. The concept of an image in pattern recognition. Statistical pattern recognition. Scientific aspect. 2020. Vol. 16. No. 2, pp. 2021-2025.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ЕЁ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА

Канаев Андрей Константинович, ФГБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, kanaevak@itain.ru

Опарин Евгений Валерьевич, ЗАО "Институт телекоммуникаций", Санкт-Петербург, Россия, [Oparin@itain.ru](mailto>Oparin@itain.ru)

Опарина Екатерина Владимировна, ФГБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, sirayaekaterina@mail.ru

Аннотация

Цель: Обеспечить обоснованную идентификацию состояний процесса функционирования системы синхронизации в сетях связи для принятия рациональных и оперативных решений по её управлению и технической эксплуатации. Достижение данной цели предлагается осуществить путем формирования энтропийной модели динамики системы синхронизации на основе анализа значений её диагностических параметров. Для идентификации состояния процесса функционирования системы синхронизации предлагается использовать дифференциальную энтропию как общесистемный параметр оценки систем. Вычисление дифференциальной энтропии системы синхронизации производится на основе значений дифференциальной энтропии её элементов, которые оцениваются на основе оценки диагностических параметров. Дальнейшая идентификация состояний осуществляется путем использования алгоритмов распознавания образов. **Методы:** в работе использованы методы исследования, которые основаны на положениях теории сетей и систем, системного и математического анализа, энтропийного и математического моделирования. **Результаты:** в результате проведенных исследований получена энтропийная модель динамики системы синхронизации, предложен подход по оценке состояния системы синхронизации путём анализа её дифференциальной энтропии как общесистемного параметра. Теоретическая значимость работы состоит в расширении методической базы по построению систем управления синхронизацией сетей связи. **Практическая значимость** работы заключается в использовании полученных результатов для проектирования и модернизации систем управления синхронизацией в области формирования обоснованных управлительских решений.

Ключевые слова: идентификация, телекоммуникационная система, система синхронизации, дифференциальная энтропия, распознавание образов.

Литература

1. Рыжков А.В., Колтунов М.Н., Насонов А.Ю., Шварц М.Л. Проблемы сличения шкал времени в пакетных сетях электросвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2017. № 11. С. 10-16.
2. Колтунов М.Н., Шварц М.Л. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. №2. С. 113-120.
3. Лобастова М.В., Матюхин А.Ю. Оценка надежности работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. №3. С. 27-36.
4. Нетес В.А. Соглашение об уровне обслуживания при предоставлении сигналов синхронизации // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. №2. С. 137-140.
5. Малыгин С.В., Шварц М.Л. Особенности построения систем тактовой сетевой синхронизации для распределенных сетей связи // Информатизация и связь. 2021. №1 С. 29-40.
6. Цветков О.В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии, технике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. 202 с.
7. Лебедева О.В. Энтропийное моделирование динамики многомерных стохастических систем: дис. на соиск. учён. степени кандидата физико-математических наук. Челябинск, 2015. 174 с.
8. Тырсин А.Н., Сурина А.А. Энтропийный подход к риск-анализу систем критичных инфраструктур // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции естественных наук. 2014. С. 210-218.
9. Тырсин А.Н., Ворфоломеева О.В. Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования // Информатика и её применения. 2013. Т. 7. № 4. С. 3-10.
10. Канаев А.К., Опарин Е.В. Методика мониторинга технического состояния сети тактовой сетевой синхронизации на основе энтропийного анализа диагностических параметров её элементов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. №3. С. 108-117.
11. Еремеев Е.А. Распознавание образов в экспертных системах принятия решений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. №. 4. С. 704-713.
12. Большаков А.А., Каимов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 522 с.
13. Беляевский Г.И., Данилова Н.В. Анализ данных. Распознавание образов. Ростов-на-Дону: Изд-во Южный федеральный университет, 2018. 72 с.
14. Волохин Д.В. Понятие образа в распознавании образов. Статистическое распознавание образов // Научный аспект. 2020. Т. 16, №. 2. С. 2021-2025.

Информация об авторах:

Канаев Андрей Константинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры "Электрическая связь" ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Опарин Евгений Валерьевич, к.т.н., ведущий специалист отдела разработки систем связи ЗАО "Институт телекоммуникаций", г. Санкт-Петербург, Россия

Опарина Екатерина Владимировна, к.т.н., доцент кафедры "Механика и прочность материалов и конструкций" ФГБОУ ВО

ПГУПС, г. Санкт-Петербург, Россия

35-я международная выставка информационных и коммуникационных технологий «Связь-2023» в рамках Российской недели высоких технологий – 2023



Москва, Краснопресненская набережная, 14, ЦВК «Экспоцентр»
11-14 апреля 2023 г.

Организатор: АО «Экспоцентр»

11-14 апреля 2023 г. в Москве (ЦВК «Экспоцентр») состоится выставка «Связь-2023» – это крупнейшая в России бизнес-площадка для общения профессионалов, поиска поставщиков и новых каналов сбыта, выработки новых решений и определения трендов развития информационных технологий и телекоммуникаций.

Выставка проводится с 1975 г. и является крупнейшим мероприятием в России, СНГ и Восточной Европе в сфере телекоммуникаций и информационных технологий. Мероприятие проходит в рамках «Российской недели высоких технологий», объединяющей 35-ю международную выставку информационных и коммуникационных технологий «Связь-2023», экспозицию навигационных систем, технологий и услуг «Навитех», а также форумы и конференции в сфере информационных технологий, телекоммуникаций, навигации и телематики.

Мероприятие проходит при поддержке Минцифры России, Минпромторга России, Комитета по науке и высшему образованию Государственной Думы Федерального собрания РФ, Роскомнадзора и ТПП РФ.

В 2022 году свои возможности на выставке представили более 170 компаний из пяти стран, посетили более 8000 специалистов отрасли. В рамках деловой программы прошли 30 мероприятий, приняли участие около 200 спикеров и 3000 делегатов.

Основные тематические разделы выставки «Связь»:

- телекоммуникационное оборудование, решения, услуги;
- IoT Tech, 5G, «умный город»;
- сети передачи данных, телекоммуникационная и сетевая инфраструктура;
- спутниковая связь, радиосвязь, мобильная связь;
- кабели связи, оборудование, ЦОД;
- системы электропитания;
- Smart Device Show (пользовательская электроника);
- программное обеспечение, российский софт;
- IP-технологии, AR&VR;
- искусственный интеллект, ИТ-услуги;
- электронные компоненты для телекоммуникаций;
- работа и карьера в ИТ и телекоме.

Деловая программа выставки в 2023 году будет посвящена рассмотрению актуальных вопросов внедрения передовых технологий на предприятиях отрасли, мерам государственной поддержки бизнеса, экспортным возможностям российского телекоммуникационного оборудования, курсу на импортозамещение. Участие примут представители органов исполнительной и законодательной власти, телеком-операторов, предприятий отрасли, ученые и эксперты.

Программа включает следующие мероприятия:

- форум «Связь-2023»;
- форум «Российский софт: эффективные решения»;
- мероприятие клуба IT&Digital директоров «я-ИТ-ы»
- международный форум Международной академии связи

XVI

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАВИГАЦИОННЫЙ ФОРУМ
И КОНГРЕСС «СФЕРА»



РОСКОСМОС



1
день



1500
ДЕЛЕГАТОВ



75
ДОКЛАДЧИКОВ-
ЭКСПЕРТОВ



400
КОМПАНИЙ

Конгресс

СФЕРА

+7 (495) 641 57 17
glonass-forum.ru

13
апреля

2023

ЦВК «Экспоцентр»

Автонет
Национальная технологическая
инициатива

ЭКСПОЦЕНТР

Российская неделя
высоких технологий
РНВТ



ORGANIZERS:
IRIS ASSOCIATION (INSTITUTE OF RADIO AND INFORMATION SYSTEMS, VIENNA, AUSTRIA)
RUSSIA SECTION TEM/GRS/ITSS JOINT CHAPTER

INTERNATIONAL CONFERENCE

**«2023 International Conference
«Engineering Management of
Communication and Technology»
(EMCTECH)**

IEEE Conference

**16 – 18 October 2023
Vienna, Austria**

Conference will produce a publication.

All accepted and presented Papers following the conference will be submitted for inclusion into IEEE Xplore and will be submitted also for indexing in Scopus and Web of Science data bases

The papers which are discussed at the conference can be divided into the following chapters:

CHAPTER 1. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN IOT DEVICES & ARTIFICIAL INTELLIGENCE

CHAPTER 2. TRANSPORT AND COLLECTIVE SYSTEMS: SMART CONTROL TECHNOLOGY IN TRANSPORTATION, BIOMEDICAL, FARMING AND CYBER PHYSICAL SYSTEMS (new opportunities using technology in biomedical, farming, transportation, and cyber physical systems)

CHAPTER 3. BROADCAST TECHNOLOGIES ADVANCEMENTS – RADIO, IP, CELLULAR, ON DEMAND, INTERACTIVE

CHAPTER 4. TECHNOLOGY ADVANCEMENTS IN WIRE AND OPTICAL COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

CHAPTER 5. DIGITALIZATION PROCESS AND SECURITY MANAGEMENT IN DIGITAL SOCIETY AND INDUSTRY 4.0

CHAPTER 6. DIGITAL TRANSFORMATION AND DATA RISK MANAGEMENT IN ICT/TELECOMMUNICATION

CHAPTER 7. DEVELOPING PERSONAL SKILLS FOR LEADING INNOVATION INITIATIVES

CHAPTER 8. ENGINEERING TECHNOLOGY LEADING TO SOCIAL, POLITICAL AND ECONOMICAL CHANGE

Materials are available in English

<http://media-publisher.eu/conference-emctech/call-for-papers/>