

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте журнала www.hes.ru и библиотеке elibrary.ru.

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: HT-ESResearch@yandex.ru. С требованиями можно ознакомиться на сайте: www.H-ES.ru.

Язык публикаций: русский, английский.
Периодичность выхода – 6 номеров в год.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-60899 от 02.03.2015
Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж 1000 экз. Цена 1000 руб.
Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается.

© ООО «ИД Медиа Паблишер», 2021

H&ES Research is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

The journal H&ES Research 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. IF of the Russian Science Citation Index.

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

All issues of the journal are in a free access on a site of the journal www.hes.ru and elibrary.ru.

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: HT-ESResearch@yandex.ru. The requirements are available on the website: www.H-ES.ru.

Language of publications: Russian, English.
Periodicity – 6 issues per year.
Media Registration Certificate PI No. FS77-60899. Date of issue: March 2, 2015.
Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

Circulation of 1000 copies. Price of 1000 Rub.
Postgraduate students for publication of the manuscript will not be charged

© "Media Publisher", LLC 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Учредитель:

ООО «ИД Медиа Паблишер»

Издатель:

ДЫМКОВА С.С.

Главный редактор:

ЛЕГКОВ К.Е.

Редакционная коллегия:

БОБРОВСКИЙ В.И., д.т.н., доцент;

БОРИСОВ В.В., д.т.н., профессор,

Действительный член академии военных наук РФ;

БУДКО П.А., д.т.н., профессор;

БУДНИКОВ С.А., д.т.н., доцент,

Действительный член Академии информатизации образования;

ВЕРХОВА Г.В., д.т.н., профессор;

ГОНЧАРЕВСКИЙ В.С., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ;

КОМАШИНСКИЙ В.И., д.т.н., профессор;

КИРПАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;

КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,

академик Международной академии информатизации, Действительный член Российской академии естественных наук;

МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,

Действительный член Академии военных наук РФ;

МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;

ПАВЛОВ А.Н., д.т.н., профессор;

ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;

СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;

СИНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;

ШАТРАКОВ Ю.Г., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.

Адрес издателя:

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514.

Адрес редакции:

194044, Россия, Санкт-Петербург, Лесной Проспект, 34-36, к. 1, Тел.: +7(911) 194-12-42.

Адрес типографии:

Россия, Москва, ул. Складочная, д. 3, кор. 6.

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.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Руденко Э.М., Семикина Е.В.

Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм..... 6

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Савищенко Н.В., Дырин В.И., Макаренко В.П.

Двухлучевая модель с диффузным замиранием мощности сигнала 18

Волков Д.В., Саенко И.Б., Шакуров Р.Ш., Уланов А.В.

К вопросу построения агентной модели технического обеспечения системы связи специального назначения 24

Студеникин А.В., Жук А.П.

Моделирование дискретных ортогональных кодовых последовательностей для систем передачи информации 36

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Бочков А.П., Хомоненко А.Д., Барановский А.М.

Модель формирования кластеров информативных узлов интегрированной и распределенной обработки данных в вычислительной сети 44

Данильченко М.Н., Муравник А.Б.

Нейросетевой подход к построению маршрута в автоматизированной системе управления специального назначения 58

Самарин Н.Н.

Модель безопасного функционирования программного обеспечения, формализующая контроль использования памяти и обращений к ней процессора 68

Шелухин О.И., Рыбаков С.Ю., Магомедова Д.И.

Скрытие информации в аудиосигналах с использованием детерминированного хаоса 80



CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Rudenko E.M., Semikina E.V.

Unmanned aircraft routing, graph transcendent target functions
and genetic algorithm 6

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Savischenko N.V., Dyrin V.I., Makarenko V.P.

Two-wave with diffuse power fading 18

Volkov D.V., Saenko I.B., Shakurov R.Sh., Ulanov A.V.

On the issue of constructing an agent model of technical support
for a special-purpose communication system 24

Studenikin A.V., Zhuk A.P.

Modeling of discrete orthogonal code sequences for information
transmission systems 36

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Bochkov A.P., Khomonenko A.D., Baranovsky A.M.

Model of formation of clusters of informative nodes of integrated
and distributed data processing in a computer network 44

Danilchenko M.N., Muravnik A.B.

Neural network approach to building a route to special-purpose
automated control systems 58

Samarin N.N.

A model of secure software operation that formalizes the control of memory
usage and cpu accesses 68

Sheluhin O.I., Rybakov S.Y., Magomedova D.I.

Audio steganography method using determined chaos 80

Founder:

"Media Publisher", LLC

Publisher:

DYMKOVA S.S.

Editor in chief:

LEGKOV K.E.

Editorial board:

BOBROWSKY V.I., PhD, Docent;
BORISOV V.V., PhD, Full Professor;
BUDKO P.A., PhD, Full Professor;
BUDNIKOV S.A., PhD, Docent,
Actual Member of the Academy
of Education Informatization;
VERHOVA G.V., PhD, Full Professor;
GONCHAREVSKY V.S., PhD, Full Professor,
Honored Worker of Science
and Technology of the Russian Federation;
KOMASHINSKIY V.I., PhD, Full Professor;
KIRPANEV A.V., PhD, Docent;
KURNOSOV V.I., PhD, Full Professor,
Academician of the International Academy
of Informatization, law and order,
Member of the Academy of Natural
Sciences;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor,
Actual Member of the Academy
of Military Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PAVLOV A.N., PhD, Full Professor;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEMENOV S.S., PhD, Docent;
SINICYN E.A., PhD, Full Professor;
SHATRAKOV Y.G., PhD, Full Professor,
Honored Worker of Science
of the Russian Federation.

Address of publisher:

111024, Russia, Moscow,
st. Aviamotornaya, 8, office 512-514;

Address of edition:

194044, Russia, St. Petersburg,
Lesnoy av., 34-36, h.1,
Phone: +7 (911) 194-12-42.

Address of printing house:

Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. 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.

ЦИФРОВЫЕ РЕАЛИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

<http://www.tmtconferences.ru/events/spacecom2021/>

11 февраля в Москве, в уже привычный для всех период начала года, эксперты спутниковых коммуникаций России собрались на ежегодную конференцию **#SpaceCom Digital Russia 2021** для обсуждения наиболее острых и злободневных вопросов развития рынка в глобальной цифровой трансформации отрасли связи и вещания. Участники конференции подвели итоги трудного для всех отраслей экономики периода пандемии коронавируса и обсудили вынесенные из этого испытания выводы, а также наметили перспективы и возможности для развития проектов и бизнеса в различных областях применения спутниковых коммуникаций.

Мероприятие, организованное TMT Conference совместно с ИАА TelecomDaily и «Телеспутником», прошло в гибридном формате и собрало в общей сложности более 150 участников. Конференцию поддержали компании Триколор, ФГУП «Космическая связь», Hughes Network Systems, Gilat Eurasia, МОКС «Интерспутник» и ИКЦ «Северная корона». Технологическим партнером выступила компания CDNvideo.

В открывающем конференцию Keynote speech акционер АО «Ка-Интернет» Сергей Пехтерев рассказал о том, как отрасль спутниковых коммуникаций преодолела пандемию, и подвел основные итоги года для отрасли. В ходе дальнейшей дискуссии **«Определяя будущее: текущий этап и перспективы рынка спутниковых коммуникаций в РФ»** были затронуты вопросы перспектив встраивания спутниковых технологий в экосистему 5G, практические вопросы использования спутниковых технологий для устранения цифрового неравенства в России и роль спутниковых сервисов в развитии медиаотрасли. Особое внимание участники дискуссии уделили обсуждению новой государственной кон-

цепции развития телерадиовещания на 2020–2025 годы. Как отметил заместитель генерального директора по стратегии и развитию компании Триколор Андрей Нестеров, операторов до сих пор не пригласили к участию в ее разработке. «До недавнего времени для нас, как и для всей отрасли, концепция равнялась слову «призрак». Мы случайно абсолютно в прошлом году узнали о том, что кто-то где-то разрабатывает такой важный документ. Несколько месяцев искали подтверждение этому факту, не могли найти. Потом всеми нами уважаемый господин Волин (Алексей Волин покинул Минцифры в октябре 2020 года, – прим. ред.) подтвердил, что идет разработка некоей концепции развития телерадиовещания. Однако вещатели и самые спутниковые операторы к разработке данной концепции приглашены не были», – рассказал Андрей Нестеров.

Глава представительства и регионального директор Hughes Network Systems в России и СНГ Константин Ланин поделился наблюдениями о том, что всплеск потребления спутникового ШПД частными пользователями в пандемию произошел во всем мире. В России же этот рынок продолжает развиваться не столь быстрыми темпами, как в других странах. Причина этого явления, по оценке Константина Ланина, заключается в крайне низкой, порой демпинговой цене интернет-доступа от российских операторов услуг мобильной связи.

Переходя к обсуждению сроков и способов устранения цифрового неравенства в России, Денис Стафеев, генеральный директор Gilat Eurasia, отметил, что для оператора стоимость строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи в малых населенных пунктах не оправданны коммерчески. Сто жителей никогда не сгенерируют для

оператора дополнительные доходы, это целиком социальный проект. В небольшом поселке на отдаленной территории достаточно установить VSAT и провести Wi-Fi, это можно сделать за несколько дней. А значит, существенно сдвинуть сроки реализации проекта по устранению цифрового неравенства.

Участники дискуссии затронули также назревшую в стране проблему децентрализованного кураторства крупных операторов спутниковых группировок. Так, ФГУП «Космическая связь» – подведомственное предприятие Минцифры РФ, «Газпром Космические системы» является частью крупной госкомпании, «Гонец» находится в ведении Роскосмоса, а «Морсвязьспутник» – Минтранса РФ. Кто же в итоге реально осуществляет государственную политику в области спутниковых коммуникаций – в такой ситуации становится определить все сложнее и сложнее. Представитель Минцифры РФ Дмитрий Бабыкин призвал профессиональное сообщество ориентироваться на Государственную комиссию по радиочастотам (ГКРЧ) – как на коллегиальный орган, регулирующий важнейшие аспекты отрасли. Он добавил, что в Министерстве цифрового развития в настоящее время идет процесс перераспределения полномочий и к апрелю он будет завершен.

Следующая сессия конференции была посвящена практическим аспектам применения спутниковой связи. Генеральный директор АО «ИКЦ «Северная корона» Андрей Гриценко в своем выступлении представил решения в области спутниковой связи для цифровизации Арктики. В настоящее время в Арктике доступны только услуги системы Iridium, сети VSAT на базе спутников на ГСО «Ямал» и морской VSAT на базе спутников на ГСО «Экспресс».

В рамках ФЦП «Сфера» планируется развертывание перспективных спутниковых систем, обеспечивающих полный спектр услуг в области связи, вещания и передачи данных, в том числе в Арктике: персональная связь («Гонец»), подвижный ШПД («Экспресс-РВ»), фиксированный ШПД с повышенной пропускной способностью («Скиф») и интернет вещей («Марафон IoT»). В ближайшей перспективе ожидается начало предоставления услуг со стороны зарубежных перспективных и уже разворачиваемых систем (Starlink, OneWeb и др.). Константин Ланин (Hughes Network Systems) в ходе своего доклада представил мультисервисную спутниковую систему «Юпитер» – наиболее популярную в мире платформу для работы через спутники высокой пропускной способности (HTS). В свою очередь Данила Медведев, директор по техническому развитию бизнеса Gilat Eurasia, поделился успешными кейсами применения мобильных решений Gilat на воздушном, железнодорожном и морском транспорте и для муниципальных служб.

О гибких полезных нагрузках на геостационарных спутниках и ожидаемом эффекте от их применения рассказал Олег Ментус, заместитель директора НТЦ космических систем ФГУП НИИР. Генеральный директор АО «Зонд-Холдинг» Виктор Донианц в рамках своего доклада представил обзор низкоорбитальных и средневысотных систем спутниковой связи в цифрах, фактах и прогнозах, дал оценку стоимости спутникового НГСО ШПД применительно к России, рассказал о текущем статусе и будущих этапах реализации проекта «Скиф». Максим Диордиев, руководитель дирекции применения спутниковых систем АО «Спутниковая система «Гонец» рассказал о роли системы «Гонец» в экосистеме цифровой экономики РФ», орбитальной группировке, наземной инфраструктуре, абонентском оборудовании и цифровых сервисах на базе данной системы. А Владислав Иваненко,



руководитель компании «Спутникс», которая занимается производством и запуском малых космических аппаратов, поведал о результатах работы и планах запуска новых спутников. Например, прорывной проект малой космической универсальной платформы, разработку которого ведут в компании, поддержан НТИ, а полученные наработки в рамках данного проекта, могут быть использованы в проекте «Сфера». В планах «Спутникс» также создание российского спутника с аппаратурой для автоматической идентификации судов (АИС). По результатам его работы возможно развертывание новой группировки таких аппаратов.

Руководитель направления «Спутниковый Интернет» компании Триколор Даниил Нирман в ходе своего доклада развеял миф о том, что услуга спутникового интернета востребована лишь в бизнес-сегменте. По данным компании половина клиентов спутникового интернета Триколора подключают услугу для организации удаленного рабочего места и решения бизнес-задач, 49% – для общения в социальных сетях, порядка 35% – слушают музыку, смотрят фильмы. Также Триколор сформировал портрет среднестатистического пользователя спутникового интернета, опираясь на данные собственной клиентской базы. Им оказалась замужняя женщина (от 35 до 40 лет) с высшим образованием, воспитывающая одного ребенка или двоих детей. Ежемесячный доход такой семьи составляет до 30 тыс. руб. на

человека, также во владении имеет загородная недвижимость.

В завершении конференции участникам было предложено обменяться опытом, обсудить и предложить идеи в ответ на новые вызовы рынка спутниковых коммуникаций в ходе увлекательной сессии #SpaceWorldCafe: «Как добиться космического успеха вместе», а также проявить свои знания в сфере спутниковой связи в рамках интерактивной викторины. Мероприятие состоялось в гибридном (онлайн/оффлайн) формате благодаря технологическому партнеру – компании CDNvideo. Организация такого уровня мероприятия потребовала от технологического партнера решения сразу нескольких масштабных задач: технического сопровождения (режиссер трансляции, звукорежиссер, продюсер и модератор), обеспечения и поддержки онлайн-трансляции группой администраторов CDN и удаленного подключения спикеров.

Организаторы: TMT Conference совместно с «Телеспутником» и TelecomDaily

Генеральный партнер: Триколор

Официальный партнер: ФГУП «Космическая связь»

Ключевой партнер: Gilat Eurasia

Партнеры: Hughes, ИКЦ «Северная корона», МОКС «Интерспутник»

Технический партнер: CDNvideo

TMT Conference

Тел.: +7 (812) 448-11-08

E-mail: conf@tdaily.ru



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-6-17

МАРШРУТИЗАЦИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ТРАНСЦЕНДЕНТНЫЕ ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ ГРАФА И ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

РУДЕНКО**Эдуард Михайлович¹****СЕМИКИНА****Елена Викторовна²****АННОТАЦИЯ**

Рассматривается задача поиска маршрутов беспилотных летательных аппаратов на различных графах реперных точек на местности с использованием генетического алгоритма. Проводится сравнение методов построения целевой функции графа на основе алгебраического, теоретико-числового подхода, а также с использованием трансцендентных функций. Рассмотрение примеров целевых функций, построенных алгебраическими методами с учетом кратности номеров вершин в замкнутом маршруте, показывает, что такой подход приводит для графов большой размерности к ложным маршрутам. Указанный недостаток можно устранить, учитывая индивидуальную информацию о каждом ребре графа. Это обеспечивается кодированием ребер графа слагаемыми или сомножителями некоторой числовой величины в виде ее однозначного разложения. Построение целевой функции опирается при этом на теоретико-числовые свойства s -ического разложения или на разложение целого числа на простые множители. Теоретико-числовые целевые функции однозначно учитывают индивидуальность каждого ребра. Такое кодирование ребер позволяет сформулировать теорему построения целевых функций на графах, основанную на однозначном разложении числовой величины в сумму или произведение. Дальнейшие исследования показывают, что в качестве числовых кодов могут быть использованы не только числа, но и функции, которые более полно отражают информацию об индивидуальных особенностях задачи маршрутизации на графах и тоже обладают свойствами однозначного разложения. Сочетание свойств кода быть числом и функцией приводит к его трансцендентности и возможности применения в построении целевой функции. Проводится апробирование построенных трансцендентных целевых функций на примерах различных графов. Показана взаимосвязь прикладной задачи маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на местности с математической задачей оптимизации на графах средствами теории чисел и генетического алгоритма. Расчеты маршрутов по трансцендентным целевым функциям могут быть применены в автоматизированных системах управления.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., доцент филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Серпухов, Россия, eduard5529@yandex.ru

²преподаватель филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Серпухов, Россия, labinfo_serp@inbox.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маршрутизация; графы; алгебраические целевые функции; теоретико-числовые целевые функции; трансцендентные целевые функции; генетический алгоритм.

Для цитирования: Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 6-17. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-6-17

Введение

В статье рассматривается математический метод построения алгебраических, теоретико-числовых, трансцендентных целевых функций графа для нахождения оптимальных замкнутых маршрутов беспилотных летательных аппаратов, совершающих полет по подобному графу реперных точек на местности. Все целевые функции отражают комбинаторные свойства повторяемости номеров вершин графа в маршрутах, основаны на теоретико-числовых и алгебраических теоремах и предназначены для расчета генетическим алгоритмом.

Алгебраические целевые функции

Планирование маршрутов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является оптимизационной задачей по минимизации расходования бортовых ресурсов, которая напрямую зависит от продолжительности и протяженности полета [1–3]. В самом общем виде маршрут на местности представляет собой граф с вершинами в выделенных целевых точках (реперах)¹. Для расчета маршрута на графе реперов строится целевая функция (ЦФ), которая обладает свойством принимать нулевые значения только на наборах номеров вершин графа, являющимися оптимальными замкнутыми маршрутами [4, 5]. Для построения ЦФ необходимо использовать свойства замкнутости маршрута и частоту повторяемости номеров вершин графа в них. Замкнутые маршруты, проходящие по всем ребрам один раз, существуют только на Эйлеровом графе, который характеризуется четным количеством ребер, сходящихся в каждой его вершине. Оптимальные замкнутые маршруты (ОЗМ) проходят через все ребра графа и содержат их минимальное количество с учетом их кратности. Число ребер, входящих в ОЗМ графа $\mathbf{m} = (e_1, e_2, \dots, e_d)$ определяется формулой

$$d(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho(v_i), \quad (1)$$

где $\rho(v_i)$ — кратность вершины v_i , то есть число ребер, сходящихся (инцидентных) в вершине v_i , n — число вершин графа. Так как каждое ребро графа представляет собой пару вершин (v_i, v_{i+1}) , то маршрут можно записать в виде последовательности вершин $\mathbf{m} = (v_1, v_2, \dots, v_{d+1})$.

Отсюда следует, что все ОЗМ на данном Эйлеровом графе имеют одинаковое число ребер, а, следовательно, и одинаковую частоту повторяемости номеров вершин графа, равную половине кратности вершин. Так, например, для графа с четырьмя вершинами и шестью ребрами **v4e6** — ромб с кратной диагональю (рис. 1) имеем: $\rho(v_1) = \rho(v_3) = 2$, $\rho(v_2) = \rho(v_4) = 4$. Сумма (1) равна шести, что означает, что ОЗМ состоят из шести ребер, вершины с номерами один

и три в маршруте встречаются по одному разу, а вершины два и четыре — по два раза. Так, набор $\mathbf{m} = (1, 2, 4, 2, 3, 4, 1)$ является ОЗМ. Вершина с номером один, стоящая в начале и в конце маршрута, считается за одну, так как «наложив» их друг на друга получаем замкнутый маршрут.

Исходя из этой информации, можно построить первую серию алгебраических (многочленных) функций, зависящих от $d + 1$ переменных: x_1, x_2, \dots, x_{d+1} , которые обнуляются на ОЗМ (2):

$$Z_{1q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \sum_{i=1}^{d+1} x_i^q - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^d \rho(v_i) \cdot v_i^q - v_1^q = 0, \quad (2)$$

где первая вершина v_1 , с которой начинается и заканчивается маршрут, дополнительно вычитается. Показатель q является произвольным натуральным числом. Для графа **v4e6** имеем

$$Z_{1q}(x_1, \dots, x_7) = \sum_{i=1}^7 x_i^q - 2(1^q + 2^q + 4^q) - 3^q = 0. \quad (3)$$

В формуле (3) сумма имеет число слагаемых, равное числу компонент в ОЗМ. Слагаемые в круглой скобке учитывают повторяемость номеров вершин графа в маршруте. Так как ОЗМ начинается и заканчивается в вершине с номером один, то она учитывается дважды.

Если $f(x, y)$ — многочленная разделяющая функция графа, то, кроме формулы (2), существует соотношение (4), также обращающееся в нуль на ОЗМ:

$$Z_{2q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \sum_{i=1}^d f^q(x_i, x_{i+1}) - \sum_{i=1}^d s_i^q = 0, \quad (4)$$

где s_i — элементы разрешенного множества $S = \{s_1, s_2, \dots, s_d\}$ и $s_i = f(v_i, v_{i+1})$ — значение разделяющей функции на ребрах, принадлежащих графу.

Кроме функций (2) и (4) имеем также следующие выражения (5):

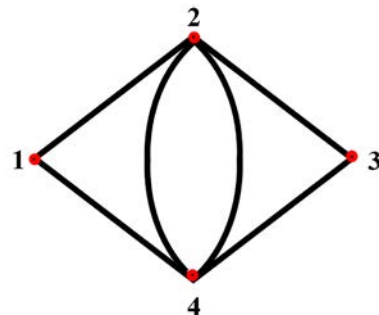


Рис. 1. Граф **v4e6** — ромб с кратной диагональю (2, 4)

¹Омельченко А. В. Теория графов. М.: МЦНМО, 2018. 416 с.

Таблица 1

Полный набор ОЗМ графа **v4e6**

№	ОЗМ
1.	(1, 2, 3, 4, 2, 4, 1)
2.	(1, 2, 4, 2, 3, 4, 1)
3.	(1, 2, 4, 3, 2, 4, 1)
4.	(1, 4, 2, 3, 4, 2, 1)
5.	(1, 4, 2, 4, 3, 2, 1)
6.	(1, 4, 3, 2, 4, 2, 1)

$$Z_{3q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \sum_{i=1}^d x_i^q \cdot x_{i+1}^q - \sum_{i=1}^d v_i^q \cdot v_{i+1}^q = 0;$$

$$Z_{4q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \sum_{i=1}^d (x_i \pm x_{i+1})^q - \sum_{i=1}^d (v_i \pm v_{i+1})^q = 0; \quad (5)$$

$$Z_{5q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \sum_{i=1}^d (x_i^2 + x_{i+1}^2)^q - \sum_{i=1}^d (v_i^2 + v_{i+1}^2)^q = 0.$$

Подобным образом можно построить и другие функции.

Для графа **v4e6** в качестве разделяющей функции можно взять многочлен $f(x, y) = x^2 + y^2$. В состав множества A разрешающих ребер входят: $A = \{(1, 2), (2, 3), (2, 4), (2, 4), (3, 4), (1, 4)\}$, где ребро (2, 4) кратности 2. Множество $S = \{5, 13, 20, 20, 25, 17\}$ и соотношение (4) примет вид:

$$Z_{2q}(x_1, \dots, x_7) = \sum_{i=1}^6 (x_i^2 + x_{i+1}^2)^q - (5^q + 13^q + 2 \cdot 20^q + 25^q + 17^q) = 0. \quad (6)$$

Формулы (2)–(6) относятся к аддитивным функциям. К мультипликативным функциям относится соотношение (7) при различных значениях натурального числа q

$$Z_{6q}(x_1, \dots, x_{d+1}) = \prod_{i=1}^{d+1} x_i^q - \prod_{i=1}^{d+1} v_i^q = 0. \quad (7)$$

Для графа **v4e6** выражение (7) имеет вид

$$Z_{6q}(x_1, \dots, x_7) = \prod_{i=1}^7 x_i^q - (1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4)^q = 0. \quad (8)$$

Все приведенные функции (2)–(8) обнуляются на ОЗМ, но это не гарантирует, что для достаточно больших графов (с большим числом вершин и ребер) система, составленная из уравнений (2), (4), (5) и (7) имеет нулями наборы, являющиеся ОЗМ. Например, набор (1, 2, 4, 3, 4, 2, 1) удовлетворяет уравнению (3), но в него не входят ребра (1, 4) и (2, 3). Аналогично, набор (1, 4, 3, 4, 1, 4, 1) удовлетворяет уравнению (8), но не является ОЗМ, т.е. маршрутом, проходящим по всем ребрам графа **v4e6** (отсутствуют ребра (1, 2), (2, 3) и (2, 4)).

Для расчета маршрутов на графах можно использовать генетический алгоритм (ГА), который в настоящее время имеет множество модификаций [6–12].

Для решения задачи маршрутизации на графах наилучшим образом подходит генетический алгоритм с хромосомами, состоящими из наборов номеров вершин [13, 14].

Использование первого уравнения из (5) достаточно для построения ЦФ графа **v4e6** и получения шести ОЗМ с помощью генетического алгоритма (табл. 1).

ЦФ графа небольшой размерности может быть построена как сумма абсолютных величин выражений (2), (4), (5) и (7):

$$Z(x_1, \dots, x_{d+1}) = Z_{1q_1}(x_1, \dots, x_{d+1}) + \dots + Z_{6q_6}(x_1, \dots, x_{d+1}), \quad (9)$$

где q_1, q_2, \dots, q_6 — произвольные натуральные числа.

Для графа **v8e16** (рис. 2) целевая функция (9), обращается в нуль на наборах (1, 6, 3, 7, 5, 4, 2, 4, 5, 8, 8, 2, 3, 6, 7, 1, 1) и (1, 8, 5, 6, 2, 3, 5, 4, 6, 3, 7, 8, 7, 2, 1, 4, 1), которые не являются ОЗМ, так как выделенные ребра (6, 3) и (5, 6) не входят в данный граф.

Данных о частоте повторяемости номеров вершин графа в ОЗМ в функциях типа (2), (4), (5) и (7), недостаточно для построения маршрутов, так как не используется информация о ребрах графа [15].

Пересечение решений функций (9), согласно теории алгебраической геометрии, определяет алгебраическое многообразие² и ОЗМ для больших графов составляют его собственную часть, состоящую из целочисленных точек, т.е. точек с целыми координатами³. Построение ЦФ с привлечением информации о ребрах графа рассмотрено в следующем разделе построения теоретико-числовых целевых функций.

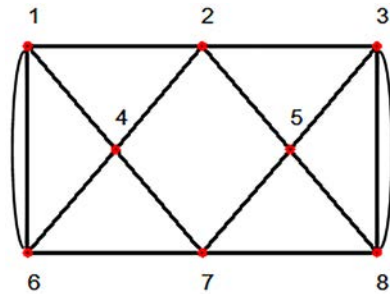


Рис. 2. Граф **v8e16** с 8 вершинами и 16 ребрами

²Шафаревич И.Р. Основы алгебраической геометрии. Москва: МЦНМО, 2007. 539 с.
³Воскресенский В. Е. Бирациональная геометрия линейных алгебраических групп и модули Галуа. Алгебраическая геометрия – 2, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз., 24, М.: ВИНТИ, 2001. С. 5–156.

Теоретико-числовые целевые функции

Учет в целевых функциях графа только информации о вершинах графа при небольшом числе вершин и ребер приводит с помощью генетического алгоритма к нахождению всех оптимальных замкнутых маршрутов. Это относится к графам **v4e8**, **v4e9**, **v4e10** — Эйлеровым моделям графа «семь мостов» **v4e7**, а также к графам «закрытое письмо» — **v5e10** и «открытое письмо» — **v7e10**. В графах большей размерности вершин и ребер отсутствие учета информации о ребрах графа в ЦФ приводит при расчетах ГА к появлению наборов, которые не являются оптимальными замкнутыми маршрутами. Таким графом является, например, граф **v8e16**.

Для построения ЦФ любого Эйлера графа, которая имеет нулями только ОЗМ, необходимо учесть информацию о каждом ребре графа, которая должна быть индивидуальна и не смешиваться с информацией о других ребрах [16]. Для этого можно использовать теорему об однозначном разложении целого или рационального числа в виде произведения или в виде отношения степеней простых чисел (основная теорема арифметики), присвоив каждому ребру графа код в виде простого числа в степени, равной кратности ребра в графе. Тогда каждому ОЗМ будет поставлено одно и то же целое или рациональное число, так как разные ОЗМ отличаются друг от друга только порядком следования ребер графа, а сложение и умножение чисел коммутативно. Например, для графа **v4e6** (см. рис. 1) соответствие между ребрами и степенями простых чисел можно задать с помощью разделяющей функции

$$z = f(x, y) = x^2 + y \quad (10)$$

и интерполяционного многочлена $w = F(z)$. Разделяющий многочлен (10) на ребрах графа равен:

$$\begin{aligned} f(1, 2) &= 12 + 22 = 5; f(1, 4) = 12 + 42 = 17; \\ f(2, 3) &= 22 + 32 = 13; f(2, 4) = 22 + 42 = 20; \\ f(3, 4) &= 32 + 42 = 25; \end{aligned}$$

$$S = \{5, 13, 17, 20, 25\}.$$

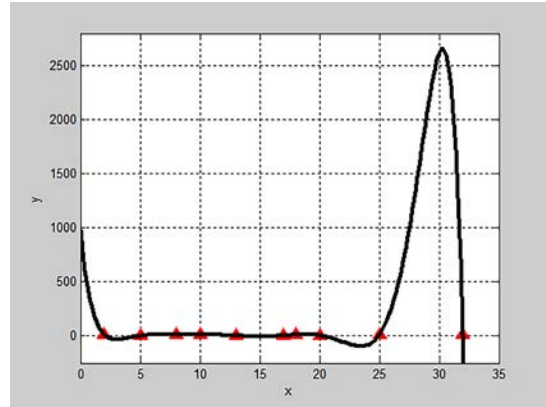
На петлях и на недопустимом ребре (1, 3) разделяющая функция (10) принимает значения:

$$\begin{aligned} f(1, 1) &= 12 + 12 = 2; f(2, 2) = 22 + 22 = 8; \\ f(3, 3) &= 32 + 32 = 18; f(4, 4) = 42 + 42 = 32; \\ f(1, 3) &= 12 + 32 = 10; \end{aligned}$$

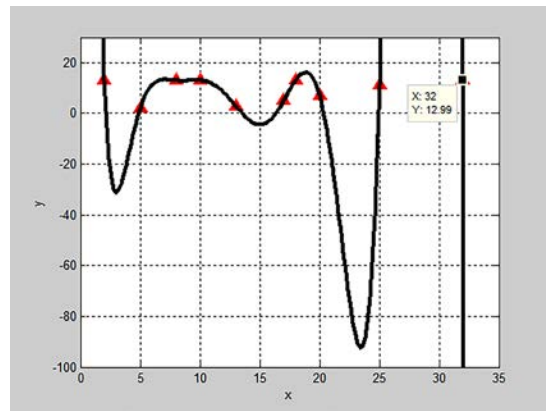
$$P = \{2, 8, 10, 18, 32\};$$

$$S \cap P = \emptyset \text{ — пустое множество.}$$

Интерполяционный многочлен $w = F(z)$ (рис. 3) задается соответствием между $z \in \{2, 5, 8, 10, 13, 17, 18, 20, 25, 32\}$, а $w \in \{13, 2, 13, 13, 3, 5, 13, 7, 11, 13\}$.



а)



б)

Рис. 3. График интерполяционного многочлена 9-й степени $w = F(z)$ в диапазоне изменения:
 а) $-250 < w < 2800$; б) $-100 < w < 30$

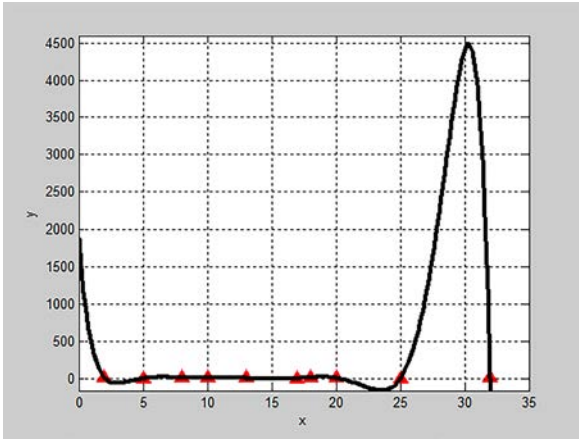
Целевая функция для ОЗМ графа рис. 1 определяется выражением

$$Z(x_1, \dots, x_7) = \prod_{i=1}^6 F(f(x_i, x_{i+1})) - 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 11. \quad (11)$$

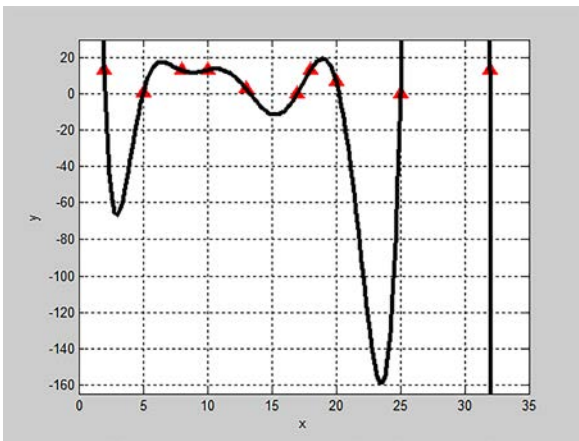
В формуле (11) число 7 стоит во второй степени, так как ребро (2, 4) имеет кратность два и $z = f(2, 4) = 22 + 42 = 20$, $F(20) = 7$. ЦФ в виде (11), основывается на однозначности разложения целого числа по степеням простых чисел и называется целой мультипликативной функцией.

Если использовать теорему об однозначном представлении рационального числа в виде несократимого произведения и отношения различных степеней простых чисел,

то для построения ЦФ необходимо изменить интерполяционный многочлен $w = G(z)$, который задается соответствием $z \in \{5, 13, 17, 20, 25\}$, а $w \in \{2^{-1}, 3, 5^{-1}, 7, 11^{-1}\}$. Все остальные числа из $P = \{2, 8, 10, 18, 32\}$ многочлен $w = G(z)$ отображает в большое число, например, в число 13. На рис. 4 представлен график интерполяционного многочлена в различных диапазонах по высоте. Числа $\{2^{-1}, 3, 5^{-1}, 7, 11^{-1}\}$ являются кодами ребер графа **v4e6**.



а)



б)

Рис. 4. График интерполяционного многочлена 9-й степени $w = G(z)$ в диапазонах изменения:
 а) $-35 < w < 4600$; б) $-165 < w < 30$

Целевая функция в этом случае имеет вид

$$Z(x_1, \dots, x_7) = \prod_{i=1}^6 G(f(x_i, x_{i+1})) - 2^{-1} \cdot 3 \cdot 5^{-1} \cdot 7^2 \cdot 11^{-1}. \quad (12)$$

В такой форме ЦФ (12) называется дробной мультипликативной. Следует отметить, что в качестве кодов ребер

графа могут быть любые взаимно простые числа, например, $2 \cdot 3, 5 \cdot 7, 11 \cdot 13, 17^3, 19 \cdot 23^2$.

Если в основу построения ЦФ положить аддитивные теоремы об однозначном представлении чисел в виде суммы, такие как единственность записи числа в полиномиальной форме по степеням числа s (13):

$$z = a_{-m} \cdot s^{-m} + \dots + a_{-2} \cdot s^{-2} + a_{-1} \cdot s^{-1} + a_0 \cdot s^0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_n \cdot s^n, \quad (13)$$

где s — положительное натуральное число, a_i — целое число удовлетворяющее условию $0 \leq a_i < s$, или теорема об однозначности канонической записи p -адического числа в поле \mathcal{Q}_p в виде конечной суммы ненулевых слагаемых (14)

$$z = p - m(a_0 + a_1 p^1 + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n), \quad (14)$$

где p — простое число, a_i — целое число из диапазона $0 \leq a_i < p, m, n \geq 0$.

Опираясь на единственность представления чисел в виде сумм (13) и (14), получим ЦФ графа **v4e6** в аддитивной форме

$$Z(x_1, \dots, x_7) = \sum_{i=1}^6 H(f(x_i, x_{i+1})) - (s^{-2} + s^{-1} + s^0 + 2 \cdot s^1 + s^2). \quad (15)$$

Здесь коды $s^{-2}, s^{-1}, s^0, s, s^2$ присвоены соответственно ребрам (1, 2), (1, 4), (2, 3), (2, 4) и (3, 4). Код кратного ребра (2, 4) в выражении (15) учитывается дважды и поэтому основание счисления берется $s > 2$. Функция $w = H(z)$ является интерполяционным многочленом, который осуществляет отображение множеств S и P по правилу соответствия между ними: $H: S = \{5, 13, 17, 20, 25\} \rightarrow \{s^{-2}, s^{-1}, s^0, s, s^2\}$. Генетический алгоритм минимизирует значение функции, поэтому многочлен $H(z)$ остальные значения из множества P переводит в число большее, чем s^2 , например, $H: P = \{2, 8, 10, 18, 32\} \rightarrow s^3$, таким образом имеем соответствие $H: \{2, 5, 8, 10, 13, 17, 18, 20, 25, 32\} \rightarrow \{s^3, s^{-2}, s^3, s^3, s^{-1}, s^0, s^3, s^1, s^2, s^3\}$.

Если положить $s = p$ — простое число, то получим p -ическую ЦФ. Хотя поля \mathcal{Q} и \mathcal{Q}_p представляют разные топологические пространства, для генетического алгоритма p -адическая ЦФ совпадает с p -ичной ЦФ.

Беря в качестве элемента a_i из (13) класс вычетов по простому модулю p , мы можем записать каждое p -адическое число в канонической форме с конечным числом ненулевых слагаемых как число в p -ичной системе счисления однозначным образом.

Если веса ребер в виде суммы или произведения однозначно представляют полученную величину, то есть смысл называть их кодами ребер графа.



Способ построения ЦФ для произвольного графа на основе однозначного представления числа в s -ичной системе счисления и p -адического числа в каноническом виде приводят к следующим теоремам.

Теорема 1. Целевая функция оптимальных замкнутых маршрутов Эйлера графа может быть построена на основе теоретико-числовых свойств однозначного представления числа в виде произведения или суммы кодов ребер.

Теорема 2. Целевая функция Эйлера графа является многочленом от нескольких переменных равно произведению или сумме суперпозиций разделяющего многочлена $z = f(x, y)$ и интерполяционного многочлена $w = F(z)$ минус произведение или минус сумма кодов ребер графа. Степень интерполяционного многочлена числу суммы ребер графа плюс число ребер и петель, не принадлежащих графу, которые могут быть сгенерированы ГА, минус один. При этом, кратные ребра считаются за одно. Число произведений или слагаемых равно числу ребер графа. Число переменных в ЦФ равно числу ребер графа плюс один, т.е. $n + 1$.

Алгоритм построения теоретико-числовых ЦФ и теоремы 1 и 2, в основе которых лежит однозначное представление чисел в виде суммы в системе счисления, в канонической форме p -адического числа или в виде произведения и отношения взаимно простых чисел, приводят к выводу о возможности подобного представления функциями от нескольких переменных.

Трансцендентные целевые функции

Метод построения трансцендентных целевых функций графа для нахождения оптимальных замкнутых маршрутов на Эйлеровом графе основывается, согласно теореме 1, на свойствах однозначного представления выражений от трансцендентных чисел в виде суммы или произведения. Трансцендентные целевые функции, в отличие от трансцендентных элементарных функций: e^x , $\log_a x$, $\sin x$, $\cos x$, $\tan x$ и т.д., хотя и принимают трансцендентные значения, но принцип их построения опирается на свойства трансцендентных расширений рациональных \mathcal{Q} или алгебраических \mathcal{K} полей чисел ($\mathcal{Q} \subset \mathcal{K}$). Каждое алгебраическое число из \mathcal{K} является корнем некоторого многочлена с коэффициентами из \mathcal{Q} . Многочлены и дробные рациональные функции от нескольких переменных x_1, x_2, \dots, x_k с коэффициентами в \mathcal{Q} или в \mathcal{K} образуют кольца и поля⁴:

многочлен:

$$f(x_1, \dots, x_k) = \sum_{i_1, \dots, i_k} a_{i_1, i_2, \dots, i_k} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_k^{i_k}, \quad (16)$$

дробная функция:

$$r(x_1, \dots, x_k) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_k)}{g(x_1, x_2, \dots, x_k)} \quad (17)$$

Для многочленов справедливо однозначное представление в виде суммы одночленов и выполняется основная теорема алгебры об однозначном разложении многочленов и рациональных дробей в произведение неприводимых многочленов и рациональных множителей, а для отношения многочленов — теорема об однозначном представлении правильной рациональной дроби в виде суммы простейших дробей [17, 18]. Это говорит о выполнении условий теоремы 1.

Так как ГА работает с хромосомами определенной длины $n \geq 1$, составленными из чисел, то целевые функции являются числовыми функциями от n переменных. Алгебраические ЦФ являются функциями, обнуляющимися на целочисленных наборах номеров вершин графа, и представляют собой многочлены n переменных. Теоретико-числовые ЦФ обнуляются на наборах кодов ребер, которые представляют собой либо суммы s -ических или p -адических чисел, либо произведение положительных и отрицательных степеней простых чисел.

Для того, чтобы многочлены (16) и рациональные дроби (17) с коэффициентами в поле рациональных \mathcal{Q} или алгебраических \mathcal{K} чисел, можно было перевести в числовой формат и сохранить однозначность их разложения, переменным x_1, x_2, \dots, x_k можно присвоить трансцендентные алгебраически независимые значения [19].

Трансцендентные числа по определению не могут быть корнем никакого многочлена с коэффициентами из \mathcal{Q} , т.е. они могут быть приняты за переменные x_1, x_2, \dots, x_k над алгебраическим полем. Трансцендентные вещественные числа — это часть вещественных чисел без алгебраических вещественных чисел: $\mathcal{R} \setminus \mathcal{K}$. Трансцендентные комплексные числа — это комплексные числа \mathcal{C} без алгебраических комплексных чисел: $\mathcal{C} \setminus \mathcal{K}$ ⁵.

Одночлены, неприводимые множители и простейшие дроби с трансцендентными неизвестными могут быть приняты за коды ребер или вершин графов при использовании в построении ЦФ многочленов или рациональных функций. Построенные трансцендентные ЦФ представляют собой многочлены или рациональные функции от нескольких переменных, которые по своей структуре имеют однозначное представление в виде суммы одночленов или однозначно раскладываются в произведение неприводимых сомножителей или рациональных функций в сумму элементарных дробей [20–22]. Они обнуляются на набо-

⁴Шафаревич И. П. Основные понятия алгебры. URSS, 2019. 408 с.

⁵Аргин Э. Теория Галуа: пер. с англ. А. В. Самохина. 2-е изд. стереотипное. М.: МЦНМО, 2008. 66 с.

рах кодов ребер, которые равны значениям одночленов или многочленов нескольких переменных от трансцендентных чисел с коэффициентами из поля рациональных \mathcal{Q} или алгебраических чисел \mathcal{K} .

Структура целевой функции графа, нулями которой являются оптимальные замкнутые маршруты на графе, отражает единственность разложения в произведение или в сумму кодов ребер графа. Исходя из теоремы 1, можно для построения ЦФ использовать однозначность записи многочлена в виде суммы n одночленов,

$$g_{n-1}(z) = a_{n-1} \cdot z^{n-1} + a_{n-2} \cdot z^{n-2} + \dots + a_0, \quad (18)$$

где все коэффициенты $a_i \in \mathcal{Q}$ или \mathcal{K} . В этом случае ребра графа имеют веса-коды, равные слагаемым $g_{n-1}(z)$ из (18), а числовые коэффициенты a_i равны кратности ребра с кодом z^i . Роль неизвестного z может выполнить любое трансцендентное число, которое не может быть корнем никакого многочлена (16) с коэффициентами в поле \mathcal{K} , а, тем более, с рациональными (целыми) коэффициентами. В этом случае ЦФ графа имеет вид

$$Z(x_1, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^n F(f(x_i, x_{i+1}) - g_{n-1}(z)), \quad (19)$$

где $u = f(x, y)$ разделяющая функция, которая ребрам (x, y) графа ставит в соответствие числа из множества S , а парам (x, y) , которые не являются ребрами графа, ставит в соответствие числа из множества P . Множества S и P не пересекаются ($S \cap P = \emptyset$ — пустое множество). Функция $F(u)$ на множестве S принимает трансцендентные значения (20), кроме a_0 :

$$F(S) = \{a_{n-1} \cdot z^{n-1}, a_{n-2} \cdot z^{n-2}, \dots, a_0\}. \quad (20)$$

На множестве P функция $F(u)$ принимает постоянное значение большее, чем на S : $F(P) \gg F(S)$. Для графа **v4e6** (см. рис. 1) трансцендентная ЦФ (19) имеет вид (21):

$$Z(x_1, \dots, x_7) = \sum_{i=1}^6 F(f(x_i, x_{i+1})) - A, \quad (21)$$

где аддитивный код графа **v4e6** $A = z^5 + z^4 + z^3 + 2z^2 + z^1$ состоит из слагаемых соответствующих кодов ребер (1, 2), (1, 4), (2, 3), (2, 4) и (3, 4). Код кратного ребра (2, 4) в ЦФ (21) учитывается дважды и поэтому коэффициент при степени z^2 равен 2. В качестве трансцендентного числа z , согласно теореме А. О. Гельфонда (7-я гипотеза Эйлера-Гильберта), можно взять $z = \log_m k$, где m и k — натуральные числа такие, что $k \neq m^l, l \in \mathcal{Q}^6$.

Для графа **v4e6** подсчет ОЗМ с помощью генетического алгоритма при условиях ‘Generations’, 10, ‘PopulationSize’, 10, ‘StallGenLimit’, 6, ‘Vectorized’, ‘on’ за время 7,75 с можно получить 18 маршрутов, из которых различные между собой приведены в табл. 2.

Таблица 2

Маршруты на графе **v4e6**

№	ОЗМ
1.	1 2 4 2 3 4 1
2.	1 2 4 3 2 4 1
3.	1 4 2 3 4 2 1
4.	1 4 2 4 3 2 1

Если исходить из основной теоремы алгебры об однозначности разложения многочлена в произведение неприводимых множителей, и теоремы 1 о структуре ЦФ, приходим к выводу о возможности кодирования ребер графа неприводимыми многочленами. Простейшими неприводимыми многочленами являются, например, линейные двучлены $z - a_i$, где z трансцендентно, а $a_i \in \mathcal{Q}$ (или \mathcal{K}), $a_i \neq a_j$ при $i \neq j$. В этом случае ЦФ будет мультипликативно-трансцендентной:

$$Z(x_1, \dots, x_{n+1}) = \prod_{i=1}^n F(f(x_i, x_{i+1})) - \prod_{i=1}^n (z - a_i)^{\beta_i}, \quad (22)$$

где β_i — кратность ребра с кодом $z - a_i$.

Минимизирование ЦФ (22) для графа **v4e6** с помощью ГА приводит к нахождению 18-ти ОЗМ за 7,3 с, среди которых различные пять маршрутов (табл. 3).

Таблица 3

Маршруты на графе **v4e6**

№	ОЗМ
1.	1 2 3 4 2 4 1
2.	1 2 4 2 3 4 1
3.	1 2 4 3 2 4 1
4.	1 4 2 3 4 2 1
5.	1 4 2 4 3 2 1

Рассмотрим поле расширения Галуа $\mathcal{Q}(\xi)/\mathcal{Q}$, образованного добавлением к полю рациональных чисел \mathcal{Q} всех комплексных корней многочлена $x^5 - 2 = 0$:

$$\xi_n = \sqrt[5]{2} \cdot \left(\cos \frac{2\pi n}{5} + i \sin \frac{2\pi n}{5} \right), \quad (23)$$

где $n = 0, \dots, 4$. При кодировании в графе **v4e6** (см. рис. 1) ребер комплексными числами (23) с помощью соответствия присвоим код ξ_0 двойному ребру (2, 4), ξ_1 — ребру (1, 2), ξ_2 — ребру (1, 4), ξ_3 — ребру (2, 3) и, наконец, ξ_4 — ребру (3, 4). Всем не принадлежащим ребрам и пет-

⁶Гельфонд А.О. Трансцендентные и алгебраические числа. М.: URSS, 2019. 224 с.

ляма графа, но которые могут быть сгенерированы ГА, при своем число 5. Тогда целевая функция (22) будет иметь вид с мультипликативным кодом M :

$$M = \prod_{i=1}^n (z - a_i)^{\beta_i} = (z^5 - 2) \cdot (z - \sqrt[5]{2}). \quad (24)$$

Число z положим равным трансцендентному числу π ($z = \pi$). Подсчет маршрутов на графе **v4e6** (см. рис. 1) при условиях: ‘Generations’, 16, ‘PopulationSize’, 8, ‘StallGenLimit’, 4, ‘Vectorized’, ‘on’ приводит к подсчету 18 маршрутов, из которых различными являются четыре (табл. 4).

Таблица 4

Маршруты на графе **v4e6**

№	ОЗМ
1.	1 2 4 2 3 4 1
2.	1 2 4 3 2 4 1
3.	1 4 2 4 3 2 1
4.	1 4 3 2 4 2 1

Значения целевой функции приведены на графике рис. 5. Расчет показывает, что график имеет четыре локальных минимума, в которых находятся найденные маршруты.

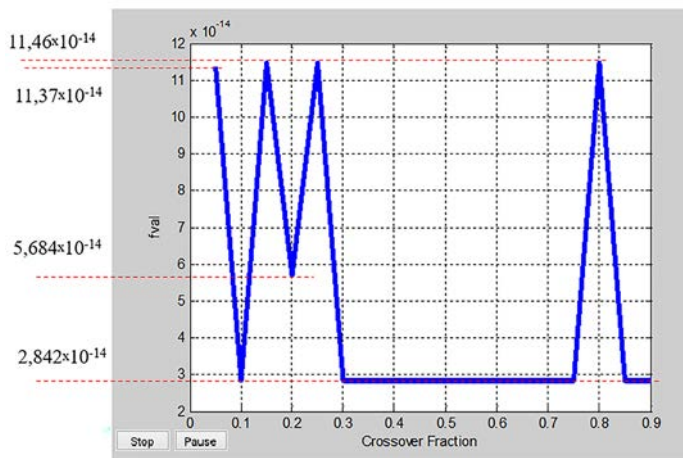


Рис. 5. График сходимости ЦФ (22) с мультипликативным кодом (24)

Как следует из графика на рис. 5, значения ЦФ находятся в малой окрестности нуля. Это объясняется компьютерной неточностью округления значений комплексной ЦФ.

Если исходить из однозначности разложения правильной рациональной дроби в сумму элементарных дробей, то, по теореме 1 о структуре ЦФ, можно использовать для кодирования ребер графа элементарные дроби. Простейшими элементарными рациональными дробями является, например, $1/(z - a_i)$, $a_i \in \mathbb{Q}$, $a_i \neq a_j$ при $i \neq j$.

ЦФ в этом случае будет аддитивно-трансцендентной с кодами в виде простейших рациональных дробей

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^n F(f(x_i, x_{i+1})) - \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{z - a_i}, \quad (25)$$

где β_i — кратность ребра с кодом $1/(z - a_i)$.

Минимизирование аддитивной целевой функции (25) для графа **v4e6** приводит к нахождению 18 оптимальных замкнутых маршрутов за 6,6 с, среди которых различными являются пять (табл. 5).

Таблица 5

Маршруты на графе **v4e6**

№	ОЗМ
1.	1 2 3 4 2 4 1
2.	1 2 4 3 2 4 1
3.	1 4 2 3 4 2 1
4.	1 4 2 4 3 2 1
5.	1 4 3 2 4 2 1

Применение трансцендентных ЦФ для графа **v15e28** большей размерности (рис. 6) приводит к медленной сходимости из-за большой длины ОЗМ, состоящих из 29 номеров вершин, по сравнению с графом **v4e6**.

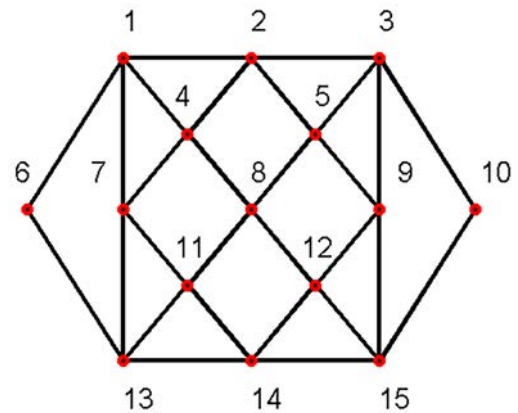


Рис. 6. Граф **v15e28** с 15 вершинами и 28 ребрами

Для ЦФ (21) в качестве аддитивного кода A графа **v15e28** взято трансцендентное число на основе $\pi \approx 3,1415926535897932384626433832795\dots$:

$$A = 0 + \pi^{-9} + \pi^{-8} + \dots + \pi^0 + \pi^1 + \pi^2 + \dots + \pi^{17},$$

которое содержит сумму 28 кодов ребер графа в виде последовательных степеней и нуля ($0 = \pi^{-inf}$). При условиях настройки ГА: ‘Generations’, 160, ‘PopulationSize’, 3000, ‘StallGenLimit’, 280, ‘Vectorized’, ‘on’ найдены маршруты, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Маршруты на графе v15e28

№	Фактор кроссовера	ОЗМ
1.	0,2	[1 4 2 5 3 2 1 7 11 13 14 12 15 9 5 8 11 14 15 10 3 9 12 8 4 7 13 6 1]
2.	0,4	[1 6 13 7 4 8 11 14 15 12 8 5 2 3 5 9 3 10 15 9 12 14 13 11 7 1 4 2 1]
3.	0,6	[1 7 4 2 5 9 3 5 8 4 1 2 3 10 15 14 13 11 14 12 9 15 12 8 11 7 13 6 1]
4.	0,8	[1 6 13 14 11 8 5 3 2 4 1 7 11 13 7 4 8 12 14 15 9 3 10 15 12 9 5 2 1]

Время счета составило 470,5 секунды.

Поиск ГА ОЗМ на графе v18e36 (рис. 7) с помощью аддитивной трансцендентной ЦФ (26)

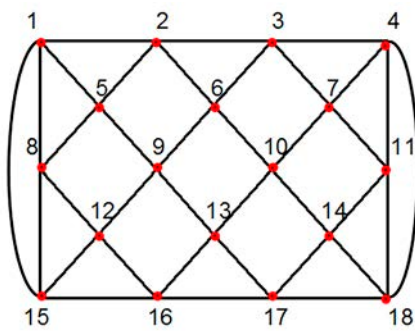


Рис. 7. Граф v18e36 с 18 вершинами и 36 ребрами

$$Z(x_1, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^n F(f(x_i, x_{i+1})) - \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{\log_{10} 2 + a_i}, \quad (26)$$

где a_i — различные рациональные числа, β_i — кратность ребра, $n = 36$.

При моделировании принимались значения: $a_i = 1/(\log_{10} 2 - 0,3 + 2^{i-15})$, $i = 0, \dots, 35$, ‘Generations’, 60, ‘PopulationSize’, 2800, ‘StallGenLimit’, 25, ‘Vectorized’, ‘on’, при которых за время 4124 секунды в цикле изменения фактора кроссовера длиной четыре найден только один ОЗМ

$$\mathbf{m} = [1 \ 15 \ 8 \ 5 \ 9 \ 12 \ 16 \ 13 \ 10 \ 14 \ 11 \ 4 \ 3 \ 2 \ 5 \ 1 \ 2 \ 6 \ 10 \ 7 \ 11 \ 18 \ 14 \ 17 \ 13 \ 9 \ 6 \ 3 \ 7 \ 4 \ 18 \ 17 \ 16 \ 15 \ 12 \ 8 \ 1].$$

Отсюда следует, что при большой размерности графа оперативность расчета ОЗМ генетическим алгоритмом уменьшается, и он может использоваться в предполетной подготовке БПЛА. Трансцендентные целевые функции могут быть использованы для подсчета ОЗМ наравне с другими: алгебраическими и теоретико-числовыми.

Заключение

На данном этапе развития компьютерной техники использование очевидных преимуществ трансцендентных чисел при поиске оптимальных маршрутов, в том числе

с помощью генетического алгоритма, ограничено на графах большой размерности. Это связано, во-первых, с ограничением количества битов, отводимых под мантиссу, а, следовательно, с неизбежным ограничением количества цифр бесконечно большой дробной части у трансцендентного числа при записи в разрядную сетку компьютера. Во-вторых, с тем, что числа в ЭВМ представлены в двоичной системе счисления (СС2), а ввод информации производится в десятичном виде, поэтому при их переводе неизбежны ошибки округления. В-третьих, при представлении числа с требуемой точностью в СС2 под запись мантиссы требуется отвести большее число разрядов, чем при представлении числа в СС10.

Теоретико-числовые и трансцендентные ЦФ графа показывают, что принцип кодирования ребер может быть перенесен на кодирование и вершин графа при решении задач с приоритетом информации о вершинах, например, в задаче о маршрутах на Гамильтоновых графах, на которых существует маршрут, проходящий по всем вершинам один раз.

Трансцендентные ЦФ содержат кодировки ребер графа не числовой, а более насыщенной функциональной информацией, которая может описывать процесс, протекающий при прохождении данного ребра.

Генетический алгоритм, используя кодирование ребер и вершин математическими величинами различной природы (многочленами, рациональными функциями, линейно независимыми функциями, неприводимыми множителями и т.д.), позволяет определять маршруты на графах. При этом должна соблюдаться теорема об однозначности аддитивного или мультипликативного представления выбранной математической величины. Слагаемые целевой функции должны быть (как минимум) линейно независимы, а множители — неприводимы.

Если рассматривать в качестве кодов рациональные функции $r(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)/g(x_1, x_2, \dots, x_k)$, для которых справедливы свойства независимости и неприводимости, то эти функции могут быть использованы как коды ребер (дуг для ориентированных графов) и вершин, так же, как и указатели функционального преобразования информации вдоль ребра или в вершинах [23, 24].

Функциональные ребра и вершины, представляющие собой правильные рациональные функции, наблюдаются

в ориентированных графах, описывающих контуры управления в сложных технических системах с помощью передаточных функций, и могут рассматриваться как прямые коды маршрутов, выбираемые генетическим алгоритмом [25, 26].

В статье рассмотрено обобщение кодирования ребер и вершин графа в метод построения трансцендентных целевых функций. Трансцендентные целевые функции строятся на основании однозначного представления любой математической величины как суммы независимых слагаемых или произведения неприводимых множителей. Дуализм представления кодов ребер и вершин графа в числовой и функциональной форме открывает направление применения их в автоматизированных системах управления для выбора оптимального контура с помощью генетического алгоритма, как маршрута на графе.

Литература

1. Подлипан П.Е., Максимов Н.А. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 1–16. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769> (дата обращения 03.06.2020).
2. Michail O., Spirakis P.G. Traveling salesman problems in temporal graphs // Theoretical Computer Science. 2016. Vol. 634. Pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.04.006>
3. Sabino S., Horta N., Grilo A. Centralized unmanned aerial vehicle mesh network placement scheme: A multi-objective evolutionary algorithm approach // Sensors. 2018. Vol. 18. No. 12. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4387/htm> (дата обращения 03.06.2020).
4. Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85773> (дата обращения 11.05.2020).
5. Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Задача маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на графе реперных точек // I-methods. 2018. Т. 10. № 1. С. 5–18.
6. Руденко Э.М., Аллилуева Н.В., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, алгебраические целевые функции графа и генетический алгоритм // Научно-технический сборник 2019. Часть 1. Серпухов: ФВА РВСН им. П. Великого, 2020. С. 196–200.
7. Jackson W.C., Norgard J.D. A hybrid genetic algorithm with Boltzmann convergence properties // Journal of Optimization Theory and Applications. 2008. Vol. 136. No. 3. Pp. 431–443.
8. Razali N.M., Geraghty J. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP // Proceedings of the World Congress on Engineering. London, U.K. July 6–8. 2011. Vol. 2. Pp. 1–6.
9. Oladele R.O., NIGERIA J.S. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Methods in Solving Multi-Objective Network Design Problem // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 70. No. 12. Pp. 5–9.
10. Karakaya M., Sevinç E. An Efficient Genetic Algorithm for Routing Multiple UAVs under Flight Range and Service Time Window Constraints // International Journal of InformaticsTechnologies. 2017. Vol. 10 Issue 1. Pp. 113–121. DOI: [10.17671/btd.15848](https://doi.org/10.17671/btd.15848)
11. Such F.P., Madhavan V., Conti E., Lehman J., Stanley K.O., Clune J. Deep Neuroevolution: Genetic Algorithms Are a Competitive Alternative for Training Deep Neural Networks for Reinforcement Learning // arXiv.org. 20 Apr 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1712.06567v3.pdf> (дата обращения 24.07.2020).
12. Xin J., Zhong J., Yang F., Cui Y., Sheng J. An Improved Genetic Algorithm for Path-Planning of Unmanned Surface Vehicle // Sensors. 2019. Vol. 19. No. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19112640>
13. Kitjacharoenchai P., Ventresca M., Moshref-javadi M., Lee S., Tanchoco J.M.A., Brunese P.A., Engineering I., Lafayette W., States U. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 129. Pp. 14–30. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.020>
14. Peng K., Du J., Lu F., Sun Q., Dong Y., Zhou P., Hu M. A hybrid genetic algorithm on routing and scheduling for vehicle-assisted multi-drone parcel delivery // Computer Science. IEEE Access. 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8692362> (дата обращения 21.08.2020).
15. Руденко Э.М., Семикина Е.В., Серегин Е.И. Моделирование охранного мониторинга беспилотных летательных аппаратов в программной среде // Научно-технический сборник. Серпухов, 2019. С. 109–117.
16. Смирнов Д.А., Молчанов А.С., Бондарев В.Г., Майгурова Н.И. Методика увеличения дальности получения устойчивого изображения лазерных наземных маяков на фотоматрице бортовой камеры беспилотного летательного аппарата // I-methods. 2020. Т. 12. № 2. С. 1–13.
17. Yu X., Liao X., Li W., Liu X., Tao Z. Logistics automation control based on machine learning algorithm // Cluster Computing. 2019. Vol. 22. Pp. 14003–14011. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-2169-0> (дата обращения 21.08.2020)
18. Franke J. Rational functions and modular forms // Proceedings of the American Mathematical Society. June 30, 2020. Vol. 148. DOI: <https://doi.org/10.1090/proc/15034>. URL: <https://www.ams.org/journals/proc/2020-148-10/S0002-9939-2020-15034-4/home.html> (дата обращения 21.08.2020)
19. Trojovský P. Algebraic numbers as product of powers of transcendental numbers // Symmetry. 2019. Vol. 11. No. 7. URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/11/7/887> (дата обращения 23.08.2020).
20. Cimatti A., Griggio A., Irfan A., Roveri M., Sebastiani R. Incremental Linearization for Satisfiability and Verification Modulo Nonlinear Arithmetic and Transcendental Functions // ACM Transactions on Computational Logic. 2018. No. 19. DOI: <https://doi.org/10.1145/3230639>
21. Cimatti A., Griggio A., Irfan A., Roveri M., Sebastiani R. Satisfiability Modulo Transcendental Functions via Incremental Linearization // International Conference on Automated Deduction. 2017. Pp. 95–113. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-63046-5_7 (date of access 30.06.2020).
22. Wali S.L., Shah W.M. Some applications of Dubinin’s lemma to rational functions with prescribed poles // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2017. Vol. 450. No. 1. Pp. 769–779. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2017.01.069>
23. Волков Д.А. Многокритериальная модель оптимизации вертикального профиля полета среднемагистрального авиалайнера // Сборник трудов 27-й Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам (ICINS). (Санкт-Петербург, 25 мая–05 июня 2020 г.). СПб., 2020. С. 84–87. DOI: [10.23919/ICINS43215](https://doi.org/10.23919/ICINS43215)
24. Khan G.R., Novara C., Haseeb K., Ishtiaq A. A novel algorithm for integrated control model using swarm robots for intruder detection and rescue schedules // Telecommunication Systems. 2019. Vol. 72. Pp. 273–284. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-019-00569-5> (date of access 30.06.2020).
25. Nguyen T., Bui T., Vo B. Multi-Swarm Single-Objective Particle Swarm Optimization to Extract Multiple-Choice Tests // Vietnam Journal of Computer Science. 2019. Vol. 06. No. 02. Pp. 147–161. DOI: <https://doi.org/10.1142/S219688881950009X>
26. Касимов А.М., Мамедли Э.М., Чернявский Л.Т., Короткое А.В., Пустовалов Е.В., Харитонов П.А. Схемно-технические решения построения аппаратуры резервного канала комплекса командных приборов системы управления летательным аппаратом // Датчики и системы. 2005. № 12. С. 2–7.



UNMANNED AIRCRAFT ROUTING, GRAPH TRANSCENDENT TARGET FUNCTIONS AND GENETIC ALGORITHM

EDUARD M. RUDENKO

Serpukhov, Russia, eduard5529@yandex.ru

ELENA V. SEMIKINA

Serpukhov, Russia, labinfo_serp@inbox.ru

KEYWORDS: routing; graphs; algebraic objective functions; number-theoretic objective functions; transcendental target functions; genetic algorithm.

ABSTRACT

The problem of finding routes for unmanned aerial vehicles on various graphs of reference points on the ground using a genetic algorithm is considered. A comparison of methods for constructing graph functions based on the algebraic number-theoretic approach, as well as using transcendental functions, is carried out. Consideration of examples of objective functions constructed by algebraic methods taking into account the multiplicity of the numbers of vertices in a closed route shows that this approach leads to false routes for graphs of large dimension. This drawback can be eliminated by taking into account the individual information about each edge of the graph. This is ensured by encoding the edges of the graph by terms or by some numerical value in the form of its unambiguous expansion. The construction of the objective function is based in this case on the number-theoretic properties of the s -ary expansion or on the decomposition of an integer into prime factors. Number-theoretic objective functions uniquely take into account the individuality of each edge. Such coding of edges defines a theorem for constructing objective functions on graphs, based on the unambiguous expansion of a numerical value in a sum or product. Further studies show that not only numeric values can be used as numeric codes, but also functions that more fully reflect information about the features of routing functions on graphs and have the properties of an unambiguous expansion. The combination of the properties of the device and function leads to its transcendence and the possibility of using it in the construction of target functions. The constructed transcendental objective functions are tested on examples of various graphs. The relationship of the applied problem of routing unmanned aerial vehicles on the ground with mathematical optimization on graphs of means of number theory and a genetic algorithm is shown. Calculations of routes for transcendental objective functions can be applied in automated control systems.

REFERENCES

1. Podlip'yan P. E., Maksimov N. A. Mnogofaznyj algoritm resheniya zadachi planirovaniya poleta gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Multi-phase algorithm for solving the problem of planning the UAV flight]. *Trudy MAI* [Proceedings Moscow Aviation Institute]. 2011. No. 43. Pp. 1-16. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24769> (date of access 03.06.2020). (In Rus)
2. Michail O., Spirakis P.G. Traveling salesman problems in temporal graphs. *Theoretical Computer Science*. 2016. Vol. 634. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.04.006>
3. Sabino S., Horta N., Grilo A. Centralized unmanned aerial vehicle mesh network placement scheme: A multi-objective evolutionary algorithm approach. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 12. <https://doi.org/10.3390/s18124387> URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4387/htm> (date of access 03.06.2020).
4. Allilueva N.V., Rudenko E.M. Matematicheskij metod rascheta celevoj funkcii na grafah i reshenie zadachi marshrutizacii [Mathematical method of calculation of objective function on graphs and solution of routing task]. *Trudy MAI* [Proceedings Moscow Aviation Institute]. 2017. No. 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85773> (date of access 30.06.2020). (In Rus)
5. Allilueva N.V., Rudenko E.M. The routing problem of unmanned aerial vehicles in a graph of reference points, the objective function of the graph and genetic algorithm. *I-methods*. 2018. Vol.10. No. 1. Pp. 5-18. (In Rus)
6. Rudenko Je.M., Allilueva N.V., Semikina E.V. Unmanned aerial vehicle routing, algebraic graph objective functions and genetic algorithm. *Materialy nauchno-tehnicheskogo sbornika* [Materials of the scientific and technical collection]. Serpuhov. Filial VA RVSN im. Petra Velikogo [SRTMA]. 2020. Pp. 196-200. (In Rus)
7. Jackson W.C., Norgard J.D. A hybrid genetic algorithm with Boltz-



- mann convergence properties. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2008. Vol. 136. No. 3. Pp. 431-443.
8. Razali N. M., Geraghty J. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U.K. Jule 6-8. 2011. Vol. 2. Pp. 1-6.
9. Oladele R. O., NIGERIA J. S. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Methods in Solving Multi-Objective Network Design Problem. *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol. 70. No.12. 2013. Pp. 5-9.
10. Karakaya M., Sevinç E. An Efficient Genetic Algorithm for Routing Multiple UAVs under Flight Range and Service Time Window Constraints. *International Journal of Informatics Technologies*. 2017. Vol. 10 Issue 1. Pp. 113-121. DOI: 10.17671/btd.15848 <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/273145>
11. Such F.P., Madhavan V., Conti E., Lehman J., Stanley K. O., Clune J. *Deep Neuroevolution: Genetic Algorithms Are a Competitive Alternative for Training Deep Neural Networks for Reinforcement Learning*. arXiv.org. 20 Apr 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1712.06567v3.pdf>. (date of access 24.07.2020).
12. Xin J., Zhong J., Yang F., Cui Y., Sheng J. An Improved Genetic Algorithm for Path-Planning of Unmanned Surface Vehicle. *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19112640>
13. Kitjacharoenchai P., Ventresca M., Moshref-javadi M., Lee S., Tanchoco J. M. A., Brunese P. A., Engineering I., Lafayette W., States U. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 129. Pp. 14-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.020>
14. Peng K., Du J., Lu F., Sun Q., Dong Y., Zhou P., Hu M. A hybrid genetic algorithm on routing and scheduling for vehicle-assisted multi-drone parcel delivery. *Computer Science. IEEE Access*. 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8692362>. (date of access 21.08.2020).
15. Rudenko E.M., Semikina E.V., Seregin E.I. Modeling security monitoring of unmanned aerial vehicles in a software environment. *Nauchno-tehnicheskij sbornik 2018. Filial VA RVSN im. Petra Velikogo v g. Serpuhove* [Scientific and technical collection 2018. Branch of the SRTMA in Serpukhov]. 2019. Pp. 109 -17. (In Rus)
16. Smirnov D.A., Molchanov A.S., Bondarev V.G., Maygurova N.I. Method for increasing the range of obtaining a sustainable image of laser territorial beacons on the photometry of the on-board camera of the unmanned aircraft. *I-methods*. 2020. Vol. 12. No. 2. Pp.1-13.
17. Yu X., Liao X., Li W., Liu X., Tao Z. Logistics automation control based on machine learning algorithm. *Cluster Computing*. 2019. Vol. 22. Pp. 14003-14011. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-2169-0> (date of access 30.06.2020).
18. Franke J. Rational functions and modular forms. *Proceedings of the American Mathematical Society*. June 30, 2020. Vol. 148. DOI: <https://doi.org/10.1090/proc/15034>. URL: <https://www.ams.org/journals/proc/2020-148-10/S0002-9939-2020-15034-4/home.html>. (date of access 21.08.2020).
19. Trojovský P. Algebraic numbers as product of powers of transcendental numbers. *Symmetry*. 2019. Vol. 11. No. 7. <https://doi.org/10.3390/sym11070887> URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/11/7/887> (date of access 23.08.2020).
20. Cimatti A., Griggio A., Irfan A., Roveri M., Sebastiani R. Incremental Linearization for Satisfiability and Verification Modulo Nonlinear Arithmetic and Transcendental Functions. *ACM Transactions on Computational Logic*. 2018. No. 19. DOI: <https://doi.org/10.1145/3230639>
21. Cimatti A., Griggio A., Irfan A., Roveri M., Sebastiani R. Satisfiability Modulo Transcendental Functions via Incremental Linearization. *International Conference on Automated Deduction*. 2017. Pp. 95-113. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-63046-5_7 (date of access 30.06.2020).
22. Wali S.L., Shah W.M. Some applications of Dubinin's lemma to rational functions with prescribed poles. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. June 2017. Vol. 450. Issue 1. Pp. 769-779. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2017.01.069>
23. Volkov D.A. Multicriteria model for optimizing the vertical flight profile of a medium-range airliner. *27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. St. Petersburg 25-27 May 2020. Pp. 84-87. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133803 (In Rus)
24. Khan G. R., Novara C., Haseeb K., Ishtiaq A. A novel algorithm for integrated control model using swarm robots for intruder detection and rescue schedules. *Telecommunication Systems*. 2019. Vol. 72. Pp. 273-284. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-019-00569-5> (date of access 30.06.2020).
25. Nguyen T., Bui T., Vo B. Multi-Swarm Single-Objective Particle Swarm Optimization to Extract Multiple-Choice Tests. *Vietnam Journal of Computer Science*. 2019. Vol. 06. No. 02. Pp. 147-161. DOI: <https://doi.org/10.1142/S219688881950009X>
26. Kasimov A.M., Mamedli, Chernjavskij L.T., Korotkoe A.V., Pustovalov E.V., Haritonov P.A. Schematic and technical solutions for building the equipment of the reserve channel of the command devices complex of the aircraft control system. *Datchiki i sistemy* [Sensor and systems]. 2005. No.12. Pp. 2-7. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Rudenko E. M., PhD., associate professor at the Department of Mathematics of Peter the Great Strategic Missile Academy (Serpukhov Branch).
 Semikina E.V., lecturer at the Department of Mathematics of Peter the Great Strategic Missile Academy (Serpukhov Branch).



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-18-23

ДВУХЛУЧЕВАЯ МОДЕЛЬ С ДИФFUЗНЫМ ЗАМИРАНИЕМ МОЩНОСТИ СИГНАЛА

САВИЩЕНКО**Николай Васильевич¹****ДЫРИН****Владимир Иванович²****МАКАРЕНКО****Владимир Петрович³****АННОТАЦИЯ**

Одной из основных задач математической теории связи является определение наиболее существенных характеристик системы передачи информации. Одним из важных количественных показателей системы является вероятность ошибочного приема в различных каналах связи. Особый класс каналов связи представляют каналы, в которых рассматриваются замирания сигналов. Для математического описания замираний используется, в частности, плотность распределения вероятностей. Многообразие различных распределений, встречающихся в научной литературе, связано как с предположениями, используемыми для обоснования распределения, так и их соответствию физическим свойствам каналов. В статье рассмотрена двухлучевая модель с диффузным замиранием мощности сигнала (TWDP-модель) и сформулирована математическая постановка задачи расчета помехоустойчивости для канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом и замираниями, описываемыми в рамках данной модели. Показано, что TWDP-модель, используемая для описания замираний, включает в себя не только классические релеевские и райсовские замирания, но и охватывает класс двумодальных распределений, характерных для некоторых современных беспроводных каналов связи. Показано, что при определенных параметрах распределения возникает две моды, появление которых теоретически было возможно при использовании для описания замираний четырехпараметрического распределения. Для решения задачи расчета помехоустойчивости в канале с замираниями необходимо изучение вероятностных характеристик распределения, что требует, в свою очередь, привлечения теории специальных функций и, в частности, гипергеометрических функций. Показано, что математическое представление функции распределения возможно в двух вариантах: интегральное представление и представление через гипергеометрическую функцию Лауричелла. Получены соотношения для начальных моментов рассмотренного в статье распределения. Показано, что начальные моменты выражаются через гипергеометрическую функцию Гаусса. В основе решения задачи помехоустойчивости лежит представление вероятности символьной (битовой) ошибки для многопозиционных сигнальных конструкций в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом через специальную функцию Оуэна, что позволяет получить общее решение задачи. Представлена аналитическая формулировка частичной задачи, решение которой является основой для решения общей задачи расчета помехоустойчивости в канале связи с замираниями, описываемыми TWDP-моделью.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, профессор Военной академии связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, snikaspb@mail.ru

²преподаватель Военной академии связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, dviumet@yandex.ru

³преподаватель Военной академии связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, nsdiv@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: TWDP; замирания; помехоустойчивость; плотность распределения вероятности; многолучевая модель.

Для цитирования: Савищенко Н.В., Дырин В.И., Макаренко В.П. Двухлучевая модель с диффузным замиранием мощности сигнала // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 18-23. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-18-23

Введение

Освоение Арктики предъявляет особые требования к проектируемым образцам техники связи. Созданная для Арктики и функционирующая до 2003 года линия УКВ диапазона на тропосферных станциях, в настоящее время снята с эксплуатации, а существующая система спутниковой связи не удовлетворяет требованиям по пропускной способности и устойчивости.

От выбранной концепции, на этапе исследования и разработки изделия, принятых конструкторских решений, соответствия тактико-техническому заданию (ТТЗ), выбора элементной базы, при выполнении опытно-конструкторской работы (ОКР) будет зависеть гарантируемая надежность связи в полярных районах, с высокой вероятностью возникновения в высоких широтах природных физических явлений (ионосферных и магнитных бурь), нарушающих работу электронных и радиоустройств. Случайный и временный характер изменения уровня принимаемого сигнала при обеспечении радиосвязи ионосферными волнами происходит из-за замираний сигналов. Основной причиной замираний является интерференция двух лучей приходящих к месту приема, фаза которых непрерывно меняется из-за изменения плотности слоев ионосферы.

Многолучевое распространение радиоволн связано с различным числом отражений лучей от ионосферы и от Земли, в точке приема, а так же диффузного отражения волн и двойного лучепреломления из-за магнитного поля Земли.

Для обеспечения достоверности и помехозащищенности информационного сигнала, при реализации, на этапе планирования и разработки процессов, необходимо особое внимание уделить вопросу передачи и приема информации по каналам связи.

Одной из основных задач математической теории связи является определение наиболее существенных характеристик системы передачи информации, к которым, в частности, относятся помехоустойчивость (вероятность ошибочного приема) и скорость передачи информации. Знание этих показателей позволяет определить, соответственно, качество и количество переданной информации. Можно выделить два основных типа каналов связи, для которых чаще всего и определяются вероятности ошибок: детерминированный канал связи с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и канал связи с общими (частотно-неселективными) замираниями и АБГШ.

Для определения вероятности ошибочного приема в канале связи с замираниями требуется решение двух взаимосвязанных задач [1]. Первая задача — вычисление вероятности ошибочного приема сигнальных конструкций в канале связи с детерминированными параметрами и АБГШ. Вторая задача заключается в выборе математической модели общих замираний, адекватной реальным про-

цессам, протекающим в выбранном диапазоне волн. При предположении о гауссовском распределении квадратурных составляющих (гауссовский канал связи), основанном на центральной предельной теореме, приходим к известным законам Релея, Райса, Хойта, Бекманна и наиболее общему в данной модели четырехпараметрическому закону [1]. Другим, часто используемым законом для описания замираний, является m -распределение Накагами [2], частными случаями которого будут одностороннее нормальное распределение ($m=1/2$) и распределение Релея ($m=1$). Все перечисленные выше модели являются унимодальными.

Целый класс новых плотностей распределения вероятностей (ППВ) предложен в [3] и рассмотрен в [4–9]. Физическое обоснование заключается в том, что в многолучевой модели выделяется в общем случае несколько мощных лучей (два луча в [3]) с детерминированными амплитудами и равномерно распределенной фазой, а оставшаяся совокупность менее мощных принятых лучей, в соответствии с центральной предельной теоремой, аппроксимируется как гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Исходя из одной из наиболее важных ситуаций, в которой рассматривается два мощных луча, эта модель называется TWDP (Two-Wave with Diffuse Power). Соответственно, более общую модель, в которой учитывается большее число мощных лучей, будем называть MWDP (Multiple-Wave with Diffuse Power).

Несмотря на то, что в настоящее время релеевские и райсовские замирания остаются наиболее используемой моделью, более современные исследования, проведенные на различных частотах показывают, что в УКВ-диапазоне проявляется бимодальность, которая может быть выражена более обобщенной моделью замираний, такой, как четырехпараметрический закон, но только при определенных сочетаниях параметров. Ряд теоретических исследований показывает, что TWDP-модель более эффективно описывает замирания, что имеет очень важное значение для беспроводных систем.

TWDP-модель может подстраиваться под большое количество условий распространения лучей. Но эта гибкость достигается за счет большей сложности математического аппарата, из-за чего ее плотность распределения вероятности и кумулятивная функция распределения выражаются в интегральной форме либо в виде бесконечных рядов.

Наиболее явно TWDP-замирания выражаются на диапазоне в десятки гигагерц, так как в таком случае даже разница в пути лучей в несколько сантиметров может оказаться критической для канала связи, поэтому значительная часть исследований посвящена именно такому диапазону. Однако в настоящее время большая часть используемых частот лежит в декаметровом диапазоне, т.е. в диапазоне от 300 МГц до 3 ГГц. Соответственно, с точки зрения практического применения, более полезным будет

изучение именно декаметрового диапазона, т.к. полученные результаты могут использоваться для разработок в ближайшем будущем и способствовать улучшению качества связи уже сейчас.

Волны декаметрового диапазона применяются в таких областях, как метеорология, мобильная связь, аналоговое и цифровое телевидение, радиосвязь и радиовещание, GPS, GLONASS, в системах SCADA, военной и гражданской авиации и даже для связи со спутниками NASA и в радиоастрономии.

Математическая модель TWDP замираний

Согласно центральной предельной теореме, распределение большого количества независимых случайных величин (с.в.) сводится к гауссовскому распределению. При использовании TWDP-модели из многолучевой модели выделяются два мощных луча с детерминированной амплитудой и равномерно распределенной фазой, а остальная — совокупность вариаций ослабленного сигнала со сдвинутой на с.в. фазой аппроксимируется, как гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Отсюда математическая модель принимаемого сигнала принимает вид:

$$s(t) = \sum_{k=1}^n V_k \cos(\omega_{0,k}t + \varphi_k) + n(t),$$

где V_k — амплитуды гармонических сигналов; $\omega_{0,k}$ — детерминированные частоты; φ_k — фазы, равномерно распределенные на интервале $[0, 2\pi]$; $n(t)$ — аддитивный гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 .

Известно, что ПРВ амплитуды сигнала $s(t)$ определяется выражением

$$\omega(\mu) = \mu \int_0^{\infty} x J_0(\mu x) \Theta(x) dx,$$

где μ — коэффициент передачи канала связи; $J_0(x)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $\Theta(x)$ — характеристическая функция сигнала $s(t)$ и аддитивного гауссовского случайного процесса.

Для данного случая характеристическая функция в модели MWDP принимает вид:

$$\Theta(x) = e^{-\sigma^2 x^2 / 2} \prod_{k=1}^n J_0(V_k x).$$

Отсюда следует, что для $n=2$ (модель TWDP):

$$\omega(\mu) = \mu \int_0^{\infty} x e^{-\sigma^2 x^2 / 2} J_0(\mu x) J_0(V_1 x) J_0(V_2 x) dx.$$

При $\sigma \neq 0$, получается, что:

$$\omega(\mu) = \frac{\mu}{\sigma^2} \Psi_2^{(n+1)} \left(1; 1, \dots, 1; -\frac{V_1^2}{2\sigma^2}, \dots, -\frac{V_n^2}{2\sigma^2}, -\frac{\mu^2}{2\sigma^2} \right).$$

Тогда для $n = 2$ получается:

$$\omega(\mu) = \frac{\mu}{\sigma^2} \Psi_2^{(3)} \left(1; 1, 1, 1; -\frac{V_1^2}{2\sigma^2}, -\frac{V_2^2}{2\sigma^2}, -\frac{\mu^2}{2\sigma^2} \right),$$

где используется конфлюэнтная гипергеометрическая функция Лауричелла [10]

$$\begin{aligned} \Psi_2^{(n)}(a; c_1, \dots, c_n; z_1, \dots, z_n) &= \\ &= \sum_{k_1, k_2, \dots, k_n=0}^{\infty} \frac{(a)_{k_1+k_2+\dots+k_n}}{(c_1)_{k_1+k_2+\dots+k_n} \dots (c_n)_{k_1+k_2+\dots+k_n}} \frac{z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}}{k_1! \dots k_n!} \end{aligned}$$

где $(a)_k = a(a+1)\dots(a+k-1)$ — символ Похгаммера.

Конфлюэнтная гипергеометрическая функция Лауричелла для получения численного результата должна рассчитываться тройной суммой конечной суммы членов ряда или через использование интегральной формы.

Для удобства вычислений используется метод, основанный на интегральном представлении произведения двух функций Бесселя:

$$J_0(ax) J_0(bx) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} J_0(x\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}) d\theta.$$

В этом случае, получаем, что ПРВ принимает следующий вид:

$$\omega(\mu) = \frac{\mu}{\pi \sigma^2} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2} K} \int_0^{\pi} e^{\Delta K \cos \theta} I_0 \left(\sqrt{2K(1 - \Delta \cos \theta)} \frac{\mu}{\sigma} \right) d\theta,$$

где Δ — коэффициент несоответствия между зеркальными компонентами (величина в диапазоне $[0; 1]$), где при $\Delta=0$ соответствует райсовским замираниям, $\Delta=1$ — наиболее глубоким замираниям с зеркальными компонентами равной амплитуды; $I_0(z)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; K — коэффициент глубины замираний, может изменяться от 0 до ∞ ;

$$K = \frac{V_1^2 + V_2^2}{2\sigma}, \quad \Delta = \frac{2V_1V_2}{V_1^2 + V_2^2}.$$

На рис. 1–4 показано, как ведет себя функция в зависимости от различных сочетаний K и Δ .

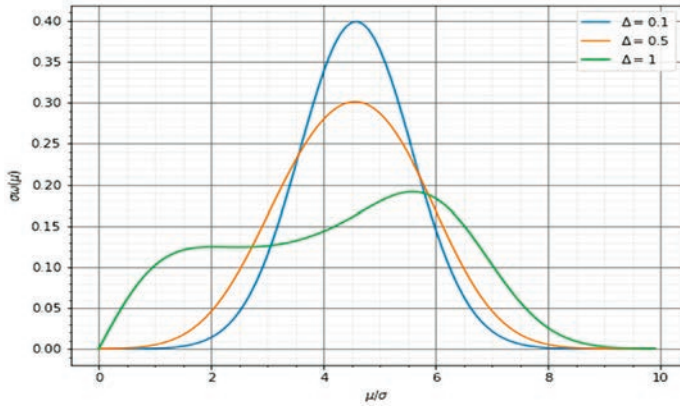


Рис. 1. Плотность распределения вероятности при $K = 10$

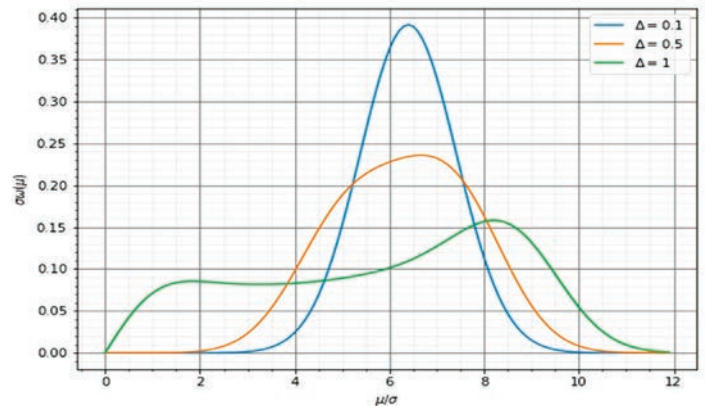


Рис. 2. Плотность распределения вероятности при $K = 20$

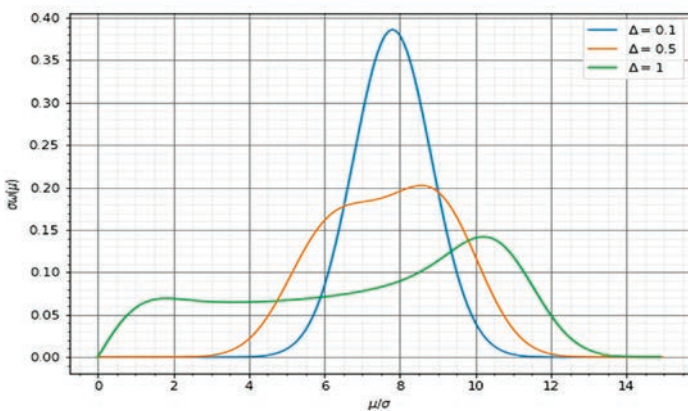


Рис. 3. Плотность распределения вероятности при $K = 30$

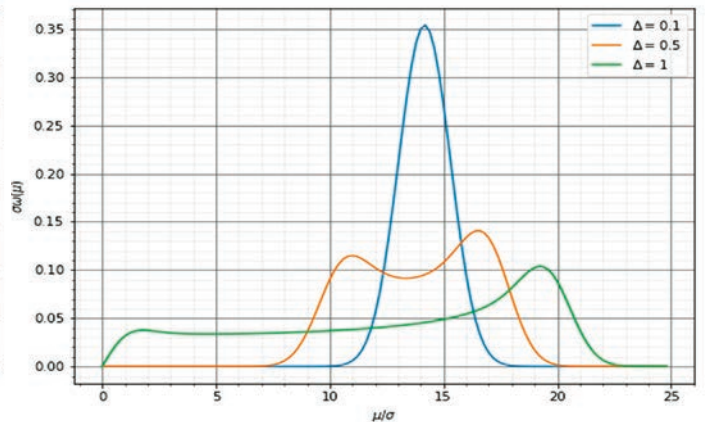


Рис. 4. Плотность распределения вероятности при $K = 100$

При определенных сочетаниях двух параметров K и Δ , а именно при выполнении условия $\Delta K \gg 1$, TWDP-распределение становится бимодальным, т.е. имеющим два максимальных значения — две моды.

Исходя из формулы ПРВ, необходимо определить начальные моменты. Начальным моментом k -го порядка случайной величины называют математическое ожидание от величины в k -ой степени. Для вычисления вероятности ошибки необходим начальный момент второго порядка, т.к. физически начальный момент второго порядка выражает полную среднюю мощность случайной величины.

$$v_k(K, \Delta) \stackrel{\text{def}}{=} E\mu^k = \int_0^\infty \mu^k \omega(\mu) = \int_0^\infty \frac{\mu^{k+1}}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}} \int_0^\pi e^{\Delta K \cos\theta} I_0\left(\sqrt{2K(1-\Delta \cos\theta)} \frac{\mu}{\sigma}\right) d\theta d\mu.$$

После несложных преобразований, получаем, что для четных моментов верно:

$$v_{2l}(K, \Delta) = l!(2\sigma^2)^l \sum_{i=0}^l \binom{l}{i} \frac{[K(\Delta+1)]^i}{i!} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, -i; l; \frac{2\Delta}{\Delta+1}\right),$$

где ${}_2F_1(a; b; c; z)$ — гипергеометрическая функция Гаусса.

Откуда получаем, что начальный момент второго порядка равен:

$$v_2(K, \Delta) = 2\sigma^2(K+1).$$

Формулировка задачи расчет помехоустойчивости

Известно, что вероятность символьной P_e и битовой P_b при когерентном приеме двумерных многопозиционных сигналов в канале с детерминированными параметрами и аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) может быть представлена в виде:

$$P_{e|b}(\gamma_b) = \sum_k a_k T(\sqrt{2g_k \gamma_b}, \eta_k)$$

где $\gamma_b = \frac{E_b}{N_0}$ — отношение энергии сигнала, затрачиваемой на передачу одного бита, к N_0 — односторонней спектральной плотности белого гауссовского шума;

$a_k, g_k \in \mathbb{R}$ — коэффициенты, определяемые сигнальной конструкцией;

$$T(z, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^a \frac{e^{-(1+t^2)z^2/2}}{1+t^2} dt, \quad |\arg a| < \pi$$

— функция Оуэна [1,2].

Вычисление ошибки при общих замираниях сводится к соотношению:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{elb}(\gamma_b) &= \sum_k a_k \int_0^\infty T\left(\mu \sqrt{\frac{2g_k \gamma_b}{\Omega}}, \eta_k\right) \omega(\mu) d\mu = \\ &= \sum_k a_k \int_0^\infty \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{\eta_k} e^{-\frac{1}{2}(1+t^2)\left(\mu \sqrt{\frac{2g_k \gamma_b}{\Omega}}\right)^2} \frac{dt}{1+t^2} \right) \omega(\mu) d\mu, \end{aligned}$$

где $\Omega = \mathbb{E}\mu^2$ — начальный момент второго порядка случайной величины, распределенной по ПРВ $\omega(\mu)$.

Откуда следует, что основная задача при расчете вероятности ошибки в канале связи с TWDP-замираниями заключается в вычислении интеграла:

$$J_\Theta = \int_0^\infty T(a\mu, \eta) \omega(\mu) d\mu,$$

где $a = \sqrt{2g_k \gamma_b / \Omega}$.

Заключение

Для расчетов помехоустойчивости линий радиосвязи используются различные модели каналов с замираниями [1, 3–9, 11, 12], отличные от представленной в статье. Проведенный анализ новой модели замираний сигналов позволил обнаружить некоторые закономерности: бимодальность проявляется при больших значениях K и выполнении условия $\Delta K \gg 1$; при $\Delta=1$ бимодальность начинает проявляться примерно при глубине замираний равной 20 дБ. Сформулирована математическая постановка задачи расчета помехоустойчивости для канала связи с АБГШ и замираниями, описываемыми моделью TWDP.

Литература

1. Савищенко Н.В. Специальные интегральные функции, применяемые в теории связи. СПб.: ВАС; 2012.

2. Brychkov Yu.A., Savischenko N.V. A special function of communication theory // Integral Transforms and Special Functions. 2015. No. 26(6). Pp. 470–484.

3. Durgin G.D., Rappaport T.S., De Wolf D.A. New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications // IEEE Trans. on Commun. 2002. Vol. 50. No. 6. Pp. 1005–1015.

4. Rao M., Lopez-Martinez F.J., Mohamed-Slim A., Goldsmith A.J. MGF Approach to the Analysis of Generalized Two-Ray Fading Models // IEEE Trans. Wirel. Commun. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–14.

5. Dixit D., Sahu P.R. Performance of QAM Signaling over TWDP Fading Channels // IEEE Trans. Wirel. Commun. 2013. Vol. 12. No. 4. Pp. 1794–1799.

6. Romero-Jerez J. M., Lopez-Martinez F. J., Paris J.F., Goldsmith A.J. The Fluctuating Two-Ray Fading Model: Statistical Characterization and Performance Analysis // IEEE Trans. Wirel. Commun. 2017. Vol. 16. No. 7. Pp. 4420–4432.

7. Saberali S.A., Beaulieu N.C. New expressions for TWDP fading statistics // IEEE Wireless Communications Letters. 2013. No. 2(6). Pp. 643–646.

8. Lopez-Fernandez J., Moreno-Pozas L., Martos-Naya E., Lopez-Martinez F.J. Moment-Based Parameter Estimation for the Two-Wave with Diffuse Power Fading Model // Proc. of the 84th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, 18–21 September 2016. Pp. 1–5.

9. Zuchmann E., Caban S., Mecklenbrauker C.F., Pratschner S., Lerch M., Schwarz S., Rupp M. Better than Rician: modelling millimetre wave channels as two-wave with diffuse power // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2019. No.21. Pp. 1–17.

10. Brychkov Yu.A., Marichev O.I., Savischenko N.V. Handbook of Mellin transforms. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2018. 607 p.

11. Савищенко Н.В., Остроумов О.А. Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса-Накагами // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6(79). С. 71–80.

12. Лебеда Е.В., Остроумов М.А., Остроумов О.А. Вероятность ошибки в канале с замираниями и разнесенным приемом многопозиционных сигналов // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3 № 1. С. 75–79.

DETECTION TWO-WAVE WITH DIFFUSE POWER FADING

NIKOLAI V. SAVISCHENKO

St. Petersburg, Russia, snikaspb@mail.ru

VLADIMIR I. DYRIN

St. Petersburg, Russia, dviuemet@yandex.ru

VLADIMIR P. MAKARENKO

St. Petersburg, Russia, nsdiv@mail.ru

KEYWORDS: TWDP; fading; noise immunity; probability distribution density; multipath model.

ABSTRACT

One of the main objectives of the mathematical theory of communication is definition of the most essential characteristics of system of information transfer. One of important quantitative indices of system



is the probability of erroneous reception in various communication channels. The special class of communication channels is represented by channels in which a dying down of signals is considered. For the mathematical description of a dying down the density of distribution of probabilities is used, in particular. The variety of the various distributions meeting in scientific literature, is connected as with the assumptions used for justification of distribution, and to their compliance to physical properties of channels. In article the dual-beam model with a diffuzny dying down of capacity of a signal (TWDP model) is considered and mathematical statement of a problem of calculation of a noise stability for a communication channel with additive white Gaussian noise and a dying down described within this model is formulated. It is shown that the TWDP model used for the description of a dying down, includes not only a classical releevsky and raysovsky dying down, but also covers a class of two-modal distributions, characteristic for some modern wireless communication channels. It is shown that at certain parameters of distribution there are two fashions which emergence was theoretically possible when using for the description of a dying down of four-parametrical distribution. For the solution of a problem of calculation of a noise stability in the channel with a dying down studying of likelihood characteristics of distribution that demands, in turn, attraction of the theory of special functions and, in particular, hyper geometrical functions is necessary. It is shown that mathematical representation of function of distribution is possible in two options: integrated representation and representation through Laurichell's hyper geometrical function. Ratios for the initial moments of the distribution considered in article are received. It is shown that the initial moments are expressed through Gauss's hyper geometrical function. At the heart of the solution of a problem of a noise stability representation of probability of a symbolical (bit) mistake for multiitem alarm designs in a communication channel with additive white Gaussian noise through Owen's special function that allows to receive the common decision of a task lies. The analytical formulation of the partial task which decision is a basis for the solution of the general problem of calculation of a noise stability in a communication channel with a dying down described by TWDP model is presented.

REFERENCES

1. Savischenko N.V. *Special Integral Functions Used in Wireless Communications Theory*. Singapore: World Scientific, 2014.
2. Brychkov Yu.A., Savischenko N.V. A special function of communication theory. *Integral Transforms and Special Functions*. 2015. No. 26(6). Pp. 470-484.
3. Durgin G.D., Rappaport T.S., De Wolf D.A. New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications. *IEEE Trans. on Commun.* 2002. Vol. 50. No. 6. Pp. 1005-1015.
4. Rao M., Lopez-Martinez F. J., Mohamed-Slim A., Goldsmith A.J. MGF Approach to the Analysis of Generalized Two-Ray Fading Models. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2015. Vol. 2015. Pp. 1-1.
5. Dixit D., Sahu P.R. Performance of QAM Signaling over TWDP Fading Channels. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2013. Vol. 12. No. 4. Pp. 1794-1799.
6. Romero-Jerez J. M., Lopez-Martinez F. J., Paris J.F., Goldsmith A.J. The Fluctuating Two-Ray Fading Model: Statistical Characterization and Performance Analysis. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2017. Vol. 16. No. 7. Pp. 4420-4432.
7. Saberali S.A., Beaulieu N.C. New expressions for TWDP fading statistics. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2013. No. 2(6). Pp. 643-646.
8. Lopez-Fernandez J., Moreno-Pozas L., Martos-Naya E., Lopez-Martinez F.J. Moment-Based Parameter Estimation for the Two-Wave with Diffuse Power Fading Model. *Proc. of the 84th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Montreal, 18-21 September 2016. Pp. 1-5.
9. Zuchmann E., Caban S., Mecklenbrauker C.F., Pratschner S., Lerch M., Schwarz S., Rupp M. Better than Rician: modelling millimetre wave channels as two-wave with diffuse power. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019. No. 21. Pp. 1-17.
10. Brychkov Yu.A., Marichev O.I., Savischenko N.V. *Handbook of Mellin transforms*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2018. 607 p.
11. Savischenko N.V., Ostroumov O.A. Calculation of Optimal and Reasonable Number of Diversity Branches in Communication Channels with Additive White Gaussian Noise and Common Rice – Nakagami Fading. *Information and Control Systems*. 2015. No. 6(79). Pp. 71-80.
12. Lebeda E., Ostroumov M., Ostroumov O. The error probability in the channel with fading and diversity reception at the multipositioned signals reception. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017. Vol. 3. No. 1. Pp. 75-79.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Savischenko N.V., PhD, Professor Full, Professor of S. M. Budenny Military Academy of Communication;
Dyrin V.I., lecturer of S. M. Budenny Military Academy of Communication;
Makarenko V.P., lecturer of S. M. Budenny Military Academy of Communication.



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-24-35

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ВОЛКОВ**Денис Владимирович¹****САЕНКО****Игорь Борисович²****ШАКУРОВ****Радик Шамилевич³****УЛАНОВ****Андрей Вячеславович⁴**

АННОТАЦИЯ

Для исследования сложно организованных систем, к которым относятся системы связи, используется как аналитическое, так и имитационное моделирование. В последнее время широкое распространение получает имитационное моделирование, которое становится одним из наиболее мощных инструментов анализа и синтеза, используемым специалистами при исследовании и проектировании сложных систем. Однако традиционное имитационное моделирование, как правило, имеет ряд трудностей, которые являются следствием попытки представить процессы в реальных системах с большей детализацией. При этом в настоящее время в моделировании наблюдается тенденция к повышению точности и адекватности создаваемых моделей. Ответом на это требование служит возникновение агентного имитационного моделирования. В работе преследуется цель показать возможность и целесообразность применения этого достаточно нового направления моделирования для исследования **системы связи специального назначения (СС СН). Системы связи специального назначения** как объект моделирования представляет собой достаточно сложную систему, характеризующуюся многими параметрами, причем попытка улучшения одних характеристик может приводить и зачастую приводит к ухудшению других характеристик этой системы. В статье рассматривается построение модели технического обеспечения **системы связи специального назначения** на базе агентного подхода. Предлагаемый подход к построению такого рода модели, в отличие от известных подходов к построению имитационных моделей, позволяет исследовать систему «снизу-вверх». Разработанная модель предоставляет возможность оценивать качество функционирования **системы связи специального назначения** с учетом показателей функционирования ее элементов, представленных в виде отдельных взаимодействующих агентов, а также множества случайных факторов. Рассматриваются вопросы применения агентного подхода к моделированию технического обеспечения системы связи специального назначения. Сформулированы постановки задач анализа и синтеза **системы связи специального назначения**. Обсуждаются состав компонентов и структура агентной модели. Демонстрируются аспекты реализации агентной модели в инструментальной среде AnyLogic и возможности проведения экспериментов с использованием этой модели. Показано, что агентная модель технического обеспечения **системы связи специального назначения** является универсальной для систем, реализующих аналогичные функции, позволяет имитировать, задавать и изменять множество характеристик сети в широком диапазоне, а также определять коэффициент технической готовности этой системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: имитационное моделирование, агентная модель, техническое обеспечение, система связи, коэффициент технической готовности.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., заместитель начальника отдела 16 Центрального научно-исследовательского испытательного ордена Красной Звезды института Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И.Белова, г. Мытищи, Россия, denmarath@mail.ru

²д.т.н., профессор, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, ibsaen@mail.ru

³к.т.н., заместитель начальника 16 Центрального научно-исследовательского испытательного ордена Красной Звезды института Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И.Белова, г. Мытищи, Россия, kolobrodov75@mail.ru

⁴к.т.н., начальник управления 16 Центрального научно-исследовательского испытательного ордена Красной Звезды института Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А.И.Белова, г. Мытищи, Россия, ulanov_a_v@mail.ru

Для цитирования: Волков Д.В., Саенко И.Б., Шакуров Р.Ш., Уланов А. В. К вопросу построения агентной модели технического обеспечения системы связи специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 24-35. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-24-35



Введение

Имитационное моделирование является одним из мощных инструментов для анализа и синтеза, который используют специалисты при исследовании и проектировании сложных систем.

Общеизвестно, что правильно поставленный натурный эксперимент, т.е. исследование свойств объекта на самом объекте, максимально информативен. Оказывается, что эксперимент с компьютерной имитационной моделью вполне конкурентоспособен с натурным экспериментом. Не говоря о том, что натурный эксперимент в ряде случаев вообще невозможен или нецелесообразен, эксперимент с имитационной моделью может быть приемлемо информативным и выполнен значительно быстрее и дешевле натурального [1].

Имитационное моделирование предполагает представление модели в виде некоторого алгоритма — компьютерной программы, — выполнение которого имитирует последовательность смены состояний в системе и таким образом представляет собой поведение моделируемой системы. Имитационная модель реализует временную диаграмму функционирования моделируемой системы. Имитационные модели достаточно просто учитывают влияние случайных факторов. Для аналитических моделей это серьезная проблема [2, 3]. При наличии случайных факторов в имитационной модели необходимые характеристики моделируемых процессов получают многократными реализациями и дальнейшей статистической обработкой накопленной информации.

Процесс функционирования сложных технических систем, таких как система связи специального назначения (СС СН), оценивается с помощью ряда характеристик, каждая из которых должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к системе связи специального назначения, представляя собой величину, зависящую от процесса функционирования системы, давая наглядное представление об одном из свойств системы.

При этом функциональные характеристики системы связи специального назначения должны отражать определенные их свойства, целевые требования, удовлетворять граничным требованиям, а также измеряться качественными характеристиками и количественными показателями. Совокупность основных функциональных характеристик определяет качество функционирования системы связи специального назначения. Влияя определенным образом на характеристики СС СН, можно добиться соответствия системы предъявляемым к ней требованиям.

Поэтому для определения показателей оценки качества функционирования следует использовать имитационное моделирование вследствие недостаточной эффективности аналитического метода. Поскольку все процессы должны исследоваться в динамике, то необходимо разработать агентную модель технического обеспечения СС СН [4–6].

Формализованное описание модели

Агентное моделирование — это новый подход к моделированию систем, содержащих автономных и взаимодействующих агентов. В основе агентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или элемент искусственного интеллекта.

Агентная модель технического обеспечения системы связи создаётся для оценки в течении заданного времени функционирования математического ожидания ее коэффициента технической готовности.

Агентная модель разрабатывается как множество объектов (пунктов управлений). Объекты могут быть использованы в других объектах (то есть, поддерживается иерархия произвольной глубины), при этом есть объект верхнего уровня. Это означает, что конкретно для каждого пункта управления агентом верхнего уровня будет являться геоинформационное пространство, а агентами нижнего уровня специальные машины с их обслуживающим персоналом, каждый из которых имеет определенный интерфейс (порты входа и выхода заявок, параметры, функции и переменные) [7, 8].

Возможно построение произвольного количества экземпляров того же объекта, но только с различными параметрами и функциями в разных частях модели.

Надежность системы связи характеризуется надежностью передачи сообщений между должностными лицами. Надежность типовых физических каналов и трактов оценивается по единым показателям: состояниями готовности и неготовности (сбоя или отказа).

Для оценки возможных состояний системы связи в настоящее время применяется следующий показатель — коэффициент технической готовности (КТГ).

Агентная модель технического обеспечения СС СН предназначена для оценки математического ожидания коэффициента технической готовности каждого узла системы связи, а также коэффициента технической готовности системы связи в целом, и оптимального количества транспорта для доставки материальных средств, и специалистов [9, 10].

Для решения данной задачи необходимо последовательно выполнить следующие действия:

- определить типовой и количественный состав согласно постановке задачи;
- задаться местоположениями пунктов управления согласно обстановке, маршрутами до всех пунктов управления;
- описать процесс оформления заявки на обслуживание, заказа запчастей и т.п.;

Ограничения и допущения:

- среднесуточные потери определяются установленными нормативами;

- поток эксплуатационных отказов в течении суток простейший;
- время восстановления является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону;
- каждый пункт управления отправляет запрос одинаковой формы на обслуживание, ремонт и т.п.;

Разработка модели-агента

«Узел связи (Пункт управления)»

Узлы связи характеризуются тремя состояниями:

- готовность — состояние, при котором сохраняется способность физического канала к передаче сообщений между абонентами.
- сбой — кратковременное нарушение готовности, при котором может произойти отказ в предоставлении физического канала должностному лицу.
- отказ — нарушение готовности, при котором требуется вмешательство обслуживающего персонала для ее восстановления.

Для каждого узла связи задаются свои состояния. Состояния узла: готовность (работает) и сбой (ожидание технического обслуживания). Когда узел связи находится в состоянии отказа (выход из строя), отправляется запрос на обслуживание авиатранспортом (вертолетом). Когда подходит время планового обслуживания, отправляется запрос на авто транспорт (автомобиль) [11–13].

Переход из состояния готовности в состояние отказа происходит с заданной интенсивностью:

$$I_{отк} = 1/t_{срврнотк} \tag{1}$$

где $I_{отк}$ — интенсивность выхода из строя $t_{срврнотк}$ — среднее время выхода из строя.

Переход из состояния в состояние отказа (выхода из строя) является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Переход обратно происходит при получении сообщения «исправлено». Работающий узел может получать сообщение «запланировано». Это означает, что ему требуется плановое техническое обслуживание. И тогда узел меняет состояние готовность на состояние сбой. Когда узел связи получает сообщение «исправлено», то узел снова может вернуться в рабочее состояние. Переход из состояния сбоя в состояние отказа осуществляется с заданной интенсивностью $I_{отк}$. Данная $I_{отк}$ является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Согласно установленным нормативов по плановому техническому обслуживанию добавим событие плановое техническое обслуживание $S_{планто}$, которое будет запускаться циклически, и оно будет запускать переход из состояния готовности в состояние отказа, т.е. из состояния работ в состояние технического обслуживания. Данные переходы представлены на рис. 1.



Рис. 1. Диаграмма состояний агента «Узел связи»

Разработка моделей-агентов «Транспорт»

Для использования двух видов транспорта необходимо создать две модели агентов: «Вертолёт» и «Автомобиль». Созданные агенты унаследуют конфигурацию агента «Транспорт». Поэтому их состояния и действия будут идентичными.

Диаграмма первоначального размещения агентов «Вертолёт» и «Автомобиль» согласно обстановке представлена на рис. 2.

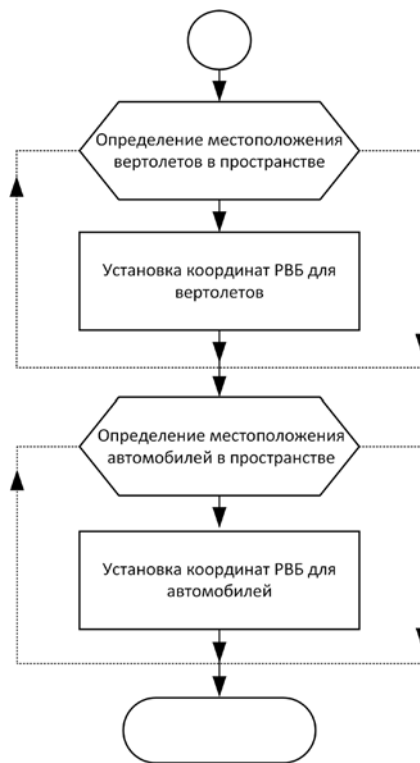


Рис. 2. Диаграмма размещения агентов «Вертолёт» и «Автомобиль»

Согласно рис. 2, транспорту заданы координаты «РВБ», значит, транспорт находится в «РВБ». Эти координаты

наты можно изменять согласно обстановке.

Транспорт находится в четырех состояниях:

- 1) находится в РВБ (или на станции технического обслуживания, СТО);
- 2) движется к «РВБ» (СТО);
- 3) находится на «пункте управления»;
- 4) движется на «пункт управления».

Переход из состояния 1 в состояние 2 происходит при получении сообщения «запрос технического обслуживания». Это действие осуществляется безусловно, и транспорт движется в точку координат пункта управления.

Переход из состояния 3 в состояние 4 происходит по прибытию транспорта на пункт управления. Специалисты, прибывшие на пункт управления, начинают выполнять свою задачу сразу. По завершению обслуживания транспортное средство с прибывшими специалистами может отправляться обратно в «РВБ (СТО)». Логика движения транспорта, то есть его действий, настраивается с помощью переходов различных типов. Диаграмма состояний агентов «Вертолёт» и «Автомобиль» представлена на рис. 3.

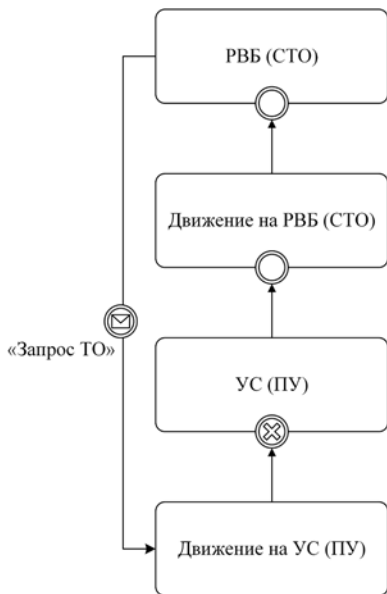


Рис. 3. Диаграмма состояний агентов «Вертолёт» и «Автомобиль»

Разработка модели-агента «РВБ (СТО)»

Действия агента «РВБ (СТО)» заключаются в определении типа транспорта, который нужно отправить на проведение технического обслуживания, то есть автомобиль или вертолет, а также наличие свободного транспорта в «РВБ (СТО)». Диаграмма действий представлена на рис. 4.

Действия агента «РВБ (СТО)» выполняются по запросам, поступающим с пунктов управлений. Когда с пункта управления отправляется запрос на обслуживание,

агент «РВБ (СТО)» должен отправлять соответствующий тип транспорта со специалистами.

Выход из строя узла связи во время проведения технического обслуживания является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Время ремонта узла рассчитывается:

$$t_{\text{рем уз}} = \exp(1/t_{\text{сррем уз}}), \quad (2)$$

где $t_{\text{сррем уз}}$ — среднее время ремонта узла.

Коэффициент технической готовности узла $K_{\text{туз}}$ рассчитывается:

$$K_{\text{туз}} = 1 - t_{\text{сумрем уз}} / t_{\text{мод}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{сумрем уз}}$ — суммарное время ремонта узла; $t_{\text{мод}}$ — время моделирования.

Полученные КТГ узлов используются для определения среднего значения, то есть математического ожидания КТГ системы связи. Для этого задается функция сбора статистики у популяции агентов «Узел связи (ПУ)». КТГ узла связи можно рассчитать и по времени его нахождения в исправном состоянии. Итак, в результате действий децентрализованных агентов «Узел связи (ПУ)» определяется КТГ системы связи.

Поведение транспорта в модели одинаковое, поэтому нет необходимости разделять их, чтобы рассчитать коэффициент использования. Для расчета использования транспортного средства необходимо учитывать время движения из РВБ и возвращения обратно в РВБ.

Коэффициент использования транспортного средства $K_{\text{испте}}$ рассчитывается:

$$K_{\text{испте}} = t_{\text{испте}} / t_{\text{мод}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{испте}}$ — суммарное время использования транспортного средства.



Рис. 4. Диаграмма действий агента «РВБ»

**Реализация агентной модели
технического обеспечения системы связи
специального назначения**

В программной реализации агентной модели технического обеспечения СС СН появляется рабочее пространство среды разработки имитационных моделей. Необходимо нанести обстановку на карту местности. Для этого из панели Проекты переносятся модели-агенты на наборное поле (рис. 5).

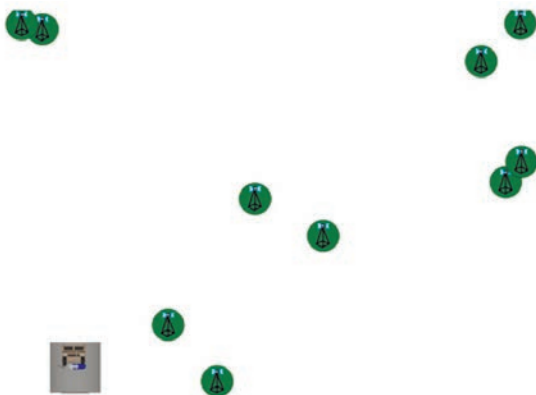


Рис. 5. Вариант размещения моделей-агентов

В качестве исходных данных в модели предусмотрен ввод следующих параметров:

- количество вертолетов для периодического технического обслуживания и ремонта вышедших из строя ПУ(УС);
- количество автомобилей для периодического технического обслуживания и ремонта вышедших из строя ПУ(УС);
- периодичность проведения периодического технического обслуживания и ремонта вышедших из строя ПУ(УС);
- скорость движения автомобиля, участвующего в ПТО и ремонте вышедших из строя узлов связи;
- время проведения ПТО и ремонта;
- время выхода из строя узла связи;
- скорость полёта вертолёта, участвующего в ПТО и ремонте вышедших из строя узлов связи;
- время ремонта вышедшего из строя узла связи.

В разработанной модели можно использовать два типа транспорта: автомобили и вертолёты. Диаграмма действий для моделирования транспорта в разработанной агентной модели технического обеспечения СС СН представлена на рис. 6.

Тип транспорта, который нужно отправить для проведения периодического обслуживания и ремонта, то есть автомобиль или вертолёт, а также определение на-

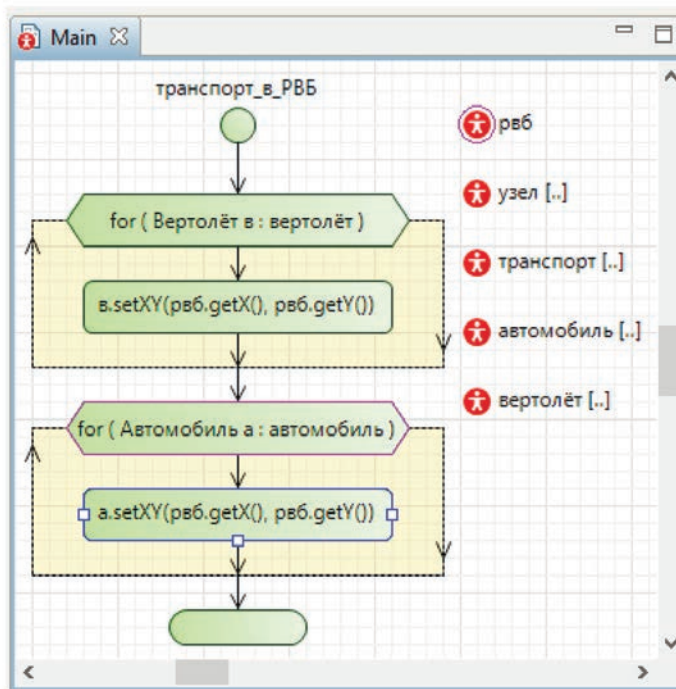


Рис. 6. Диаграмма действий транспорта

личия свободного транспорта осуществляется ремонтно-восстановительной базой (РВБ).

Действия РВБ выполняются по запросам, поступающим с узлов связи. Действия РВБ описываются с помощью диаграммы действий, представленной на рис. 7.

Как было отмечено, при построении моделей-агентов

«ПУ (УС)», они могут находиться в разных состояниях.

Переход из состояния «работает» («готовность») в состояние «выход из строя» («отказ») происходит с заданной интенсивностью, которая равняется $1/t_{cp}$, где t_{cp} – среднее время наработки на отказ. Диаграмма состояний узла связи представлена на рис. 8.

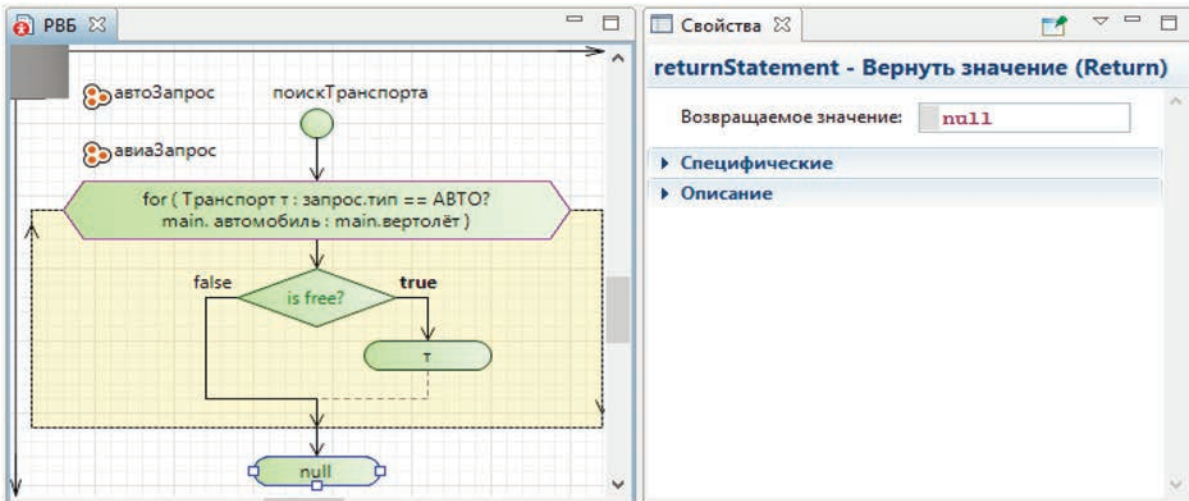


Рис. 7. Диаграмма действий РВБ

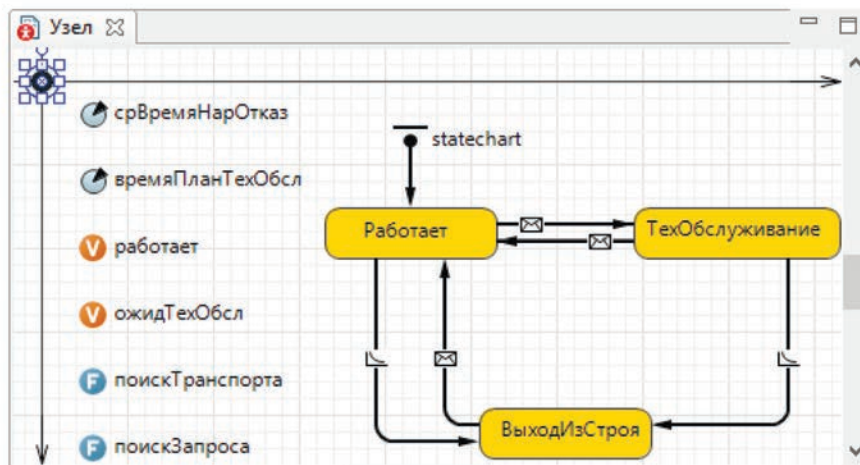


Рис. 8. Диаграмма состояний узла связи

Для определения КТГ узлов связи необходимо внести дополнения в диаграмму агента Узел (рис. 9). Для этого необходимо создать элемент «Параметр» и дать ему

имя, например, «врМод».

Так как «ПУ (УС)» будут выходить из строя, то необходимо добавить код в поле «Действие» (рис. 10).

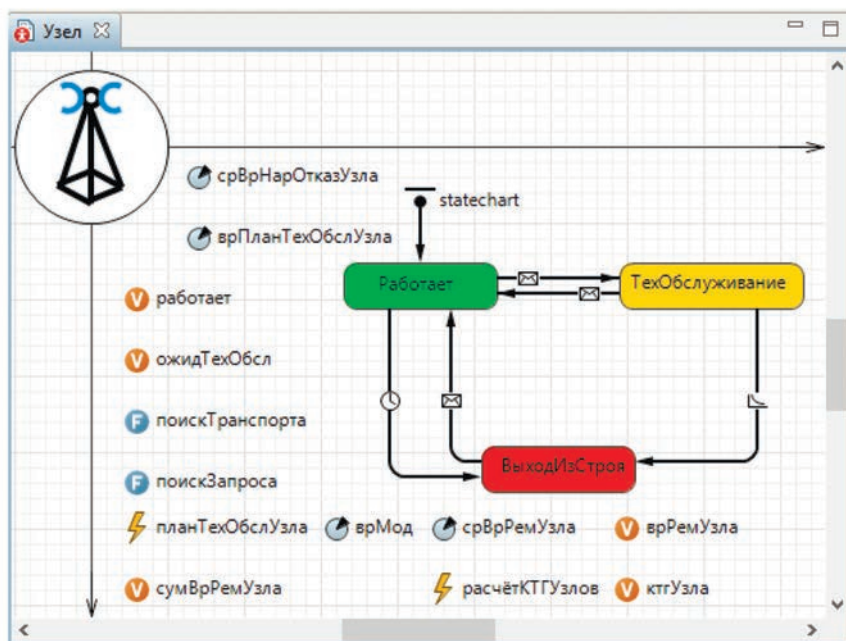


Рис. 9. Элементы для определения КТГ узлов связи

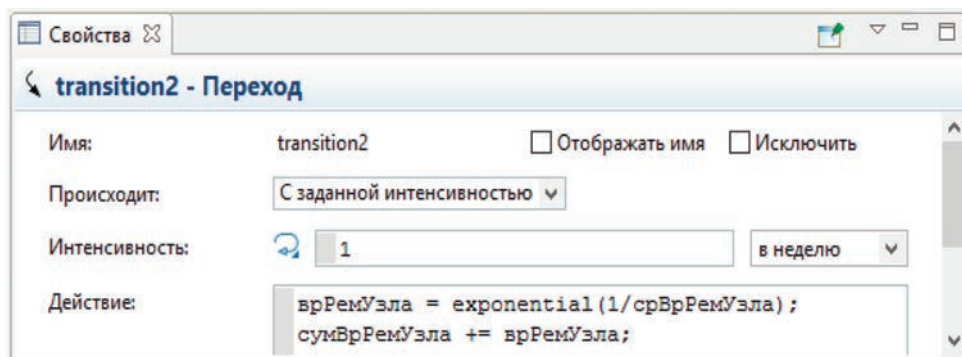


Рис. 10. Код в transition для расчёта КТГ узлов связи

Необходимо выделить элемент «Событие» и ввести свойства (рис. 11). КТГ узлов связи будут рассчитываться только в конце моделирования. За счёт этого сократится машинное время.

Результаты расчёта КТГ узла связи «узел[0]» после моделирования в течение года представлены на рис. 12.

В модели имеется возможность проверять состояние разных узлов связи соответственно их порядковому номеру. Когда узел связи появится в пространстве, будет вы-

делено его текущее состояние, а все элементы типа агента будут отображать его показатели [14–16].

По полученным КТГ узлов связи определяется среднее значение, т.е. математическое ожидание КТГ системы связи. Для этого задается следующая функция сбора статистики у популяции агентов «Узел» (рис. 13).

После задания необходимых параметров запускается модель. Пример результатов моделирования представлен на рис. 14.

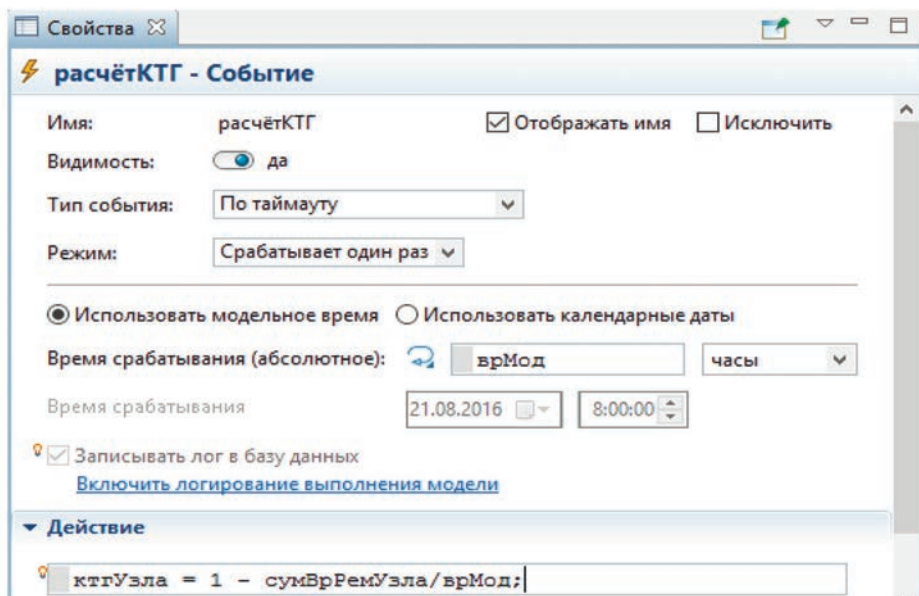


Рис. 11. Свойства элемента «Событие Расчёт КТГ»

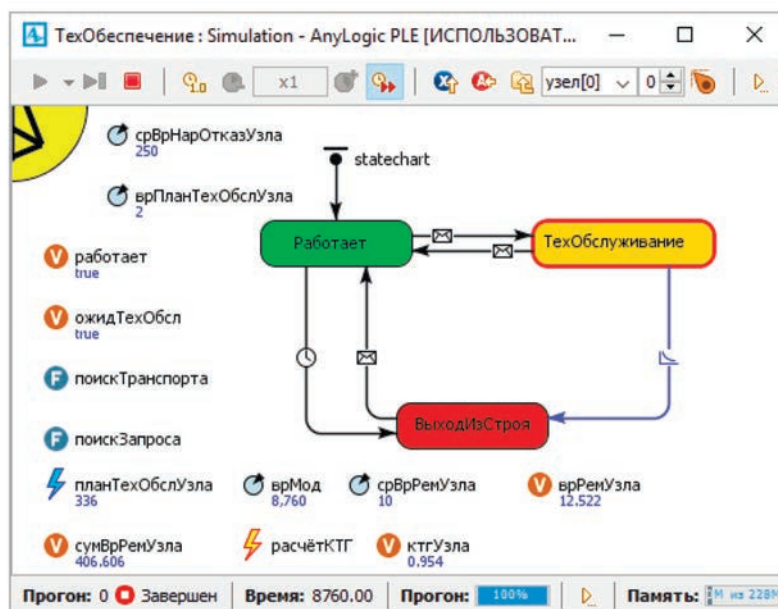


Рис. 12. Результаты расчёта КТГ узла [0] связи

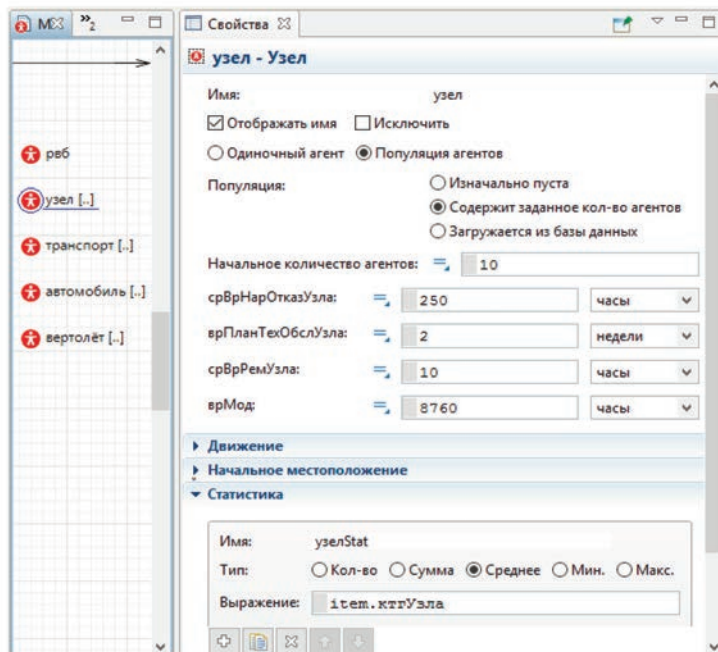


Рис. 13. Задание функции сбора статистики у популяции

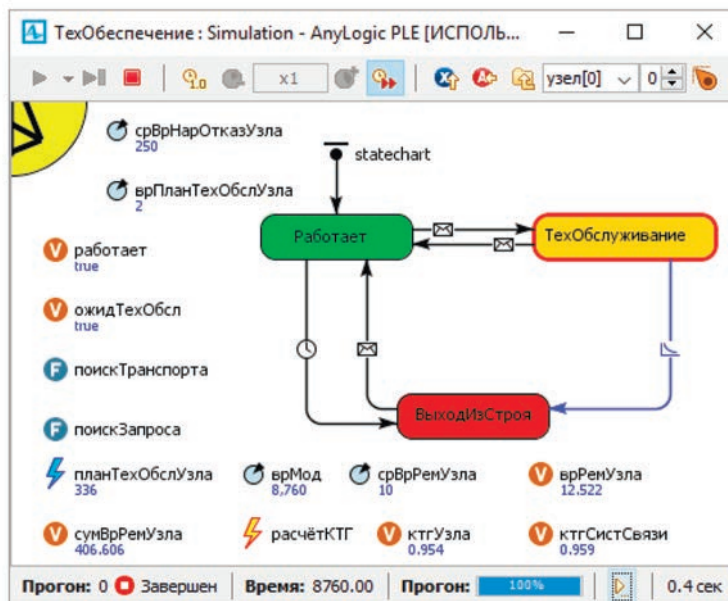


Рис. 14. Результаты расчёта КТГ системы связи

Заключение

Предлагаемый подход к построению модели технического обеспечения СС СН на основе агентного моделирования, в отличие от известных подходов к построению имитационных моделей, позволяет исследовать систему

«снизу-вверх». Взаимодействие агентов порождает новое поведение системы, учитывающее воздействие различных факторов. Разработанная модель предоставляет возможность оценивать качество функционирования системы



связи специального назначения по качеству функционирования ее объектов, представленных в моделях в виде отдельных взаимодействующих агентов, и с учетом множества случайных факторов. Агентная модель технического обеспечения СС СН является универсальной для систем, реализующих аналогичные функции и позволяет имитировать, задавать и изменять множество характеристик сети в широком диапазоне, а также определять КТГ СС СН.

В качестве направлений дальнейших исследований предлагается создание многоуровневой комплексной и динамичной модели, включающей множество моделей, объединенных единством цели, исходных данных и общей методологией решения задач построения и функционирования сложных организационно-технических систем.

Литература

1. Саенко И.Б., Волков Д.В., Ясинский С.А. Моделирование корпоративных телекоммуникационных сетей на основе агентного подхода // Информация и космос. 2020. № 1. С. 52–59.
2. Волков Д.В. Мультиагентная модель сети передачи данных специального назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 411–417.
3. Волков Д.В., Саенко И.Б., Старков А.М., Султанбеков А.Т. Оценка устойчивости сети передачи данных в условиях деструктивных воздействий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 358–363.
4. Волков Д.В., Саенко И.Б., Старков А.М. Методика оценки пропускной способности сети связи специального назначения в условиях деструктивных воздействий на элементы сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 391–395.
5. Старков А.М., Саенко И.Б., Волков Д.В. Методика технологического управления виртуальными локальными вычислительными сетями специального назначения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 423–435.
6. Стародубцев Ю.И., Анисимов В.В., Бречко А.А., Волков Д.В., Львова Н.В. Способ резервного копирования // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 7–8(121–122). С. 77–84.
7. Волков Д.В. Методика оценки качества функционирования сети передачи данных специального назначения // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2018. № 1 (104). С. 3.
8. Волков Д.В., Саенко И.Б. Подход к обоснованию критерия эффективности функционирования сетей передачи данных // Труды ЦНИИС. 2018. Т. 2. № 6 (6). С. 68–71.
9. Волков Д.В. Имитационное мультиагентное моделирование системы связи специального назначения // International Journal of Advanced Studies. 2017. Т. 7. № 1–2. С. 31–37.
10. Волков Д.В., Хилько В.О., Петухов А.В. Мультиагентное моделирование сети передачи данных // Сборник статей «Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве». 2016. С. 626–631.
11. Боев В.Д., Волков Д.В., Кондрашов Ю.В., Ткачев Д.Ф., Теплов И.В., Сабуров А.В. Агентная модель функционирования доставки материальных средств // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2017. № 6 (97). С. 22.
12. Боев В.Д., Волков Д.В., Ткачев Д.Ф., Кондрашов Ю.В. Мо-дель функционирования сети связи // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2017. № 2(93). С. 29.
13. Боев В.Д., Волков Д.В., Ткачев Д.Ф., Педан А.В., Кондрашов Ю.В., Ашляпов М.В. Мультиагентная имитационная модель функционирования системы связи // Навигатор в мире науки и образования. 2017. № 1 (34). С. 631–638.
14. Боев В.Д., Волков Д.В., Кондрашов Ю.В. Применение мультиагентного имитационного моделирования для построения системы поддержки принятия решений в системе связи военного назначения // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Прошлое, настоящее и будущее российской цивилизации». 2015. С. 331–334.
15. Ануфренко А.В., Волков Д.В., Канаев А.К. Механизмы обеспечения отказоустойчивости пакетно-ориентированных сетей связи // Сборник научных статей IV Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». В 2 т. 2015. С. 198–202.
16. Ануфренко А.В., Волков Д.В., Канаев А.К. Принцип организации узла агрегации мультисервисной сети связи // Сборник научных статей IV Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». В 2 т. 2015. С. 203–206.



ON THE ISSUE OF CONSTRUCTING AN AGENT MODEL OF TECHNICAL SUPPORT FOR A SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATION SYSTEM

DENIS V. VOLKOV

Mytishchi. Russia, denmarath@mail.ru

IGOR B. SAENKO

Saint-Petersburg. Russia, ibsaen@mail.ru

RADIK SH. SHAKUROV

Mytishchi. Russia, kolobrodov75@mail.ru

ANDREI V. ULANOV

Mytishchi. Russia, ulanov_a_v@mail.ru

KEYWORDS: simulation modeling; agent model; technical support; communication system; coefficient of technical readiness.

ABSTRACT

To study complex systems, which include communication systems, both analytical and simulation modeling are used. Recently, simulation modeling has become widespread, which is becoming one of the most powerful analysis and synthesis tools used by specialists in the study and design of complex systems. However, traditional simulation modeling usually has a number of difficulties that arise from trying to represent processes in real systems in greater detail. At the same time, there is currently a tendency in modeling to improve the accuracy and adequacy of the created models. The answer to this requirement is the emergence of agent-based simulation. The aim of the article is to show the possibility and feasibility of using this rather new direction of modeling for the study of a special purpose communication system (SPCS). SPCS as an object of modeling is a rather complex system characterized by many parameters, and an attempt to improve some characteristics can and often leads to deterioration of other characteristics of this system. The work discusses the construction of a model of technical support for the SPCS based on the agent-based approach. The proposed approach to the construction of such a model, in contrast to the well-known approaches to the construction of simulation models, allows you to study the system "bottom-up". The developed model provides an opportunity to assess the quality of functioning of the SPCS taking into account the performance indicators of its elements, presented in the form of individual interacting agents, as well as a variety of random factors. The article deals with the application of the agent-based approach to modeling the technical support of the SPCS. The formulations of the problems of analysis and synthesis of SPCS are formulated. The composition of the components and the structure of the agent model are discussed. The aspects of the implementation of the agent-based model in the AnyLogic tool environment and the possibility of conducting experiments using this model are demonstrated. It is shown that the agent-based model of the technical support of the SPCS is universal for systems that implement similar functions. It allows

simulating, setting and changing many network characteristics in a wide range, as well as determining the coefficient of technical availability of this system.

REFERENCES

1. Saenko I.B., Volkov D.V., Yasinsky S.A. Modeling of corporate telecommunication networks based on the agent-based approach. *Information and Space*. 2020. No. 1. Pp. 52-59. (In Rus)
2. Volkov D.V. Multiagent model of a special-purpose data transmission network. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2018. No. 12. Pp. 411-417. (In Rus)
3. Volkov D.V., Saenko I.B., Starkov A.M., Sultanbekov A.T. Assessment of the stability of the data transmission network in the conditions of destructive influences. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2018. No. 12. Pp. 358-363. (In Rus)
4. Volkov D.V., Saenko I.B., Starkov A.M. Methodology for assessing the throughput of a special-purpose communication network under conditions of destructive influences on network elements. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2018. No. 12. Pp. 391-395. (In Rus)
5. Starkov A.M., Saenko I.B., Volkov D.V. Technological management technique for special purpose virtual local area networks. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2018. No. 12. Pp. 423-435. (In Rus)
6. Starodubtsev Yu.I., Anisimov V.V., Brechko A.A., Volkov D.V., Lvova N.V. Backup method. *Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2018. No. 7-8 (121-122). Pp. 77-84. (In Rus)
7. Volkov D.V. Methodology for assessing the quality of the functioning of a special-purpose data transmission network. *Chronicles of the United Fund of Electronic Resources Science and Education*. 2018. No. 1(104). Pp. 3. (In Rus)



8. Volkov D.V., Saenko I.B. An approach to substantiating the criterion of the efficiency of the functioning of data transmission networks. *Transactions of TsNIIS*. St. 2018. Vol. 2. No. 6 (6). Pp. 68-71. (In Rus)

9. Volkov D.V. Simulation multi-agent modeling of a special-purpose communication system. *International Journal of Advanced Studies*. 2017. Vol. 7. No. 1-2. Pp. 31-37. (In Rus)

10. Volkov D.V., Khilko V.O., Petukhov A.V. Multi-agent modeling of a data transmission network. *Sbornik statej "Metody i tehniceskije sredstva povysheniya `effektivnosti ispol'zovaniya `elektrooborudovaniya v promyshlennosti i sel'skom hozjajstve"* [Proc. of the conference "Methods and technical means of increasing the efficiency of using electrical equipment in industry and agriculture"]. 2016. Pp. 626-631. (In Rus)

11. Boev V.D., Volkov D.V., Kondrashov Yu.V., Tkachev D.F., Teplov I.V., Saburov A.V. An agent model of the functioning of the delivery of material resources. *Chronicles of the United Fund of Electronic Resources Science and Education*. 2017. No. 6 (97). Pp. 22. (In Rus)

12. Boev V.D., Volkov D.V., Tkachev D.F., Kondrashov Yu.V. Communication network functioning model. *Chronicles of the United Fund of Electronic Resources Science and Education*. 2017. No. 2 (93). Pp. 29. (In Rus)

13. Boev V.D., Volkov D.V., Tkachev D.F., Pedan A.V., Kondrashov Yu.V., Ashlapov M.V. Multi-agent simulation model of the communication system functioning. *Navigator in the world of science and education*. 2017. No. 1 (34). Pp. 631-638. (In Rus)

14. Boev V.D., Volkov D.V., Kondrashov Yu.V. Application of multi-agent simulation for building a decision support system in a military communications system. *Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii "Proshloe, nastoyashee i budushee rossijskoj civilizacii"* [Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Past, present and future of russian civilization"]. 2015. Pp. 331-334. (In Rus)

15. Anufrenko A.V., Volkov D.V., Kanaev A.K. Mechanisms for ensuring fault tolerance of packet-oriented communication networks. *Sbornik nauchnykh statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferencii "Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii"* [Proc. of IV International scientific-technical and scientific-methodical conference "Actual problems of information telecommunications in science and education"]. 2015. Pp. 198-202. (In Rus)

16. Anufrenko A.V., Volkov D.V., Kanaev A.K. The principle of organizing the aggregation node of a multiservice communication network. *Sbornik nauchnykh statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferencii "Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii"* [Proc. of IV International scientific-technical and scientific-methodical conference "Actual problems of information telecommunications in science and education"]. 2015. Pp. 203-206. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Volkov D.V., Ph.D., Deputy Head of Department of the Federal State Budgetary Institution "16 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia;
 Saenko I.B., Ph.D., Full Professor, Professor of the Military Telecommunication Academy;
 Shakurov R.Sh., Ph.D., Deputy Head of the Federal State Budgetary Institution "16 Central Research Institute" of the Russian Ministry of Defense;
 Ulanov A.V., Ph.D., Head of Department of the Federal State Budgetary Institution "16 Central Research Institute" of the Russian Ministry of Defense.

For citation: Volkov D.V., Saenko I.B., Shakurov R.Sh., Ulanov A.V. On the issue of constructing an agent model of technical support for a special-purpose communication system. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 24-35. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-24-35 (In Rus)





doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-36-43

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

СТУДЕНИКИН**Андрей Владимирович¹****ЖУК****Александр Павлович²****АННОТАЦИЯ**

Развитие беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов с учетом специфики их функционирования, связано с генерацией и обработкой сложных сигналов, имеющих широкую полосу частот спектра и требуемые корреляционные характеристики, а также с применением специальных алгоритмов информационного обмена. Задача синтеза ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей, с минимальными боковыми пиками автокорреляционных функций и взаимокорреляционных функций и имеющих минимальное смещение амплитудно-частотных спектров является актуальной. Успешное решение данной задачи влияет на качество выходной информации, помехоустойчивость и уровень сигнал/шум системы передачи информации. Целью работы является синтез ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей для перспективной помехоустойчивой беспроводной системы передачи информации с кодовым разделением каналов с учетом ограничений на энергетические, спектральные и корреляционные характеристики. Вариантом решения задачи синтеза ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей, с минимальными боковыми пиками автокорреляционных функций и взаимокорреляционных функций и имеющих минимальное смещение амплитудно-частотных спектров является использование метода моделирования на основе собственных векторов диагональных симметрических матриц. Представлен синтезированный при помощи ЭВМ ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей объемом $N = 16$. Применение синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей в качестве модулирующих последовательностей в беспроводных системах передачи информации с кодовым разделением каналов обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости в случае воздействия узкополосной помехи фиксированной мощности. Из вышесказанного видно, что полученный ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей превосходит по своим характеристикам известные ансамбли ортогональных кодовых последовательностей и соответствует предъявленным требованиям. Использование предложенного метода моделирования ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей с улучшенными автокорреляционными и спектральными свойствами для беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов, позволяет повысить помехоустойчивость и эффективность использования частотного диапазона данных систем.

Сведения об авторах:

¹аспирант Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь, Россия, studentstavropol@mail.ru

²к.т.н., профессор, профессор Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь, Россия, alekszhuk@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стохастические дискретные ортогональные кодовые последовательности; структурная скрытность; системы передачи информации с кодовым разделением каналов; симметрическая матрица; собственные векторы.

Для цитирования: Студеникин А.В., Жук А.П. Моделирование дискретных ортогональных кодовых последовательностей для систем передачи информации // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 36-43. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-36-43

Введение

Развитие беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов с учетом специфики их функционирования, связано с генерацией и обработкой сложных сигналов, имеющих широкую полосу частот спектра и требуемые корреляционные характеристики, а также с применением специальных алгоритмов информационного обмена. Как известно^{1,2}, беспроводные системы передачи информации осуществляют информационный обмен по радиоканалу в полосе частот подверженной воздействию электромагнитных помех, как естественного, так и искусственного происхождения.

Для обеспечения информационного обмена в беспроводных системах передачи информации с кодовым разделением каналов часто используются ортогональные последовательности Уолша³⁻⁸. Свойство ортогональности последовательностей Уолша позволяет предотвратить влияние на сигнал узкополосных и широкополосных помех, а так же позволяет бороться с межсимвольной и межканальной интерференцией. Однако ортогональные последовательности Уолша имеют плохие автокорреляционные и взаимокорреляционные свойства, а также большое смещение амплитудно-частотных спектров (АЧС) что снижает помехоустойчивость данных систем и эффективность использования отведенного спектра частот, как отмечается в работах^{4,5,9,10}. В этой связи синтез, формирование и исследование сложных сигналов является важной задачей техники беспроводной связи.

Существующие методы синтеза фазоманипулированных сигналов по желаемой форме тела неопределенности, а тем более с учетом ограничений на спектральные свойства, развиты недостаточно, поэтому на практике часто применяют известные ранее из математики или эмпирически подобранные коды, которые не являются оптимальными^{4,5,9} [1, 2].

С учетом сказанного выделяется задача синтеза ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей (АДОКП), с минимальными боковыми пиками автокорреляционных функций (АКФ) и взаимокорреляционных функций (ВКФ), и имеющих минимальное смещение АЧС. Успешное решение данной задачи влияет на качество выходной информации, помехоустойчивость и уровень сигнал/шум системы передачи информации, поэтому поиск модулирующих функций является

актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Как отмечалось, на помехоустойчивость беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов, помимо других факторов, важное влияние оказывают спектральные, энергетические и корреляционные свойства сигналов, применяемых в этих системах. Применение модулирующих сигналов в беспроводных системах передачи информации с кодовым разделением каналов, удовлетворяющих заданным требованиям, позволяет значительно упростить оборудование, уменьшить энергетические затраты, повысить вероятность правильного приема^{4,5,9}.

Существующие пути совершенствования беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов ориентированы на применение шумоподобных сложных сигналов в сочетании с использованием помехоустойчивого кодирования и методов оптимального приема. Анализ ряда работ^{4,5,9} показывает, что применение сложных сигналов позволяет обеспечить требуемую помехоустойчивость. Однако использование широкополосных сигналов ориентировано на наличие каналов с избытком частотных ресурсов, что возможно только для каналов с большой частотной емкостью. Применение помехоустойчивого кодирования позволяет снизить вероятность ошибки, однако это сопровождается значительным снижением скорости передачи информации, что в условиях низкоскоростных радиоканалов недопустимо.

Целью статьи является синтез ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей для перспективной помехоустойчивой беспроводной системы передачи информации с кодовым разделением каналов с учетом ограничений на энергетические, спектральные и корреляционные характеристики.

Основная часть

Одним из путей повышения помехоустойчивости перспективных беспроводных систем передачи информации с кодовым разделением каналов, обеспечивающих информационный обмен в условиях воздействия узкополосной помехи фиксированной мощности, является использование дискретных ортогональных кодовых последовательностей в качестве расширяющих, реализующих метод непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью³⁻⁹.

¹Proakis J. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 2001. 928 p.

²Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. Upper Saddle River NJ, Prentice-Hall, 1988. 1104 p.

³Viterbi A. J. CDMA: Principles of spread spectrum communication. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. 245 p.

⁴Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Советское радио, 1978. 199 с.

⁵Петрович Н. Т., Размахнин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 232 с.

⁶Golomb S. W., Gong G. Signal design for good correlation for wireless communication, cryptography, and radar. Cambridge: University press, 2005. 438 p.

⁷Golomb S. Digital communications with space applications. Upper Saddle River NJ, Prentice-Hall, 1964. 210 p.

⁸Ziemer R. E., Peterson R. L., Borth D. E. Introduction to spread spectrum communications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995. 695 p.

⁹Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.

¹⁰Golomb S. Shift Register Sequences. San Francisco: Holden-Day, 1967. 224 p.

Анализ работ показывает, что для получения новых ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей большие возможности открывает их матричное представление, получаемых на основе математических преобразований линейной алгебры [3–12].

Вариантом решения задачи синтеза дискретных ортогональных кодовых последовательностей является использование метода получения ансамблей данного класса сигналов, представляемых собственными векторами диагональных симметрических матриц вида [3]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n-1,N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n,N-1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При различных наборах коэффициентов $\{N\}$ диагональных симметрических матриц вида (1), существует бесконечно большое число ортогональных базисов $\{M\}$. На общем минимальном отрезке Δt каждый сигнал моделируется точкой арифметического N -мерного пространства R^N , которое рассматривается как частный случай линейного пространства матриц, а ансамбль последовательностей однозначно определяется матрицей её собственных векторов размерностью n на N :

$$x_{ik} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nN} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $x_{ik} = x_i(t)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $k = 1, 2, 3, \dots, N$, при $t \in [(k-1)\Delta t; k\Delta t]$.

Матрица собственных векторов, определяемая выражением (2), является моделью ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей. Для каждой симметрической матрицы пространства матриц существует, по крайней мере, один действительный или комплексный собственный вектор, координаты которого являются решением характеристического уравнения матрицы A n -й степени, корни которого называются собственными числами матрицы A [3]. Достижение поставленной в статье цели возможно на основе анализа характеристик известных и синтезированного авторами ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей на предмет удовлетворения их определенным требованиям. В работе [3] предложен следующий вариант набора требований к расширяющим последовательностям беспроводной системы передачи информации с кодовым разделением каналов.

Первое требование y_1 заключается в том, что ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей при заданном числе переносчиков должен обеспечивать минимальное значение пикфактора η_i для любой последовательности из ансамбля. Иначе в символическом виде

$$y_1 = \max_{\{i\}} \eta_i \rightarrow \min. \quad (1)$$

Второе требование y_2 заключается в том, что ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей при заданном числе переносчиков должен обеспечивать минимальное значение ширины спектра для последовательности ансамбля с самым широким спектром. Иначе в символическом виде

$$y_2 = \max_{\{i\}} W_{i,0} = \frac{W_i}{W_0} = \left(\frac{T^2}{2E_i \Delta t} \sum_{i=1}^{N+1} (\Delta \Theta_{il})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где W_i — эффективная ширина спектра i -й последовательности; W_0 — эффективная ширина спектра прямоугольного импульса; T — длительность последовательности; E_i — энергия i -й последовательности; Δt — длительность элемента последовательности; N — число элементов последовательности; $\Delta \Theta_{il}$ — величина l -го скачка амплитуды i -й последовательности.

Третье требование y_3 заключается в том, что ансамбль дискретных ортогональных последовательностей должен иметь наименьшее смещение частотных спектров. Иначе в символическом виде

$$y_3 = \min_{\{i\}} W_{i,0} = \frac{W_i}{W_0} = \left(\frac{T^2}{2E_i \Delta t} \sum_{i=1}^{N+1} (\Delta \Theta_{il})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \max, \quad (3)$$

Четвертое требование y_4 заключается в том, что максимальный выброс амплитудно-частотных спектров последовательностей ансамбля должен быть наименьшим среди рассмотренных ансамблей. Иначе в символическом виде

$$y_4 = \max_{\{i\}} |G_i(\omega)| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Пятое требование y_5 заключается в том, что ансамбль дискретных ортогональных последовательностей должен иметь наименьший показатель различимости автокорреляционной функции, являющийся наибольшим среди анализируемых ансамблей дискретных ортогональных последовательностей. Иначе в символическом виде

$$y_5 = \min_{\{i\}} P_{Ri}(t) \rightarrow \max. \quad (5)$$

В зависимости от полноты удовлетворения требованиям того или иного ансамбля дискретных ортогональных



кодových последовательностей по критерию безусловного предпочтения, возможен его дальнейший выбор для применения в качестве переносчиков информации в беспроводной системе передачи информации с кодовым разделением каналов [3].

Следуя основным этапам алгоритма синтеза последовательностей были определены значения диагональных коэффициентов матрицы A , которые имеют следующий вид:

$$a_{1,2} = 100; a_{2,3} = 1; a_{3,4} = -100; a_{4,5} = -0,05; a_{5,6} = -100;$$

$$a_{6,7} = -1; a_{7,8} = 100; a_{8,9} = 0,0025; a_{9,10} = 100; a_{10,11} = -1;$$

$$a_{11,12} = -100; a_{12,13} = 0,05; a_{13,14} = -100; a_{14,15} = -1; a_{15,16} = 100.$$

На основе использования данных коэффициентов симметрической матрицы A при помощи ПЭВМ авторами был синтезирован ансамбль дискретных ортогональных кодových последовательностей объемом $N = 16$, который имеет вид, представленный на рис. 1.

По соотношениям (1)–(5) был произведен расчет и анализ характеристик y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 ансамблей дискретных ортогональных последовательностей Радемахера, Уолша, Хаара, производных ансамблей сигналов Варакина, Рид-Мюллера, Джеффи, Стиффлера последовательностей D — кодов, ансамбля сигналов Трофимова-Ласунского и синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодových последовательностей объемом $N = 16$. Результаты расчетов представлены в табл.

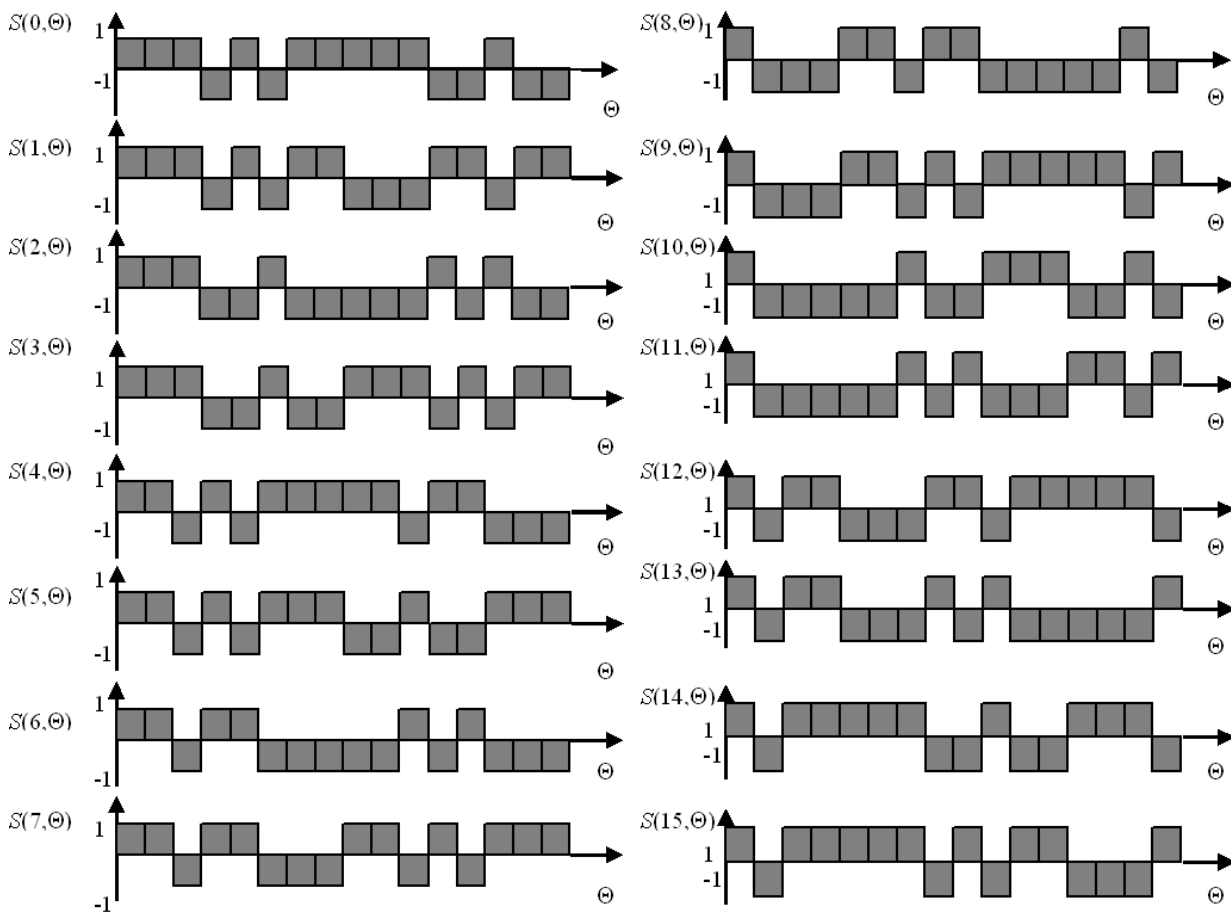


Рис. 1. Внешний вид синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодových последовательностей $S(i, \theta)$

Значения характеристик известных ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей

№ п/п	Наименование ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей	Значения характеристик				
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
1	Хаара, $X_m^{(k)}(\Theta)$	2,83	24	1	1	0,0625
2	Радемахера, $r_n(i, \Theta)$	1	131071	3	0,720	$1,52 \cdot 10^{-5}$
3	Уолша, $Wal(i, \Theta)$	1	31	1	1	0,0625
4	Варакина, $V(i, \Theta)$	1	21	11	0,5	0,5625
5	Рида-Мюллера, $R(i, \Theta)$	1	17	15	0,5	0,5
6	Джеффи, $Df(i, \Theta)$	1	21	11	0,490	0,5
7	Стиффлера, $Sf(i, \Theta)$	1	21	11	0,464	0,625
8	D-коды, d_i^k	1	17	15	0,345	0,6875
9	Трофимова-Ласунского, $TL(i, \Theta)$	1	17	15	0,418	0,6875
10	Синтезированный, $S(i, \Theta)$	1	17	15	0,318	0,8125

На рис. 2 и рис. 3 изображены графики амплитудно-частотных спектров синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей $S(i, \Theta)$.

Из анализа табл. следует, что использование синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей в качестве переносчиков информации в беспроводной системе передачи информации

с кодовым разделением каналов является наиболее целесообразным. Это объясняется тем, что в соответствии с соотношениями (1)–(5) и критерием безусловного предпочтения, он имеет наилучшие характеристики y_4, y_5 при наличии характеристик y_1, y_2, y_3 не хуже, чем у других анализируемых ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей.

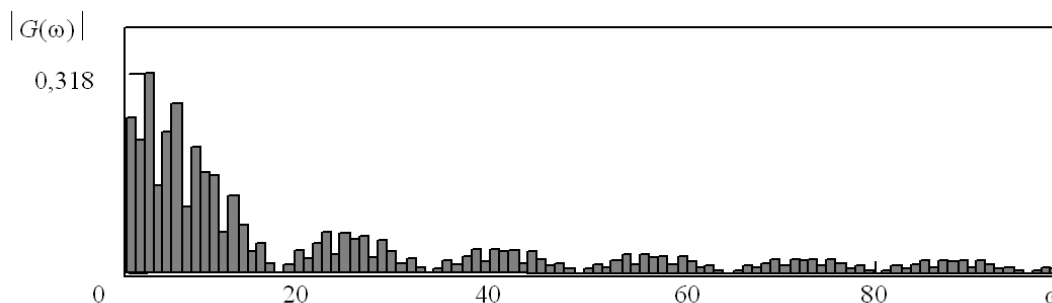


Рис. 2. Внешний вид амплитудно-частотных спектров последовательностей $S(0, \Theta), S(3, \Theta), S(5, \Theta), S(6, \Theta), S(8, \Theta), S(11, \Theta), S(13, \Theta), S(14, \Theta)$ синтезированного ансамбля

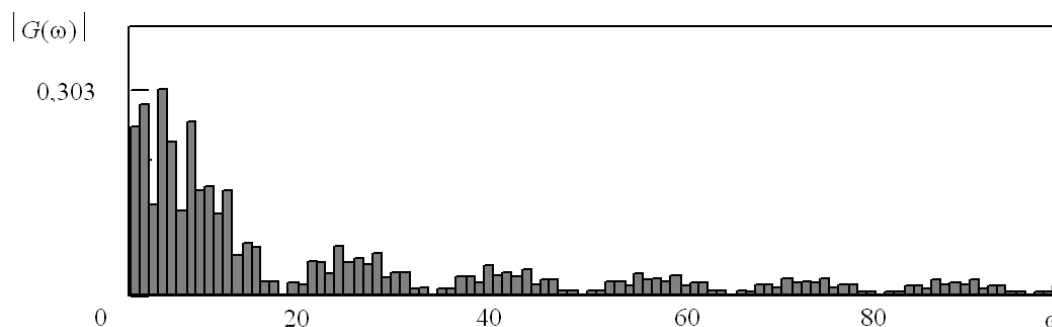


Рис. 3. Внешний вид амплитудно-частотных спектров последовательностей $S(\Theta, 1), S(2, \Theta), S(4, \Theta), S(7, \Theta), S(9, \Theta), S(10, \Theta), S(12, \Theta), S(15, \Theta)$ синтезированного ансамбля



Данные расчета амплитудно-частотных спектров последовательностей показывают, что синтезированные последовательности обладают хорошей равномерностью спектральной плотности. Анализ рис. 2 и рис. 3 показывает, что наибольшее значение максимального выброса амплитудно-частотных спектров имеют последователь-

ности $S(0, \Theta)$, $S(3, \Theta)$, $S(5, \Theta)$, $S(6, \Theta)$, $S(8, \Theta)$, $S(11, \Theta)$, $S(13, \Theta)$, $S(14, \Theta)$.

Результаты расчетов автокорреляционных функций синтезированного ансамбля дискретных ортогональных фазоманипулированных последовательностей представлены на рис. 4.

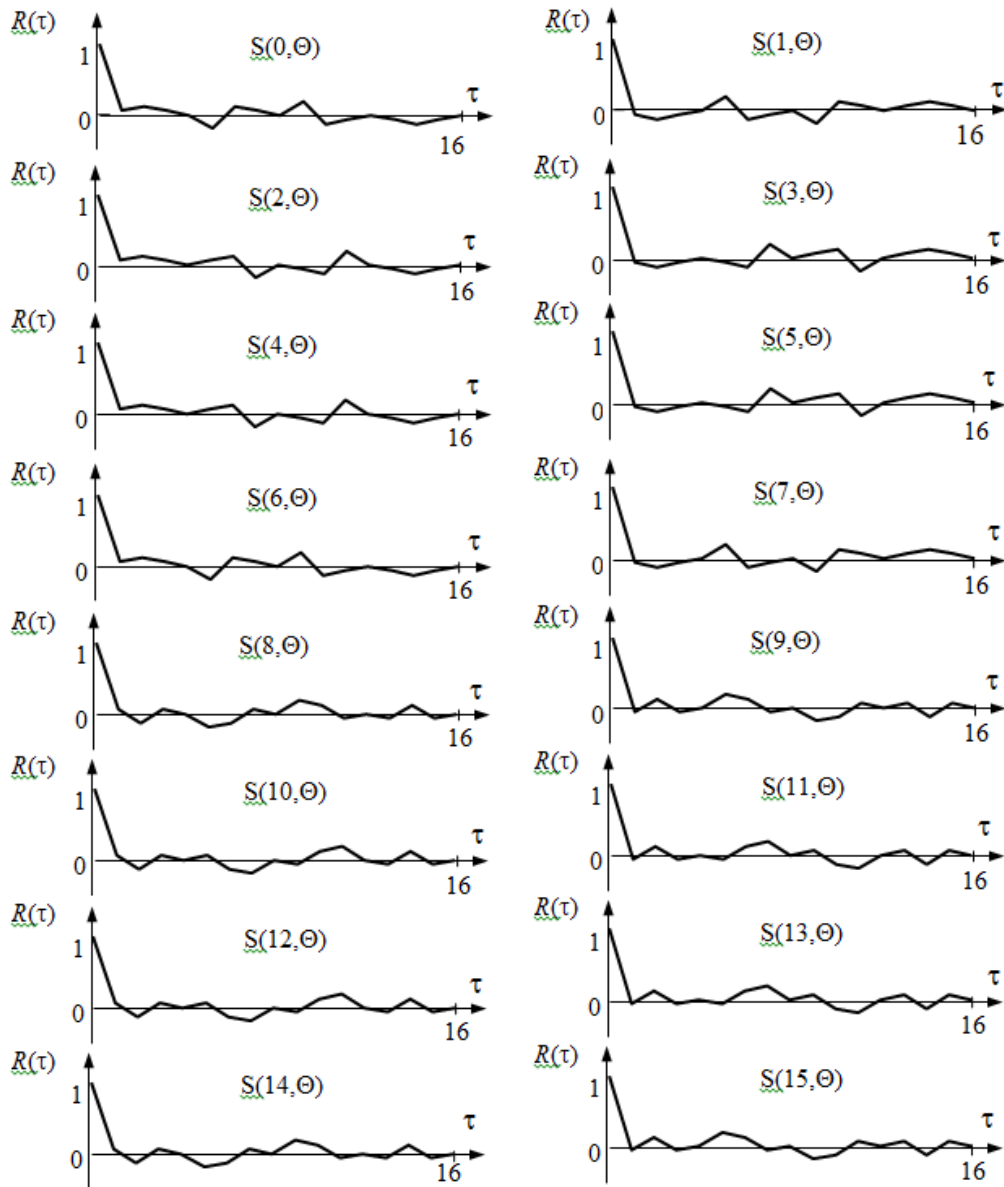


Рис. 4. Внешний вид автокорреляционных функций синтезированного ансамбля дискретных ортогональных последовательностей $S(i, \Theta)$

Анализ табл. и рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что синтезированный ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей имеет малые боковые пики автокорреляционной функции последовательностей, которые являются наименьшими среди анализируемых ансамблей.

Заключение

Таким образом, на основе проведенного анализа известных и синтезированного ансамблей дискретных ортогональных кодовых последовательностей можно сделать следующие выводы:

– синтезированный ансамбль дискретных ортогональных кодовых последовательностей $S(i, \Theta)$ обладает предельным наилучшим значением пикфактора $\gamma_1=1$, является наилучшим по использованию отведенной в канале полосы частот, поскольку характеристики γ_2, γ_3 имеют значения не хуже, чем у других ансамблей;

– применение синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей в качестве переносчиков в беспроводной системе передачи информации с кодовым разделением каналов обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости в случае воздействия узкополосной помехи фиксированной мощности, поскольку максимальный выброс амплитудно-частотных спектров последовательностей ансамбля γ_4 является наименьшим среди рассмотренных ансамблей;

– при использовании синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей $S(i, \Theta)$ для достижения требуемой вероятности обнаружения последовательностей и измерения их параметров требуется меньшее отношение сигнал-шум по сравнению с наилучшим из известных ансамблей последовательностей D-кодов. Это обстоятельство объясняется тем, что характеристика γ_5 у синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей является наибольшей среди всех анализируемых ансамблей;

– выявленные преимущества синтезированного ансамбля дискретных ортогональных кодовых последовательностей $S(i, \Theta)$ подтверждают возможность его применения в перспективной помехоустойчивой беспроводной системе передачи информации с кодовым разделением каналов.

Литература

1. Nunn C.J., Coxson G.E. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2009. Vol. AES-45. No. 2. Pp. 775–781.
2. Rushanan J. Weil sequences: a family of binary sequences with good correlation properties // IEEE International Symposium on Information Theory,

Seattle, WA, July 9–14, 2006. Seattle convention center. Seattle, WA, USA, 2006. Pp. 1648–1652.

3. Пашинецов В.П., Малофей О.П., Жук А.П., Самус М.В., Гайчук Д.В., Сазонов В.В. Развитие теории синтеза и методов формирования ансамблей дискретных сигналов для перспективных систем радиосвязи различных диапазонов радиоволн. М.: Физико-математическая литература, 2010. 196 с.

4. Acad C.R. Special values of fractional hypergeometric functions for function fields // Sci. Paris, Ser. I Comptes Rendus Mathematique. 2012. Vol. 350. Issues 17–18. Pp. 801–806.

5. Stanley R.P. Smith normal form in combinatorics // J. Combin. Theory A. 2016. Vol. 144. Pp. 476–495.

6. Bapat R.B., Karimi M. Smith normal form of some distance matrices // Linear Multilinear Algebra. 2017. Vol. 65. Pp. 1117–1130.

7. Pashintsev V.P., Kalmykov I.A., Zhuk A.P., Orel D.V., Zhuk E.P. Formation Algorithms and Properties of Binary Quasi-Orthogonal Code Sequence of Modern Satellite Systems // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7 (4.38). Pp. 1205–1209.

8. Легков К.Е. Методика управления качеством информационного обмена в современных системах беспроводного широкополосного доступа специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. № 3. С. 35–38.

9. Смирнов К.А., Легков К.Е. К вопросу о структуре автоматизированной системы частотно-территориального планирования сетей транкинговой радиосвязи специального назначения // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2011. № 1. С. 88–91.

10. Легков К.Е. Стандарт IEEE 802.16: Управление качеством информационного обмена в системах специального назначения // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2011. № 1. С. 66–73.

11. Легков К.Е. Технологии беспроводного широкополосного доступа: анализ методов модуляции // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2011. № 1. С. 184–189.

12. Бабошин В.А., Павлович А.А., Легков К.Е. Особенности множественного доступа в широкополосных беспроводных сетях специального назначения // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2011. № 1. С. 140–143.

MODELING OF DISCRETE ORTHOGONAL CODE SEQUENCES FOR INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS

ANDREY V. STUDENIKIN

Stavropol, Russia, studentstavropol@mail.ru

ALEXANDER P. ZHUK

Stavropol, Russia, alekszhuk@mail.ru

KEYWORDS: stochastic discrete orthogonal code sequences; structural secrecy; information transmission systems with code channel separation; symmetric matrix; eigenvectors.



ABSTRACT

The development of wireless information transmission systems with code division of channels, taking into account the specifics of their functioning, is associated with the generation and processing of complex signals with a wide frequency band of the spectrum and the required correlation characteristics, as well as with the use of special algorithms for information exchange. The problem of synthesizing ensembles of discrete orthogonal code sequences with minimal side peaks of correlation functions and having minimal displacement of the amplitude-frequency spectra is relevant. Successful solution of this problem affects the quality of output information, noise immunity, and signal-to-noise level of the information transmission system. The aim of the article is to synthesize an ensemble of discrete orthogonal code sequences for a wireless information transmission system with code division of channels, taking into account restrictions on energy, spectral and correlation characteristics. A variant of solving the problem of synthesizing ensembles of discrete orthogonal code sequences with minimal side peaks of correlation functions having minimal displacement of the amplitude-frequency spectra is to use the modeling method based on eigenvectors of diagonal symmetric matrices. The article presents a synthesized ensemble of discrete orthogonal phase-manipulated sequences with a volume of $N = 16$. The use of a synthesized ensemble of discrete orthogonal sequences as modulating sequences in wireless information transmission systems with code division of channels provides a gain in noise immunity in the case of narrow-band interference of fixed power. From the above, it can be seen that the resulting ensemble of discrete orthogonal code sequences exceeds the characteristics of the known systems of orthogonal code sequences and meets the requirements. The use of the proposed method for modeling ensembles of discrete orthogonal code sequences with improved autocorrelation and spectral properties for wireless information transmission systems with code separation of channels makes it possible to increase the noise immunity and efficiency of using the frequency range of these systems.

REFERENCES

1. Nunn C.J., Coxson G.E. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2009. Vol. AES-45. No. 2. Pp.775-781.
2. Rushanan J. Weil sequences: a family of binary sequences with good correlation properties. *IEEE International Symposium on Information Theory, Seattle, WA, July 9-14, 2006*. Seattle convention center. Seattle, WA, USA. 2006. Pp.1648-1652.

3. Pashintsev V.P., Malofey O.P., Zhuk A.P., Samus M.V., Gaichuk D.V., Sazonov V.V. *Razvitie teorii sinteza i metodov formirovaniya ansamblej diskretnykh signalov dlya perspektivnykh sistem radiosvyazi razlichnykh diapazonov radiovoln* [Development of the theory of synthesis and methods of formation of ensembles of discrete signals for perspective radio communication systems of various ranges of radio waves]. Moscow, Fiziko-matematicheskaya literatura Publ., 2010. 196 p. (In Rus)
4. Acad C.R. Special values of fractional hypergeometric functions for function fields. *Sci. Paris, Ser. I Comptes Rendus Mathematique*. 2012. Vol. 350. Issues 17-18. Pp. 801-806.
5. Stanley R.P. Smith normal form in combinatorics. *J. Combin. Theory A*. 2016. Vol. 144. Pp. 476-495.
6. Bapat R.B., Karimi M. Smith normal form of some distance matrices. *Linear Multilinear Algebra*. 2017. Vol. 65. Pp. 1117-1130.
7. Pashintsev V.P., Kalmykov I.A., Zhuk A.P., Orel D.V., Zhuk E.P. Formation Algorithms and Properties of Binary Quasi-Orthogonal Code Sequence of Modern Satellite Systems. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.38). Pp. 1205-1209.
8. Legkov K. E. Methodology for managing the quality of information exchange in modern systems of wireless broadband access for special purposes. *T-Comm*. 2010. Vol. 4. No. 3. Pp. 35-38.(In Rus)
9. Smirnov K.A., Legkov K.E. On the structure of the automated system of frequency-territorial planning of special-purpose trunking radio communication networks. *Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2011. No. 1. Pp. 88-91.
10. Legkov K.E. IEEE802.16 Standard: quality management of information exchange in special-purpose systems. *Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2011. No. 1. Pp. 66-73.
11. Legkov K.E. Technologies of wireless broadband access: analysis of modulation methods. *Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2011. No. 1. Pp. 184-189.
12. Baboshin V.A., Pavlovich A.A., Legkov K.E. Features of multiple access in broadband wireless networks of special purpose. *Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2011. No. 1. Pp. 140-143.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Studenikin A.V., postgraduate student of the North-Caucasus Federal University.

Zhuk A.P., PhD, Full Professor, Professor of the North-Caucasus Federal University.



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-44-57

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ ИНФОРМАТИВНЫХ УЗЛОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

БОЧКОВ

Александр Петрович¹

ХОМОНЕНКО

Анатолий Дмитриевич²

БАРАНОВСКИЙ

Анатолий Михайлович³

АННОТАЦИЯ

Распространение сетевых и вычислительных технологий актуально при решении прикладных вопросов в разнообразных областях деятельности человека. Одним из таких вопросов является накопление данных в сетевых и вычислительных структурах. Решение соответствующей задачи производится на основе интегрированной и распределенной обработки данных в вычислительных сетях, для которой характерно использование интеллектуального и когнитивного анализа данных, а также метрик расстояний. Целью настоящего исследования является разработка математической модели, учитывающей особенности вычислительной активности устройств сетевого узла для расчета его информативной нагрузки за расчетное время и формирование кластеров информативных узлов (их пространств) в вычислительных сетях. На основе интеллектуального анализа данных предлагается рассматривать отклонения в вычислительной активности сетевых устройств как информационное наполнение сетевого узла, способность генерировать большие данные. При дальнейшем моделировании использовались методы теорий распознавания образов и имитационного моделирования, инструментарий метрик расстояния, позволяющих формализовать разнородные данные, учитывающие особенности вычислительных сетей. Элементом новизны предлагаемой математической модели является то, что в ней учитываются особенности по данным вычислительной активности устройств сетевого узла за расчетное время путем использования метрики Манхэттена. Приводится расчетный пример формирования кластеров информативных сетевых узлов, их пространств. В расчетах используется авторский датчик моделирования случайных величин, значительно повышающий качество расчетов, их наглядность. Практическая значимость предлагаемой математической модели заключается, прежде всего, в том, что появляется возможность отслеживать динамику изменения информативности в сетевых структурах с большим числом узлов. Это дает возможность контролировать обработку данных, кроме того, повышать эффективность вычислительных сетей путем проведения профилактических мероприятий по поддержанию их технического состояния и информационной безопасности.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, профессор Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия, kostpea@mail.ru

²д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I; профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, khomon@mail.ru

³к.т.н., доцент, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I; доцент Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, bamvka@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вычислительная сеть; кластер; информативный сетевой узел; устройства сетевого узла; интегрированная и распределенная обработка данных; метрика Манхэттена.

Для цитирования: Бочков А.П., Хомоненко А.Д., Барановский А.М. Модель формирования кластеров информативных узлов интегрированной и распределенной обработки данных в вычислительной сети // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 44-57. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-44-57

Введение

Современный мир постоянно обновляется в разных аспектах своей жизнедеятельности путем внедрения достижений научно-технического прогресса, которые формируются на основе использования больших данных, собираемых в процессе интегрированной и распределенной обработки данных в сетевых структурах. Поэтому актуально повышать информационное наполнение сетевых и телекоммуникационных структур, эффективность работы которых напрямую связана с качественным наполнением больших данных.

Современные технологии обработки данных предусматривают накопление их на вычислительных устройствах (рабочих станциях, персональных компьютерах и других устройствах) с последующей интеграцией данных на серверах. В свою очередь, по запросам, поступающим на сервер, данные распределяются по вычислительным устройствам, которые формируют данные в соответствии с конкретными приложениями. Таким образом, реализуется интегрированная и распределенная обработка данных, характерная для сетевых структур. В настоящее время в сетевых структурах вычислительные устройства группируются в совокупности, кластеры, которые, в свою очередь, объединяются в пространства, составляющие локальные, корпоративные, региональные и другие вычислительные сети (рис. 1) [1,2]. Все это способствует тому, что в сетевых структурах накапливаются большие данные.

В процессе интегрированной и распределенной обработки данных важно уметь делать нетривиальные выводы при решении конкретных практических задач. В настоящее время для этого активно используется так называемый интеллектуальный анализ данных (ИАД). Содержание такого анализа, в первую очередь, определяется характером конкретного приложения [3–7]. Решение конкретной практической задачи пользователем вычислительного устройства сопровождается познавательным процессом, в котором присутствуют анализ данных, когнитивный ана-

лиз данных (КАД) [7–12]. Поэтому в сетевых структурах при интегрированной и распределенной обработке данных активно используются интеллектуальный и когнитивный анализы данных, которые взаимно дополняют друг друга. Это привело к тому, что, в некоторых исследованиях, термины интеллектуальный и когнитивный используются как синонимы. Следующей задачей, решаемой при интегрированной и распределенной обработке данных, является учет гетерогенности, разнородности, данных. Решение такой задачи в зависимости от конкретного приложения осуществляется при помощи разнообразных метрик Махаланобиса, Дейка, Хэмминга, Гауэра, Евклида в разных интерпретациях и многих других [13–17].

В частности, при интегрированной и распределенной обработке данных в современных сетевых структурах очень важно выделять конкретные сетевые узлы, их кластеры, несущие основную нагрузку при формировании больших данных за определенное расчетное время. Зная такие сетевые узлы, их кластеры, можно организовать профилактические мероприятия для исключения возможности отказов вычислительных устройств узлов, по повышению защищенности накапливаемых данных, которые могут реализоваться с помощью программного и технического обеспечения. Кроме того, при выделении таких сетевых узлов необходимо подчеркнуть характерную особенность данных по вычислительной активности сетевых устройств, которая, например, может быть выражена в использовании двух значений, устройство активно (1) и не активно (0). Учитывая это и используя технологии ИАД [4, 6, 7], логично предположить, что информативность сетевого узла находится в прямой зависимости от отклонения вычислительной активности всех его устройств от вычислительной активности максимальной загруженности за рассматриваемое расчетное время устройства.

Известны работы по идентификации, определению влиятельных и важных сетевых узлов по обработке данных, информации [18–24]. Так, в [18] при определении

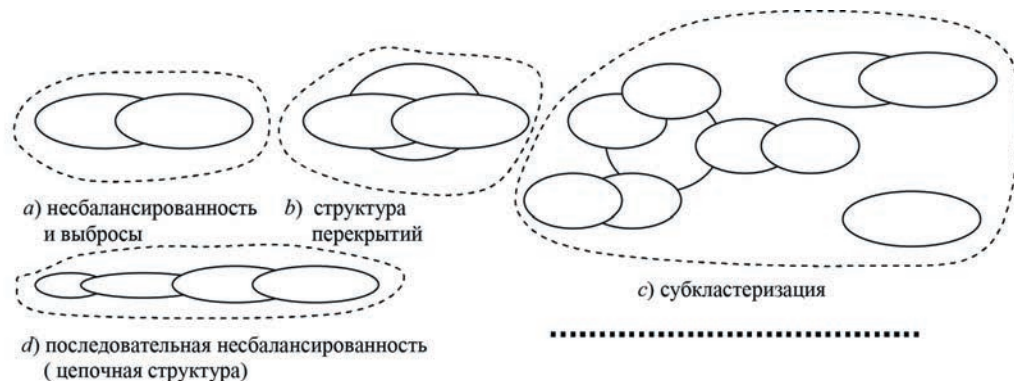


Рис. 1. Пространства кластеров в современных сетевых структурах

и идентификации влиятельных сетевых узлов используются локальные измерения, при этом информация об общем состоянии сети не учитывается. Это не дает общую картину о значимости узла по отношению к остальным узлам сети. Предлагается информативность узла определять путем синтеза локальных измерений с использованием метрик для разнородных данных (различных топологических масштабов расстояний). Это требует значительных трудозатрат. Кроме того, не всегда есть возможность получить данные по различным топологиям. Аналогично в [19] разработан метод идентификации влиятельных узлов, основанный на локальных измерениях для каждого узла. Но ничего не говорится о формировании кластеров влиятельных узлов.

В [20] предложен довольно оригинальный метод идентификации влиятельных узлов в сложных сетях общественных структур, который основан на вероятностях передачи информации между парами узлов и использовании алгоритма кластеризации методом k -medoid. Однако применение его для вычислительных сетей требует дополнительных данных и значительной подготовительной работы.

В [21] рассматриваются разнообразные виды сложных сетевых структур. Использование узлов влияния в таких сложных сетях может способствовать или препятствовать распространению информации, данных. Предлагается алгоритм trust-PageRank для идентификации влиятельных узлов на основе коэффициента подобия, который использует атрибутивную информацию. Этот алгоритм отличается значительной общностью и применение его для выявления информативных узлов и их кластеров в вычислительных сетях проблематично. Аналогично, в [22–24] представляются математические модели, алгоритмы по выявлению влиятельных, важных в плане информативности узлов разнообразных сетей. Используется метод идентификации узлов KDEС, применение которого требует знания положения узлов, расстояния между ними, метод идентификации влияния узла на основе анализа иерархий, требующий учета мультиатрибутивности данных сложных сетей [22, 23]. Для определения важных узлов сети предлагается метод измерений локальной центральности, основанный на топологической структуре и характеристиках взаимодействия узлов и их ближайшего окружения [24]. Однако они носят локаль-

ный характер и не учитывают особенность данных по активности сетевых устройств во времени, которая связана с двумя значениями — 1 (устройство активно), 0 (устройство не активно).

Исходя из этого, целью настоящей статьи является разработка математической модели, учитывающей особенности данных по вычислительной активности устройств сетевого узла с целью расчета его информативной нагрузки за расчетное время и формирование наиболее информативных кластеров узлов, их пространств, в вычислительных сетях.

1. Формирование кластеров информативных сетевых узлов

Математическая модель формирования кластеров информативных сетевых узлов включает в себя формализацию сетевой активности с учетом временного фактора, определение информативности сетевых узлов, нормирование информативности сетевых узлов и формирование их кластеров.

Формализация сетевой активности с учетом временного фактора. Каждый i -й сетевой узел в кластере можно представить совокупностью j -х устройств:

$$m_{j}^i, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, l_i$$

где n — количество выбранных узлов в сети, l_i — количество устройств в i -м сетевом узле. Такое представление удобно в том плане, что можно перейти от двухмерного рассмотрения сетевой конструкции к трехмерной конструкции. При включении в описание сетевого узла временной составляющей t получим:

$$m_{kj}^i, \quad k=1, \dots, K,$$

где K — число одинаковых временных интервалов длительностью $\Delta \cdot K$,

$t_{\text{расч}} = T - t_0$ — время от начального момента t_0 до конечного T , $t_k = t_0 + \Delta \cdot k$.

Учитывая такую формализацию, в сети можно формировать кластеры, включающие в себя узлы наиболее активные в вычислительном плане. Активность узла сети будет определяться активностью входящих в него устройств, которая постоянно меняется во времени. С целью дальнейшей формализации введем следующее обозначение:

$$m_{kj}^i = \begin{cases} 1, & \text{если в } i\text{-м узле сети } j\text{-е устройство на } k\text{-м временном интервале } \Delta \text{ активно,} \\ 0, & \text{если в } i\text{-м узле сети } j\text{-е устройство на } k\text{-м временном интервале } \Delta \text{ не активно.} \end{cases} \quad (1)$$

Определение информативности сетевых узлов.

Учитывая рассмотренную формализацию сетевой активности, не трудно перейти к определению информативности сетевого узла. При этом, например, информативность узла будет определяться степенью отклонения вычислительных нагрузок устройств узла от выделенной наибольшей нагрузки устройства того же узла. Для дальнейших расчетов по определению информативности сетевого узла удобно использовать метрику Манхэттена (*Manhattan distance*), которая в некоторых источниках обозначается как $L1$:

$$\rho_M(X, Y) = \sum_k |x_k - y_k|, \quad (2)$$

где X и Y — два вектора $\{x_k\}$, $\{y_k\}$, $k = \overline{1, K}$, со значениями элементов 0 или 1.

Используя метрику Манхэттена, удобно рассчитывать вычислительную активность (нагрузку) устройств, входящих в состав сетевого узла за расчетный промежуток времени $t_{\text{расч}}$. При этом вектора $\{x_k\}$, $\{y_k\}$, $k = \overline{1, K}$, отражают вычислительную нагрузку устройства x и устройства y , в которых каждое значение 1 (устройство активно) или 0 (устройство не активно). Информативность двух устройств x и y можно трактовать как отклонение вычислительной нагрузки одного устройства от вычислительной нагрузки другого устройства, определяемой метрикой Манхэттена (2).

Рассматривая не два устройства x и y , а несколько устройств, входящих в состав i -го узла, можно говорить об информативности сетевого узла за расчетное время $t_{\text{расч}}$. Для этого выражение (2) преобразуем к следующему виду:

$$\rho_{\text{узел}}^i(\bar{m}_{kq}^i; m_{kj}^i) = \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{k=1}^K |\bar{m}_{kq}^i - m_{kj}^i|, \quad (3)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l_i}, \quad k = \overline{1, K},$$

где \bar{m}_{kq}^i — вектор, характеризующий для i -го узла наибольшую вычислительную активность (нагрузку) по q -му устройству, $q=j$, для j выполняется условие

$$\max_j \left(\sum_{k=1}^K m_{kj}^i \right).$$

Нормирование информативности сетевых узлов, формирование кластеров информативных узлов. Для обеспечения сравнения информативности узлов сети проводится ее нормировка, тогда коэффициент информативности i -го узла равен

$$\rho_{\text{норм узл}}^i = \frac{\rho_{\text{узел}}^i(\bar{m}_{kq}^i; m_{kj}^i)}{N_i}, \quad (4)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{k=1}^K m_{kj}^i, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l_i}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Выбор кластеров (групп) наиболее информативных сетевых узлов из общей совокупности узлов n можно производить с помощью теории распознавания образов, имитационного моделирования. При этом число информационных узлов в кластере n_a определяется в зависимости от характера и особенностей решаемой практической задачи. Для этого формируется распознающая функция

$$F(U_\alpha^i) = \sum_{v=\alpha_1}^{\alpha_{n_a}} \rho_{\text{норм узл}}^v, \quad (5)$$

где $U_{n_a}^i = \{m^{\alpha_1}, m^{\alpha_2}, \dots, m^{\alpha_{n_a}}\}$ — i -я совокупность сетевых узлов (i -й кластер сетевых узлов), $i = \overline{1, n}$, в данном случае переходим от n сетевых узлов к n кластерам этих сетевых узлов;

$\alpha = \{\alpha_v\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_a}\}$ — номера сетевых узлов в i -м кластере α_v , $v = \overline{1, n_a}$;

n_a — число узлов рассматриваемого i -го кластера;

n — общее число кластеров, в каждый из которых входит n_a узлов.

Алгоритм формирования кластеров информативных узлов

1. Интервал $[0, 1]$ (или $[0, 100]$) разбивается на n равных частей. Каждому интервалу будет соответствовать сетевой узел.

2. С помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) формируются совокупности из n_a сетевых узлов. Выбрасывается равномерно распределенное число n_a раз, номер сетевого узла равен номеру интервала, в который попало случайное число. Таким образом, формируется кластер из n_a сетевых узлов. Если в кластере какой-либо узел повторяется два раза, то выбрасывается еще случайное число и получается другой сетевой узел. Таким образом, формируется n кластеров по n_a узлов в каждом, при этом должно выполняться условие $n_a < n$.

3. Для каждого i -го кластера рассчитывается распознающая функция (5). Выбирается самое большое значение распознающей функции, которой будет соответствовать какой-то кластер (какая-то совокупность n_a сетевых узлов), и самое наименьшее значение распознающей функции кластера. Таким образом, сетевые узлы, входящие в кластер с наибольшей распознающей функцией, признаются наиболее информативными и поощряются за счет кластера с самыми неинформативными сетевыми узлами, которому соответствует наименьшее значение распознающей функции. Поощрение производится путем увеличения интервалов сетевых узлов самого за-

гуженного кластера за счет уменьшения интервалов сетевых узлов самого незагруженного кластера. Величина поощрения, как правило, выбирается в два раза меньше интервала, который соответствует сетевым узлам на первом шаге. На первом шаге все интервалы сетевых узлов равны. При выполнении второго шага интервалы сетевых узлов, входящих в самую загруженную совокупность, будут увеличены. Таким образом, каждому сетевому узлу уже будет соответствовать не равные интервалы. Одни будут больше, другие меньше. Далее с помощью ДСЧ определяются новые кластеры (совокупности) из n_a сетевых узлов, и процедура повторяется. Процедуры будут повторяться до тех пор, пока наиболее информативная совокупность (кластер) из n_a сетевых узлов не будет повторяться от шага к шагу.

4. Выводы и интерпретация по результатам расчетов. Находятся остальные $(n - 1)$ совокупности сетевых узлов (кластеры), у которых нормированная информативность уменьшается.

Таким образом, этот алгоритм формирования кластеров информативных узлов сети позволяет выделить самый информативный кластер сетевых узлов и $(n - 1)$ кластеров, информативность которых будет уменьшаться, последний кластер будет самым неинформативным по сравнению с другими рассматриваемыми кластерами.

Такой алгоритм выбора кластеров с наиболее информативными сетевыми узлами выгодно применять, особенно при формировании динамической структуры информативности сетевых узлов в рассматриваемой вычислительной сети в фиксированные промежутки времени, которая располагает большим числом узлов.

2. Расчетный пример формирования кластеров информативных сетевых узлов

На основе вычислительной активности в устройствах n сетевых узлов требуется построить кластеры наиболее информативных n_a узлов, $n_a < n$. По условиям исходных данных $n = 14$, $n_a = 5$ (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные по расчетной ситуации формирования информативных сетевых узлов

k	Сетевые узлы, $m^i_j, i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,l_i$														$t_k, k=1, \dots, K$
1	m^1_1	m^2_1	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_4	m^8_1	m^9_5	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_2	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_1=15.11$
2	m^1_1	m^2_1	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_5	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_2	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_2=15.22$
3	m^1_4	m^2_4	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_6	m^8_1	m^9_7	m^{10}_5	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_5	m^{14}_1	$t_3=15.33$
4	m^1_5	m^2_4	$m^3_{3,6}$	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_6	m^8_1	m^9_7	m^{10}_5	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_4=15.44$
5	m^1_4	m^2_3	m^3_4	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_7	m^8_1	m^9_4	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_2	m^{14}_2	$t_5=15.55$
6	m^1_4	m^2_3	m^3_4	m^4_2	m^5_2	m^6_4	m^7_7	m^8_4	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_6=16.06$
7	m^1_4	m^2_4	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_7	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_2	m^{14}_1	$t_7=16.17$
8	m^1_4	m^2_3	m^3_2	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_7	m^8_4	m^9_4	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_3	m^{14}_1	$t_8=16.28$
9	m^1_1	m^2_5	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_9=16.39$
10	m^1_2	m^2_1	m^3_3	m^4_1	m^5	m^6_1	m^7_2	m^8	m^9_2	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{10}=16.50$
11	m^1_1	m^2_1	m^3_3	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_5	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_2	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{11}=17.01$
12	m^1_1	m^2_1	m^3_3	m^4_2	m^5	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{12}=17.12$
13	m^1_1	m^2_1	m^3_2	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_2	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{13}=17.23$
14	m^1_1	m^2_5	m^3_1	m^4_3	m^5_1	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_1	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{14}=17.34$
15	m^1_4	m^2_1	m^3_4	m^4_2	m^5_4	m^6	m^7_1	m^8_5	m^9_5	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_4	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{15}=17.45$
16	m^1_4	m^2_3	m^3_4	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_2	m^8_5	m^9_2	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{16}=17.56$
17	m^1_4	m^2_1	m^3_4	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_4	m^9_7	m^{10}_2	m^{11}_2	m^{12}_3	m^{13}_4	m^{14}_2	$t_{17}=18.07$
18	m^1_4	m^2_1	m^3_5	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_4	m^9_7	m^{10}_2	m^{11}_2	m^{12}_3	m^{13}_4	m^{14}_2	$t_{18}=18.18$
19	m^1_4	m^2_4	m^3_3	m^4_2	m^5_3	m^6_1	m^7_7	m^8_4	m^9_7	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_2	m^{14}_1	$t_{19}=18.29$
20	m^1_4	m^2_2	m^3_6	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_1	m^9_7	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_2	m^{14}_2	$t_{20}=18.40$
21	m^1_3	m^2_2	m^3_5	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_1	m^9_4	m^{10}_2	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_2	m^{14}_2	$t_{21}=18.51$

Продолжение таблицы

k	Сетевые узлы, $m^i_j, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, l_i$														$t_k, k = 1, \dots, K$
22	m^1_4	m^2_1	m^3_3	m^4_1	m^5_2	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{22}=19.02$
23	m^1_1	m^2_2	m^3_5	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{23}=19.13$
24	m^1_5	m^2_2	m^3_5	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_2	m^{14}_1	$t_{24}=19.24$
25	m^1_4	m^2_4	m^3_3	m^4_2	m^5_3	m^6_1	m^7_7	m^8_4	m^9_7	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_2	m^{14}_1	$t_{25}=19.35$
26	m^1_1	m^2_2	m^3_5	m^4_2	m^5_3	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_7	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{26}=19.46$
27	m^1_1	m^2_2	m^3_5	m^4_2	m^5_5	m^6_1	m^7_2	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{27}=19.57$
28	m^1_4	m^2_3	m^3_5	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_5	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{28}=20.08$
29	m^1_1	m^2_2	m^3_5	m^4_1	m^5_2	m^6_4	m^7_9	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_1	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{29}=20.19$
30	m^1_2	m^2_1	m^3_3	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_8	m^8_5	m^9_2	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{30}=20.30$
31	m^1_1	m^2_5	m^3_4	m^4_2	m^5_5	m^6_1	m^7_3	m^8_5	m^9_9	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{31}=20.41$
32	m^1_4	m^2_3	m^3_4	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_5	m^9_9	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{32}=20.52$
33	m^1_1	m^2_3	m^3_3	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_8	m^8_5	m^9_9	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{33}=21.03$
34	$m^1_{1,2,3}$	m^2_5	m^3_3	m^4_1	m^5_4	m^6_1	m^7_8	m^8_1	m^9_2	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_5	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{34}=21.14$
35	m^1_1	m^2_3	m^3_4	m^4_2	m^5_4	m^6_1	m^7_7	m^8_5	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_3	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{35}=21.25$
36	m^1_2	m^2_5	m^3_1	m^4_1	m^5_4	m^6_1	m^7_8	m^8_1	m^9_4	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{36}=21.36$
37	$m^1_{1,2}$	m^2_1	m^3_3	m^4_1	m^5_4	m^6_1	m^7_8	m^8_1	m^9_2	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_1	m^{13}_1	m^{14}_1	$t_{37}=21.47$
38	m^1_3	m^2_5	m^3_5	m^4_2	m^5_2	m^6_1	m^7_7	m^8_1	m^9_7	m^{10}_1	m^{11}_2	m^{12}_5	m^{13}_3	m^{14}_1	$t_{38}=21.58$

Характеристика расчетной ситуации:

1. Число сетевых узлов $n = 14$, число информативных узлов в кластере $n_a = 5$.
 2. Расчетное время $t_{\text{расч}} = T - t_0$.
 3. Дискретные моменты времени t_k для фиксации активности j -го устройства сетевых узлов в моменты времени $t_k = t_0 + \Delta \cdot k, k = 1, 2, \dots, K$.
 4. Характеристика наполнения сетевых узлов устройствами: $l_1 = l_2 = l_5 = l_{12} = l_{13} = 5, l_3 = 6, l_4 = l_8 = l_{10} = 3, l_7 = 9, l_9 = 7, l_6 = l_{11} = l_{14} = 2$.
- Итого в рассматриваемой сети **62** устройства, распределенных по 14-и сетевым узлам. 5. Временные характеристики: 1) начальный момент времени $t_0 = 15.00$, конечный момент времени $T = 21.58$ (~ 7 час); 2) расчетное время $t_{\text{расч}} = 418$ мин; 3) временной интервал $\Delta = 11$ мин, $k = 1, \dots, K, K = 38$.

Порядок построения кластера информативных сетевых узлов

1. Уяснение исходных данных и сущности постановки задачи по построению кластеров наиболее информативных узлов.

Рассматриваются сетевые узлы вычислительной сети, в табл. 1 их представлено 14. Каждому устройству сетевого узла соответствует временной интервал Δ по таблице. Для 34-го временного интервала первого сетевого узла активны 1-е, 2-е и 3-е устройства, а 37-го временного интервала активны 1-е и 2-е устройства. Учитывая это, для первого узла будет всего активно 41 устройство. Аналогичная ситуация может наблюдаться и для других сетевых узлов.

Сущность постановки задачи заключается в выявлении наиболее активных в информативном плане сетевых узлов в сети. По условию задачи количество таких узлов

в выделяемой наиболее информативной совокупности (кластере) должно быть $n_a = 5$. Наиболее востребован узел, для которого наблюдается наибольшее изменение вычислительной активности (информативности), т.е. узел, который несет наибольшую информативную нагрузку при работе с данными. Таким образом, задача сводится к ранжированию сетевых узлов по информативности и отбору наиболее важных узлов, $n_a = 5$, с наибольшим коэффициентом информативности (4).

2. Расчет информативности для каждого сетевого узла.

Для первого сетевого узла m^1 в соответствии с исходными данными имеем 5 видов устройств: $m^1_1, m^1_2, m^1_3, m^1_4, m^1_5$. Для каждой k -й реализации фиксируется наиболее загруженное в вычислительном плане устройство узла. Реализация формализуется вектором, выражение (1).

Из общей совокупности устройств i -го сетевого узла выберем устройство, для которого выполняется условие

$$\max_j \left(\sum_{k=1}^K m_{k,j}^i \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l_i},$$

номер наиболее загруженного устройства обозначается как q . Каждый узел можно представить вектором \bar{m}^i размерностью $1 \times l_i$, где все его составляющие нули, а значение, соответствующее наиболее нагруженному устройству — 1. Тогда для первого узла вектор $\bar{m}^1 = (10000)$, для второго $\bar{m}^2 = (10000)$, третьего $\bar{m}^3 = (001000)$ и т.д. Такое представление удобно в плане визуализации наиболее активного в вычислительном плане устройства в составе сетевого узла. Для первого узла $q = 1$, для второго $q = 1$, для третьего $q = 3$ и т.д. (рис. 2, табл. 2).

В табл. 2 представлены результаты расчета информативности всех 14 сетевых узлов.

3. Выбор заданного количества сетевых узлов ($n_a = 5$) из общей совокупности узлов сети ($n = 14$). Процедура выбора будет заключаться в реализации алгоритма формирования кластеров информативных узлов.

Шаг 1

Интервал $[0,1]$ разбивается на 14 интервалов величиной 0,071 ($1/14 = 0,071$). Следует отметить, что последний

интервал будет несколько больше (0,077), что обусловлено небольшой погрешностью при вычислениях. Получаем 14 равных интервалов, каждому интервалу соответствует сетевой узел (шаг 1 табл. 2, рис. 2).

С помощью ДСЧ формируются векторы случайных величин размерностью 5×1 в соответствии с количеством сетевых узлов в кластере $n_a = 5$. На рис. 2 показано, для примера, 7 таких векторов. Если в интервал попадало два, и более, случайных величин, то моделировалось новое случайное число, на рисунке такие числа показаны в скобках после каждого вектора. Таким образом, добивались того, что в кластере не было повторяющихся узлов. Для наглядности номера сетевых узлов и граничные значения интервалов представлены матрицей F размерностью 14×2 . При расчетах использовался авторский датчик случайных величин [25], представленный программным модулем с начальными параметрами: константы $W, W1$ и количество выбрасываемых случайных величин n (в примере получено 550 равномерно распределенных случайных величин). Использование такого ДСЧ в демонстрационных расчетах очень удобно, т.к. последовательность случайных величин можно в любой момент восстановить и проверить правильность расчетов, что очень важно при отладке программы. Количество совокупностей (кластеров) выбирается 14 для примера.

Таблица 2

Результаты промежуточных расчетов

Процедура расчета	Сетевой узел													
	m^1	m^2	m^3	m^4	m^5	m^6	m^7	m^8	m^9	m^{10}	m^{11}	m^{12}	m^{13}	m^{14}
\bar{m}^i	10000	10000	0010 00	010	01000	10	00000 0100	100	00010 00	100	10	00100	1000 0	10
ρ	83	71	101	68	83	37	122	109	110	59	38	71	112	38
N_i	41	38	39	38	35	37	38	37	35	35	38	32	37	38
ρ	2,024	1,868	2,59	1,789	2,371	1,0	3,211	2,946	3,143	1,686	1,0	2,219	3,027	1,0
Шаг 1	0,0- 0,071	0,071- 0,142	0,142 -0,213	0,213- 0,284	0,284- 0,355	0,355- 0,426	0,426- 0,497	0,497- 0,568	0,568- 0,639	0,639- 0,71	0,71- 0,781	0,781- 0,852	0,852- 0,923	0,923- 1,0
Шаг 2	0,0- 0,071	0,071- 0,142	0,142 -0,213	0,213- 0,244	0,244- 0,315	0,315- 0,386	0,386- 0,457	0,457- 0,568	0,568- 0,639	0,639- 0,71	0,71- 0,741	0,741- 0,852	0,852- 0,963	0,963- 1,0
Шаг 3	0,0- 0,071	0,071- 0,102	0,102 -0,173	0,173- 0,204	0,204- 0,275	0,275- 0,306	0,306- 0,377	0,377- 0,528	0,528- 0,639	0,639- 0,750	0,75- 0,781	0,781- 0,852	0,852- 1,0	1,0-1,0

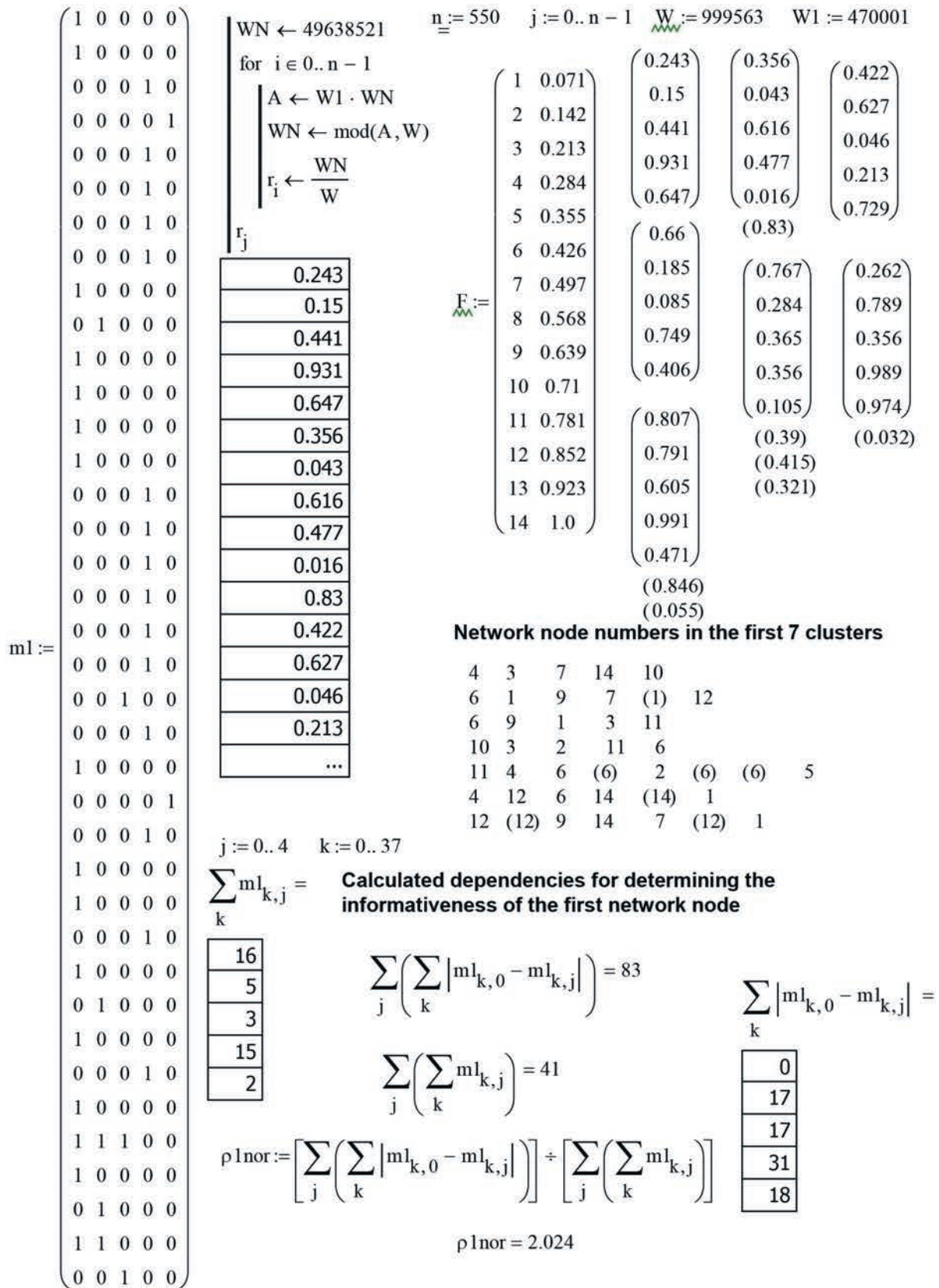


Рис. 2. Расчетный модуль в системе Mathcad

Порядок формирования совокупностей (кластеров) сетевых узлов.

1. Моделируется 5 случайных чисел: 0,243; 0,15; 0,441; 0,931; 0,647. Число 0,243 располагается на участке сетевого узла m^4 , $0,15 - m^3$, $0,441 - m^7$, $0,931 - m^{14}$, $0,647 - m^{10}$ (см. рис. 2).

2. Моделируется 5 случайных чисел: 0,356; 0,043; 0,616; 0,477; 0,016 (0,83). Число 0,356 располагается на участке сетевого узла m^6 , $0,043 - m^1$, $0,616 - m^9$, $0,477 - m^7$, $0,016 - m^1$ (т.к. был повтор сетевого узла m^1 , еще раз выбрасывается случайное число $0,83 - m^{12}$) и т.д.

Аналогично получают и остальные совокупности (кластеры) сетевых узлов:

3. $m^6 m^9 m^1 m^3 m^{11}$; 4. $m^{10} m^3 m^2 m^{11} m^6$; 5. $m^{11} m^4 m^6 m^2 m^5$;
6. $m^4 m^{12} m^6 m^{14} m^1$; 7. $m^{12} m^9 m^{14} m^7 m^1$; 8. $m^6 m^{13} m^{14} m^{10} m^9$;
9. $m^{13} m^9 m^{10} m^{14} m^{11}$; 10. $m^{14} m^8 m^{12} m^7 m^5$; 11. $m^8 m^{13} m^{12} m^7 m^6$;
12. $m^{11} m^{13} m^4 m^{14} m^5$; 13. $m^2 m^7 m^3 m^{11} m^4$; 14. $m^7 m^{11} m^6 m^{14} m^4$.

Для каждой совокупности (каждого кластера) сетевых узлов рассчитывается распознающая функция (5). Для первого кластера сетевых узлов, $m^4 m^3 m^7 m^{14} m^{10}$, распознающая функция равна 10,276 ($1,789+2,59+3,211+1,0+1,686 = 10,276$). Для всех 14 кластеров сетевых узлов распознающие функции имеют следующие значения:

- 1) 10,276; 2) 11,597; 3) 9,757; 4) 8,144; 5) 8,028;
- 6) 8,032; 7) 11,597; 8) 9,856; 9) 9,856; 10) 11,747;
- 11) 12,403; 12) 9,187; 13) 10,458; 14) 8,0.

Шаг 2

Выбирается самое большое значение распознающей функции, оно будет соответствовать 11-й совокупности сетевых узлов и самое наименьшее — 14-я совокупность. Таким образом, сетевые узлы, входящие в 11-ю совокупность (11-й кластер) признаются наиболее информативными и поощряются за счет самой неинформативной 14-й совокупности (14-го кластера). Поощрение производится путем увеличения интервалов сетевых узлов самого информативного кластера за счет уменьшения интерва-

лов сетевых узлов самого неинформативного кластера. Величина поощрения, как правило, выбирается в два раза меньше интервала, который соответствует сетевым узлам на первом шаге. На первом шаге все интервалы сетевых узлов равны.

Сетевые узлы, входящие в 11-й кластер признаются более информативными и поощряются за счет сетевых узлов 14-го кластера, т.е. к узлам $m^8 m^{13} m^{12} m^7 m^6$ добавляется «поощрение» 0,04, а у узлов $m^7 m^{11} m^6 m^{14} m^4$ 0,04 вычитается (шаг 2 табл. 2). При расчетах можно обнаружить некоторую погрешность для сетевого узла m^{14} , вызванную делением отрезка $[0,1]$ на 14 частей.

Далее с помощью ДСЧ определяются новые совокупности сетевых узлов (кластеры):

1. $m^7 m^{10} m^2 m^{12} m^8$; 2. $m^8 m^3 m^{10} m^{13} m^9$; 3. $m^{12} m^5 m^{11} m^{13} m^1$;
4. $m^8 m^9 m^{10} m^{13} m^7$; 5. $m^1 m^6 m^{12} m^9 m^2$; 6. $m^{12} m^{11} m^{10} m^7 m^1$;
7. $m^{12} m^7 m^3 m^{11} m^4$; 8. $m^{13} m^8 m^9 m^{11} m^7$; 9. $m^{13} m^8 m^2 m^{11} m^5$;
10. $m^{12} m^{14} m^2 m^4 m^3$; 11. $m^2 m^7 m^6 m^{14} m^{12}$; 12. $m^7 m^4 m^1 m^{10} m^2$;
13. $m^{13} m^2 m^6 m^{12} m^7$; 14. $m^4 m^{13} m^6 m^7 m^{12}$.

Для всех 14-и кластеров сетевых узлов рассчитываются распознающие функции:

- 1) 11,93; 2) 13,392; 3) 10,641; 4) 14,013; 5) 10,254;
- 6) 10,14; 7) 10,809; 8) 13,327; 9) 11,212; 10) 9,466;
- 11) 9,298; 12) 10,578; 13) 11,325; 14) 11,246.

Опять выделяется наиболее информативный 4-й кластер — $m^8 m^9 m^{10} m^{13} m^7$ и не информативный — $m^2 m^7 m^6 m^{14} m^{12}$. В соответствии с ними интервалы шага 2 преобразуются в интервалы шага 3 (табл. 2).

В табл. 3 приведены результаты расчетов до шестого шага включительно. Наиболее информативная совокупность сетевых узлов $m^3 m^7 m^8 m^9 m^{13}$ начала повторяться с пятого шага.

4. Выводы и интерпретация по результатам расчетов.

Полученная совокупность сетевых узлов является искомой. Такую схему формирования наиболее информативных сетевых узлов, в данном случае пять узлов, выгодно применять особенно при формировании структуры

Таблица 3

Лучшие сочетания сетевых узлов

Шаг	U_{α}^i (сетевые узлы)													
	m^1	m^2	m^3	m^4	m^5	m^6	m^7	m^8	m^9	m^{10}	m^{11}	m^{12}	m^{13}	m^{14}
1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
4	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
5	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
6	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0

Таблица 4

Наиболее информативные кластеры (совокупности) сетевых узлов

m^1	m^2	m^3	m^4	m^5	m^6	m^7	m^8	m^9	m^{10}	m^{11}	m^{12}	m^{13}	m^{14}	S
0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14,917
0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14,698
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	14,546
1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14,351
0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14,195
0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14,116
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	14,013
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	13,327
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	13,327
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	13,327

Calculation of the total information content coefficient

$$\rho_{inorm} := (2.024 \ 1.868 \ 2.59 \ 1.789 \ 2.371 \ 1.0 \ 3.211 \ 2.946 \ 3.143 \ 1.686 \ 1.0 \ 2.219 \ 3.027 \ 1.0)$$

$$m114 := \rho_{inorm}^T \quad mr := \text{sort}(m114) \quad k := 9..13$$

$$\sum_k mr_k = 14.917 \quad mr_9 := 2.371 \quad \sum_k mr_k = 14.698 \quad mr_9 := 2.219 \quad \sum_k mr_k = 14.546 \quad mr_9 := 2.024$$

$$\sum_k mr_k = 14.351 \quad mr_9 := 1.868 \quad \sum_k mr_k = 14.195 \quad mr_9 := 1.789 \quad \sum_k mr_k = 14.116 \quad mr_9 := 1.686$$

$$\sum_k mr_k = 14.013 \quad mr_9 := 1.0 \quad \sum_k mr_k = 13.327$$

Рис. 3. Расчетный модуль в системе Mathcad по получению $\sum_{norm \text{ узл}}^n$ для первых 10 наиболее информативных кластеров сетевых узлов ($n_a = 5$)

информационных и вычислительных сетей, для которых имеется очень большое количество узлов, состоящих из разнообразных устройств.

Если расположить кластеры по возрастанию их суммарного коэффициента информативности (табл. 4, рис. 3), то видно, что по составу они отличаются всего на один сетевой узел, т. е. теряется вариантность рассматриваемых кла-

стеров. В этом плане повышается значимость предлагаемого алгоритма, который как раз и обеспечивает вариантное наполнение сети кластерами информативных узлов (см., например, табл. 5). Если построить пространство кластеров информативных узлов в соответствии и табл. 5 (рис. 4), то можно увидеть, что структура такого пространства — структура перекрытий (рис. 1).

Таблица 5

Самый информативный кластер и первые 4 кластера информативных узлов в расчетном примере, шаг 2

m^1	m^2	m^3	m^4	m^5	m^6	m^7	m^8	m^9	m^{10}	m^{11}	m^{12}	m^{13}	m^{14}	S
0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	14.917
0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	11.93
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	13.392
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	10.641
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	14.013

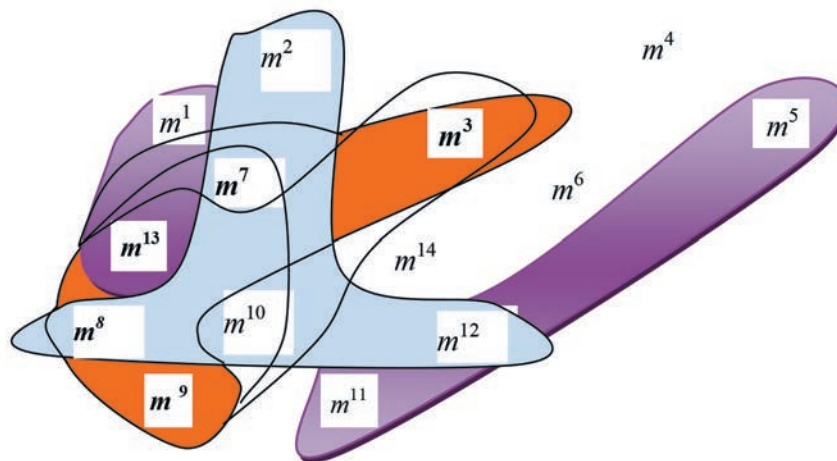


Рис. 4. Пространство кластеров информативных узлов в расчетном примере, шаг 2

Имея такое представление кластеров информативных сетевых узлов можно делать выводы, где в сети наиболее интенсивно ведется интегрированная и распределенная обработка данных за расчетное время.

Заключение

В статье показаны актуальность разработки методического аппарата по формированию информативных сетевых узлов, их кластеров, возможные виды пространств информативных узлов в вычислительных сетях, что дает возможность выделять сетевые структуры, в которых нарабатываются большие данные. Проведены обзоры интегрированной и распределенной обработки данных в сетевых структурах с учетом интеллектуального и когнитивного анализов данных, применение метрик расстояний, учитывающих разнородность данных. На основе анализа известных моделей и алгоритмов по определению важных, влиятельных, узлов в разнообразных сетевых структурах представлена целевая установка исследования, в соответствии с которой получены следующие результаты.

1. Математическая модель оценки информативности сетевого узла, учитывающая особенности данных по активности вычислительных устройств за расчетное время.
2. Алгоритм формирования кластеров информативных узлов с помощью теорий распознавания образов и имитационного моделирования.
3. Расчетный пример, иллюстрирующий формирование информативных кластеров и их пространств, с соответствующими выводами и интерпретацией результатов расчета.

Элементом новизны исследования является учет особенностей данных по вычислительной активности устройств сетевого узла на основе использования метрики Манхэттена при формировании информативности узла.

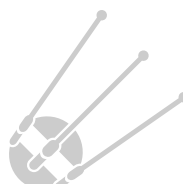
Отметим, что для определения исходных параметров с целью исследования характеристик реальных систем и выделения информативных кластеров целесообразно воспользоваться данными систем интеллектуального мониторинга и управления центрами распределенной обработки данных [26]. Для прогнозного определения характеристик оперативности распределенной обработки данных в рассмотренных сетевых структурах на основе выделения информативных кластеров, на наш взгляд, целесообразно использовать методы и модели исследования не Марковских систем и сетей массового обслуживания [27].

Результаты исследования могут быть использованы при моделировании динамики изменения информативности сетевых структур во времени, а также планирования профилактических мероприятий по поддержанию устойчивого функционирования сетевых структур, их информационной безопасности, при наработке больших данных.

Литература

1. Shamsuddin N.R., Mahat N.I. Investigation on the Cluste-rability of Heterogeneous Dataset by Retaining the Scale of ariables // Mathematics and Statistics. 2019. Vol. 7. No. 4A. Pp. 49–57.
2. Bochkov A., Pervukhin D., Grafov A., Nikitina V. Construction of Lorenz Curves Based on Empirical Distribution Laws of Economic Indicators // Mathematics and Statistics. 2020. Vol. 8. No. 6. Pp. 637–644.
3. Erna Qi, Xingrui Yang, Zongjun Wang. Data mining and visualization of data-driven news in the era of big data // Cluster Computing. 2019. Vol. 22. Pp. 10333–10346.
4. Jing Hu, Xianbin Xu. Research on real-time network data mining technology for big data//EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2019. Vol. 2019. Article No.: 139. Pp. 1–6.
5. Mu-Jung Huang, Hsiu-Shu Sung, Tsu-Jen Hsieh, Ming-Cheng Wu, Shao-Hsi Chung. Applying data-mining techniques for discovering association rules // Soft Computing. 2020. Vol. 24. Pp. 8069–8075.

6. Yuan Guo, Nan Wang, Ze-Yin Xu, Kai Wu. The internet of things-based decision support system for information processing in intelligent manufacturing using data mining technology // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 142. Pp. 106630.
7. Ellouzi H., Ltifi H., Ayed M.B. Multi-agent modelling of decision support systems based on visual data mining // *Multiagent & Grid Systems*. 2017. Vol. 13. Issue 1. Pp. 31–45.
8. Ning Ma, Fu Weina. Feature fusion analysis of big cognitive data // *Multimedia Tools and Applications: An International Journal*. 2020. Vol. 79. Issue 9–10. Pp. 5461–5475.
9. Wei Xiao, Zhang Jun, Zeng Daniel Dajun, Li Qing. A multi-level text representation model within background knowledge based on human cognitive process for big data analysis // *Cluster Computing: The Journal of Networks, Software Tools and Applications*. 2016. Vol. 19. Issue 3. Pp. 1475–1487.
10. Jin Hu. Data processing model and performance analysis of cognitive computing based on machine learning in Internet environment // *Soft Computing — A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications*. 2019. Vol. 23. Issue 19. Pp. 9141–9151.
11. Yingxu Wang, Jun Peng. Big Data Analytics: A Cognitive Perspectives // *International Journal of Cognitive Informatics & Natural Intelligence*. 2017. Vol. 11. Issue 2. Pp. 41–56.
12. Ning Ma, Fu Weina. Feature fusion analysis of big cognitive data. *Multimedia Tools and Applications // An International Journal*. 2020. Vol. 79. Issue 9–10. Pp. 5461–5475.
13. Mei Jian-Ping, Lv Huajiang, Yang Lianghuai, Li Yanjun. Clustering for heterogeneous information networks with extended star-structure // *Data Mining & Knowledge Discovery*. 2019. Vol. 33. Issue 4. Pp. 1059–1087.
14. De Maesschalk R., Jouan-Rimbaud D., Massart D. L. The Mahalanobis distance // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2000. Vol. 50. Pp. 1–18.
15. Ahmad A., Khan S. S. Survey of State-of-the-Art Mixed Data Clustering Algorithms // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 31883–31902.
16. Foss A. H., Markatou M., Ray B. Distance Metrics and Clustering Methods for Mixed-Type Data: Clustering Methods for Mixed-type Data // *International Statistical Review*. 2018. Vol. 87. No. 7.
17. Mengdi Huai, Chenglin Miao, Yaliang Li, Qiuling Suo, Lu Su, Aidong Zhang. Learning Distance Metrics from Probabilistic Information // *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. 2020. Vol. 14. Issue 5. Pp. 1–33.
18. Bian Tian, Deng Yong. Identifying influential nodes in complex networks: A node information dimension approach // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018. Vol. 28. Issue 4. P. 043109.
19. Pu Jun, Chen Xiaowu, Wei Daijun, Liu Qi, Deng Yong. Identifying influential nodes based on local dimension // *EPL (Europhysics Letters)*. 2014. Vol. 107. Issue 1. Pp. 10010.
20. Zhang X., Zhu J., Wang Q., Zhao H. Identifying influential nodes in complex networks with community structure // *Knowledge-Based Systems*. 2013. Vol. 42. Pp. 74–84.
21. infang Sheng, Jiafu Zhu, Yayun Wang, Bin Wang, Zheng'ang Hou. Identifying Influential Nodes of Complex Networks Based on Trust-Value // *Algorithms*. 2020. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/a13110280>
22. Zhang J., Wang B., Sheng J., Dai J., Hu J., Chen L. Identifying Influential Nodes in Complex Networks Based on Local Effective Distance // *Information*. 2019. Vol. 10. Issue 10. P. 311.
23. Bian Tian, Jiantao Hu, Yong Deng. Identifying influential nodes in complex networks based on AHP // *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications*. 2017. Vol. 479. Pp. 422–436.
24. Hui Xu, Jianpei Zhang, Jing Yang, Lijun Lun. Identifying Important Nodes in Complex Networks Based on Multiattribute Evaluation // *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8268436>
25. Патент РФ 1381499. Датчик равномерно распределенных случайных чисел / Филюстин А.Е., Боев В.Д., Бочков А.П., Волков В.А., Голик Е.С. Заявл. 29.11.1985. Опубл. 15.03.1988. Бюл. № 10. 4 с.
26. Лохвицкий В.А., Хомоненко А.Д., Большаков М.А. О построении кибервизора системы интеллектуального мониторинга и управления центрами распределенной обработки данных // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2018. № 4. С. 9–13.
26. Гиндин С.И., Хомоненко А.Д., Яковлев В.В., Матвеев С.В. Модель оценивания оперативности распределенной обработки данных с учетом затрат на обеспечение информационной безопасности // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2013. № 4. С. 59–67.



MODEL OF FORMATION OF CLUSTERS OF INFORMATIVE NODES OF INTEGRATED AND DISTRIBUTED DATA PROCESSING IN A COMPUTER NETWORK

ALEKSANDR P. BOCHKOV

St. Petersburg, Russia, kostpea@mail.ru

ANATOLIY D. KHOMONENKO

St. Petersburg, Russia, khomon@mail.ru

ANATOLIY M. BARANOVSKY

St. Petersburg, Russia, bamvka@mail.ru

KEYWORDS: computer network; cluster; informative network node; network node devices; integrated and distributed data processing; Manhattan metric.

ABSTRACT

The spread of network and computational technologies is relevant when solving applied issues in various areas of human activity. One of these issues is the accumulation of data in network and computing structures. The solution of the corresponding problem is made on the basis of integrated and distributed data processing in computer networks, which is characterized by the use of intelligent and cognitive data analysis, as well as distance metrics. The purpose of this study is to develop a mathematical model that takes into account the peculiarities of the computing activity of network node devices to calculate its informative load for the estimated time and the formation of clusters of informative nodes (their spaces) in computer networks. On the basis of data mining, it is proposed to consider deviations in the computing activity of network devices as information content of a network node, the ability to generate big data. In further modeling, the methods of the theories of pattern recognition and simulation were used, as well as the distance metrics toolkit, which allow to formalize heterogeneous data, taking into account the peculiarities of computer networks. An element of novelty of the proposed mathematical model is that it takes into account the peculiarities of the data of the computing activity of network node devices for the estimated time by using the Manhattan metric. A computational example of the formation of clusters of informative network nodes and their spaces is given. In the calculations, the author's sensor for modeling random variables is used, which significantly increases the quality of calculations and their clarity. The practical significance of the proposed mathematical model lies, first of all, in the fact that it becomes possible to track the dynamics of changes in information content in network structures with a large number of nodes. This makes it possible to control data processing, in addition, to increase the efficiency of computer networks by taking preventive measures to maintain their technical condition and information security.

REFERENCES

1. Shamsuddin N.R., Mahat N.I. Investigation on the Clusterability of Heterogeneous Dataset by Retaining the Scale of Variables. *Mathematics and Statistics*. 2019. Vol. 7. No. 4A. Pp. 49-57.
2. Bochkov A., Pervukhin D., Grafov A., Nikitina V. Construction of Lorenz Curves Based on Empirical Distribution Laws of Economic Indicators. *Mathematics and Statistics*. 2020. Vol. 8. No. 6. Pp. 637-644.
3. Erna Qi, Xingrui Yang, Zongjun Wang. Data mining and visualization of data-driven news in the era of big data. *Cluster Computing*. 2019. Vol. 22. Pp. 10333-10346.
4. Jing Hu, Xianbin Xu. Research on real-time network data mining technology for big data. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019. Vol. 2019. Article number: 139. Pp. 1-6.
5. Mu-Jung Huang, Hsiu-Shu Sung, Tsu-Jen Hsieh, Ming-Cheng Wu, Shao-Hsi Chung. Applying data-mining techniques for discovering association rules. *Soft Computing*. 2020. Vol. 24. Pp. 8069-8075.
6. Yuan Guo, Nan Wang, Ze-Yin Xu, Kai Wu. The internet of things-based decision support system for information processing in intelligent manufacturing using data mining technology. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 142. Pp. 106630.
7. Ellouzi H., Ltfi H., Ayed M.B. Multi-agent modelling of decision support systems based on visual data mining. *Multiagent & Grid Systems*. 2017. Vol. 13. Issue 1. Pp. 31-45.
8. Ning Ma, Fu Weina. Feature fusion analysis of big cognitive data. *Multimedia Tools and Applications: An International Journal*. 2020. Vol. 79. Issue 9-10. Pp. 5461-5475.
9. Wei Xiao, Zhang Jun, Zeng Daniel Dajun, Li Qing. A multi-level text representation model within background knowledge based on human cognitive process for big data analysis. *Cluster Computing: The Journal of Networks, Software Tools and Applications*. 2016. Vol. 19. Issue 3. Pp. 1475-1487.
10. Jin Hu. Data processing model and performance analysis of



cognitive computing based on machine learning in Internet environment. *Soft Computing – A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications*. 2019. Vol. 23. Issue 19. Pp. 9141-9151.

11. Yingxu Wang, Jun Peng. Big Data Analytics: A Cognitive Perspectives. *International Journal of Cognitive Informatics & Natural Intelligence*. 2017. Vol. 11. Issue 2. Pp. 41-56.

12. Ning Ma, Fu Weina. Feature fusion analysis of big cognitive data. Multimedia Tools and Applications. *An International Journal*. 2020. Vol. 79. Issue 9-10. Pp. 5461-5475.

13. Mei Jian-Ping, Lv Huajiang, Yang Lianghuai, Li Yanjun. Clustering for heterogeneous information networks with extended star-structure. *Data Mining & Knowledge Discovery*. 2019. Vol. 33. Issue 4. Pp. 1059-1087.

14. De Maesschalk R., Jouan-Rimbaud D., Massart D.L. The Mahalanobis distance. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2000. Vol. 50. Pp. 1-18.

15. Ahmad A., Khan S.S. Survey of State-of-the-Art Mixed Data Clustering Algorithms. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 31883-31902.

16. Foss A.H., Markatou M., Ray B. Distance Metrics and Clustering Methods for Mixed-Type Data: Clustering Methods for Mixed-type Data. *International Statistical Review*. 2018. Vol. 87. No. 7.

17. Mengdi Huai, Chenglin Miao, Yaliang Li, Qiuling Suo, Lu Su, Aidong Zhang. Learning Distance Metrics from Probabilistic Information. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. 2020. Vol. 14. Issue 5. Pp. 1-33.

18. Bian Tian, Deng Yong. Chaos. Identifying influential nodes in complex networks: A node information dimension approach. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2018. Vol. 28. Issue 4. P. 043109.

19. Pu Jun, Chen Xiaowu, Wei Daijun, Liu qi, Deng Yong. Identifying influential nodes based on local dimension. *EPL (Europhysics Letters)*. 2014. Vol. 107. Issue 1. Pp. 10010.

20. Zhang X., Zhu J., Wang Q., Zhao H. Identifying influential nodes in complex networks with community structure. *Knowledge-Based Systems*. 2013. Vol. 42. Pp. 74-84.

21. Jinfang Sheng, Jiafu Zhu, Yayun Wang, Bin Wang, Zheng'ang Hou. Identifying Influential Nodes of Complex Networks Based on

Trust-Value. *Algorithms*. 2020. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/a13110280>

22. Zhang J., Wang B., Sheng J., Dai J., Hu J., Chen L. Identifying Influential Nodes in Complex Networks Based on Local Effective Distance. *Information*. 2019. Vol. 10. Issue 10. P. 311.

23. Bian Tian, Jiantao Hu, Yong Deng. Identifying influential nodes in complex networks based on AHP. *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications*. 2017. Vol. 479. Pp. 422-436.

24. Hui Xu, Jianpei Zhang, Jing Yang, Lijun Lun. Identifying Important Nodes in Complex Networks Based on Multiattribute Evaluation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8268436>

25. Patent RF 1381499. *Datchik ravnomerno raspredelennyh sluchajnyh chisel* [Sensor of evenly distributed random numbers]. Filyustin A.E., Boev V.D., Bochkov A.P., Volkov V.A., Golik E.S. Declared. 29.11.1985. Published 15.03.1988. Bulletin No. 10. 4 p. (In Rus)

26. Lokhvitskii, V.A., Khomonenko, A.D., Bol'shakov, M.A. On the Construction of a Cybervisor for the Intelligent Monitoring and Control of Data Centers. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2019. No. 53(8). Pp. 870-873.

27. Gindin S.I., Khomonenko A.D., Matveev S.V. Model' ocenivaniya operativnosti raspredelennoj obrabotki dannyh s uchetom zatrat na obespechenie informacionnoj bezopasnosti [Model Evaluation of Efficiency Distributed Data Processing Including the Spending of Ensuring the Information Security]. *Problemy Informatsionnoi Bezopasnosti, Komp'yuternye Sistemy*. 2013. No. 4. Pp. 59-67. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Bochkov A.P., PhD, Professor, Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university;

Khomonenko A.D., PhD, Professor, Head of the Department of Information and Computing systems of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, professor of Military space academy of A.F. Mozhaysky;

Baranovsky A. M., PhD, Docent, Associate Professor of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, Associate Professor of Military space academy of A.F. Mozhaysky.

For citation: Bochkov A.P., Khomonenko A.D., Baranovsky A. M. Model of formation of clusters of informative nodes of integrated and distributed data processing in a computer network. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 44-57. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-44-57 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-58-66

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МАРШРУТА В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ДАНИЛЬЧЕНКО
Михаил Николаевич¹

МУРАВНИК
Андрей Борисович²

АННОТАЦИЯ

Работа состоит из введения, постановки задачи, описания используемого метода и исходных данных для моделирования, анализа результатов внедрения методов, заключения. Во введении обосновывается актуальность проблемы, заключающейся в необходимости построения маршрута в телекоммуникационной сети по нескольким показателям. Проведен анализ традиционных методов, а также предложен альтернативный метод с использованием искусственной нейронной сети Хопфилда. Цель работы состоит в реализации нейросетевого алгоритма для построения маршрута в автоматизированной системе для оценки возможностей его практического применения в реальных системах. В постановке задачи используются общие термины для математической формализации задачи построения маршрута; вводятся такие понятия, как неориентированный граф, дуга графа и стоимость дуги. В результате основная проблема маршрутизации формулируется как задача поиска пути от узла-отправителя к узлу-получателю с минимальными затратами, где минимальная стоимость - это сумма стоимости дуг, составляющих построенный путь. При описании используемого метода построения маршрута в автоматизированной системе приведены основные понятия (архитектура и характеристики) рассматриваемого подхода. Приведена последовательность модификации энергетической функции Ляпунова, идентифицирующей состояние нейронной сети Хопфилда, отмечены ее основные недостатки и дан окончательный вид энергетической функции в виде пяти слагаемых. В частности, первое слагаемое не только минимизирует общую стоимость канала в маршруте, принимая во внимание стоимость существующих каналов, но также учитывает все значения стоимости вокруг рассматриваемого узла. Второе слагаемое предотвращает включение отсутствующих линий в выбранный вариант маршрута. Третье слагаемое равно нулю, если количество входящих направлений связи равно количеству дуг в исходящем направлении, тогда как четвертое слагаемое обеспечивает способность нейронной сети сходиться к фактическому маршруту. Пятый член предотвращает появление петель на маршруте. В статье описана зависимость, определяющая динамику изменения входов нейронной сети Хопфилда. На основе приведенных выше зависимостей разработана структурная схема алгоритма функционирования искусственной нейронной сети для формирования маршрута в инфокоммуникационной системе. В результате имитационного моделирования даны рекомендации по выбору интервала инициализации исходных весов нейронов в сети, а также скорости обучения. В выводах сформулированы основные задачи, которые необходимо решить для использования нейросетевого подхода при построении маршрутов в реальных сетях, а также предложения по подтверждению эффективности рассматриваемого метода с точки зрения интегральных показателей системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм построения маршрута; сеть Хопфилда; энергия сети Хопфилда; динамическая система; вес связи нейрона; смещение нейрона; кратчайший путь.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., начальник отдела Акционерного общества «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия, m.n.danilchenko@sozvezdie.su

²д.ф-м.н., руководитель проекта Акционерного общества «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия, amuravnik@mail.ru

Для цитирования: Данильченко М.Н., Муравник А.Б. Нейросетевой подход к построению маршрута в автоматизированной системе управления специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 58-66. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-58-66

Введение

Стремительное развитие и усложнение инфокоммуникационных систем и технологий определяет повышение требований к скорости и качеству обмена информацией со стороны потребителей, что обуславливает актуальность решения задач по обеспечению эффективного использования сетевых ресурсов. При этом одной из ключевых является задача построения маршрутов в инфокоммуникационной системе (ИКС).

В общем случае расчет пути между узлами может осуществляться административно (статические маршруты), либо вычисляться при помощи алгоритмов маршрутизации, используя информацию о топологии и состоянии сети, порядок сбора которой регламентирован протоколами маршрутизации (динамические маршруты). В большинстве беспроводных сетей используются динамические протоколы маршрутизации, учитывающие изменение топологии сети. При этом одним из наиболее оптимальных алгоритмов построения маршрутов является алгоритм с учетом состояния каналов, в котором кратчайший путь рассчитывается путем анализа графа сети [1]. Наиболее эффективными из них являются алгоритмы Дейкстры и Беллмана-Форда, обладающие относительно невысокой вычислительной сложностью. Однако в рамках обеспечения качества предоставления услуг QoS (Quality of Service) обозначенные алгоритмы не позволяют получить приемлемого решения в условиях одновременной поддержки нескольких параметров (метрик) [2].

Перспективным подходом к решению задач построения маршрута с учетом состояния каналов является использование аппарата искусственных нейронных сетей, который обеспечивает возможность применения нескольких метрик, в том числе и нелинейных [3].

Целью работы является реализация нейросетевого алгоритма построения маршрута с использованием сети Хопфилда, а также выявление его преимуществ по сравнению с классическим алгоритмом Дейкстры.

1. Представление инфокоммуникационной сети в виде нейронной сети Хопфилда

Топология сети может быть представлена в виде неориентированного графа, описанного как $G=(V, E)$, где V — множество вершин (N узлов), а E — множество его ребер [4]. Матрица стоимости связей может быть записана как $C = [C_{ij}]$, где C_{ij} является стоимостью дуги от узла i до узла j , s является узлом источником, а d является узлом назначения (получателем). Для нескольких узлов назначения d_x определяется как набор назначения, где $d_x \in V$ и $x = \{1; \dots; N\}$.

Для каждой дуги (i, j) существует неотрицательное число $C_{i,j}$, которое называется стоимостью, представляющей собой задержку по времени, пропускную способность или нагрузку трафика канала от узла i к узлу j . Следует

отметить, что дуга (i, j) симметрична дуге (j, i) и $C_{ij} = C_{ji}$, поскольку сеть задается неориентированным графом.

Если ненаправленный путь P^{sd} для задачи маршрутизации определен, то упорядоченная последовательность узлов, соединяющих s и d , записывается как:

$$P^{sd} = (s, a, b, \dots, i, d), \quad (1)$$

где маршрут выглядит следующим образом:

$$(s \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow \dots \rightarrow i \rightarrow d). \quad (2)$$

Тогда общая стоимость этого пути (TC_{sd}) может быть представлена как:

$$TC_{sd} = C_{sa} + C_{ab} + \dots + C_{id}. \quad (3)$$

Таким образом, задача маршрутизации сводится к нахождению пути минимизирующему значение TC_{sd} .

Впервые использование нейронных сетей с обратными связями для решения задачи маршрутизации, в частности задачи коммивояжера, было предложено Хопфилдом и Танком [5–7].

Общий вид нейронной сети Хопфилда (Hopfield Neural Network — HNN) приведен на рисунке 1 [3].

Сеть представляет собой один слой нейронов, при этом выход нейрона соединен с входом каждого нейрона сети через синаптические веса. Нейрон представляет собой нелинейную функцию, как правило, сигмоиду, которая может быть выражена как:

$$V_i = g_i(U_i) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda \times U_i)}, \quad (4)$$

где λ — коэффициент, определяющий крутизну сигмоиды (как правило, $\lambda=1$); входные значения нейронов U_i учитывают внешние смещения (I_i) и могут быть представлены в виде:

$$U_i = I_i + \sum_{j=1}^N T_{i,j} \times V_j, \quad (5)$$

где $T_{i,j}$ — значения весов связей нейронов (j — номер нейрона, выход которого соединен с входом нейрона i).

В общем виде энергетическая функция сети Хопфилда может быть представлена выражением:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P C_{ij} \times V_i \times V_j + \sum_{i=1}^P I_i \times V_i, \quad (6)$$

где P , V_i , I_i — число нейронов в сети Хопфилда, соответствующее числу узлов сети, значения выхода и смещения i -го нейрона, соответственно, C_{ij} — значение стоимости канала в симметричной матрице (матрице стоимости), элементы главной диагонали которой равны нулю.

Уникальность этой сети заключается в том, что ее функционирование представляет собой именно процесс решения (своей внутренней) экстремальной задачи по ми-

нимизации функции энергии сети. Эволюция сети во времени — это движение в пространстве состояний в поисках минимума энергии и остановка в этой точке [8].

2. Алгоритм построения маршрута с использованием нейронной сети Хопфилда

Раух и *Винарски* в [9] представили алгоритм для поиска кратчайшего пути с использованием нейронных сетей. *Али* и *Камоун* в [10] модифицировали энергетическую функцию за счет введения дополнительных слагаемых, обеспечив быструю сходимость алгоритма к оптимальному решению. Энергетическая функция, предложенная *Али* и *Камоун*, имеет следующий вид [10]:

$$\begin{aligned}
 E = & \frac{\mu_1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{ij} V_{ij} + \frac{\mu_2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \rho_{ij} V_{ij} + \\
 & + \frac{\mu_3}{2} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ji} \right)^2 + \\
 & + \frac{\mu_4}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} (1 - V_{ij}) + \frac{\mu_5}{2} (1 - V_{ds}),
 \end{aligned} \quad (7)$$

где слагаемое с коэффициентом μ_1 влияет на скорость поиска минимальной стоимости передачи пакетов по маршруту, использование составляющей с коэффициентом μ_2 обусловлено учетом только существующих связей при выборе варианта маршрута. Слагаемое с коэффициентом μ_3 необходимо для выполнения условия сохранения потока в узле. Введение слагаемого с коэффициентом μ_4 обеспечивает способность нейронной сети сходиться к действительному маршруту. Слагаемое с коэффициентом μ_5 включает в себя узел источника и узел назначения для сформированного пути (где d, s — номера начального и конечного узлов в маршруте, соответственно).

Следует отметить, что алгоритм, построенный на минимизации энергетической функции (7), имеет собственное ограничение — примерно 20 узлов [8].

В процессе развития данного направления были предложены ряд модификаций энергетической функции Ляпунова [11], в результате чего была получена функция, лишенная недостатков предыдущих её модификаций:

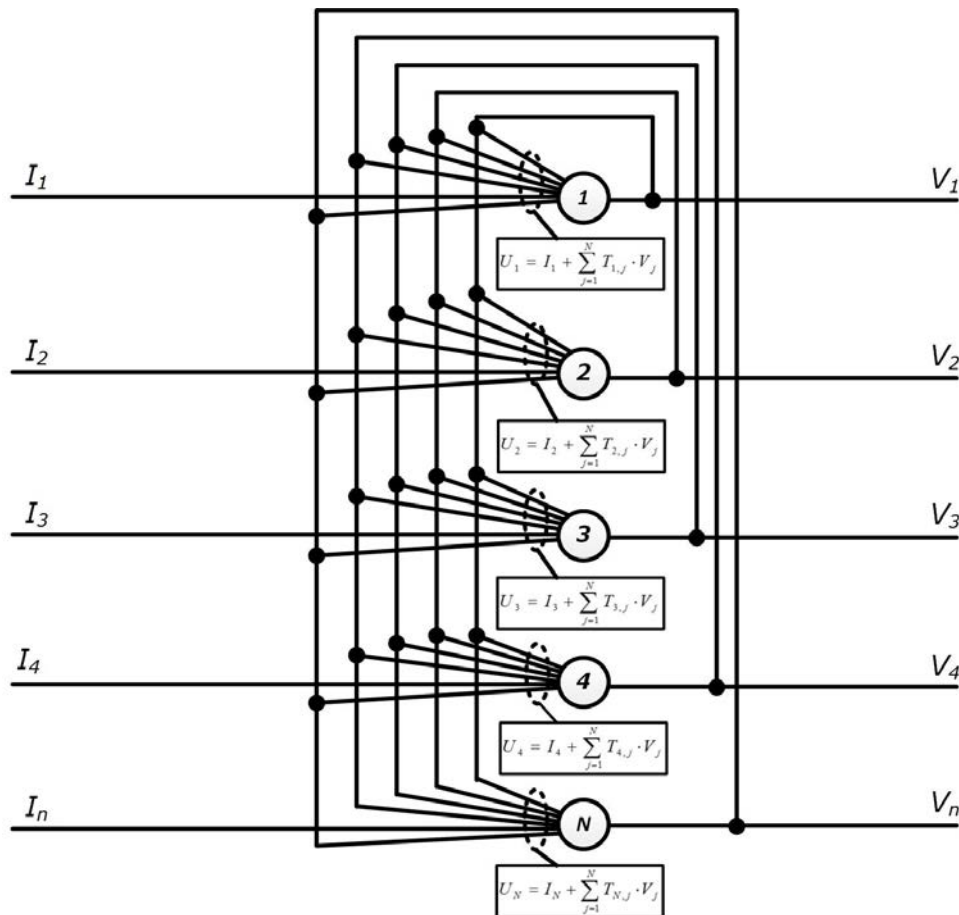


Рис. 1. Общая архитектура сети Хопфилда

$$\begin{aligned}
E = & \frac{\mu 1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \left(V_{ij} \sum_{k=1, k \neq i}^N (1 - C_{ik}) \times C_{ij} \right) + \frac{\mu 2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \rho_{ij} V_{ij} + \\
& + \frac{\mu 2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \rho_{ij} V_{ij} + \frac{\mu 3}{2} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ji} - \Phi_i \right)^2 + (8) \\
& + \frac{\mu 4}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} (1 - V_{ij}) + \frac{\mu 5}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \left(V_{ij} \sum_{k=1, k \neq j}^N V_{ki} \right),
\end{aligned}$$

где Φ_i — указывает на наличие информационного потока и определяется следующим образом:

$$\Phi_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i = s; \\ -1, & \text{если } i = d, i \in 1, \dots, n; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (9)$$

где n — количество узлов назначения; ρ — матрица $\rho = [\rho_{ij}]$ определена для каналов связи как:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если линия из узла } i \text{ в узел } j \text{ не существует;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

Кроме того, в отличие от выражения (6), в выражении (8) выходом нейронной сети в процессе её эволюции при построении маршрута представляется в виде двумерной матрицы, тем самым позволяя получать маршрут сразу, а не итеративно как предусматривает классическая сеть Хопфилда. Для расчета значений, подаваемых на вход нейрона в соответствии с выражением (6), для расчета весов связей и смещений нейронов используются выражения (11), (13), соответственно.

$$\begin{aligned}
T_{ij,kl} = & -\mu 3 \times \delta_{ik} + \mu 3 \times \delta_{jk} + \mu 3 \times \delta_{li} - \\
& -\mu 3 \times \delta_{jl} + \mu 4 \times \delta_{ik} \times \mu 3 \times \delta_{jl} - \frac{\mu 5}{2} \times \delta_{jk}, \quad (11)
\end{aligned}$$

где δ — символ Кронекера определяется как

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j, \\ 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad (12)$$

I_{ij} — матрица смещений, значения элементов которой рассчитывается с использованием выражения (8):

$$\begin{aligned}
I_{ij} = & -\frac{\mu 1}{2} \sum_{k=1, k \neq i}^N (1 - C_{ik}) \times C_{ij} - \frac{\mu 2}{2} \times \\
& \times \rho_{ij} + \mu 3 \times \Phi_i - \mu 3 \times \Phi_j - \frac{\mu 4}{2}. \quad (13)
\end{aligned}$$

В уравнении (8) слагаемое с коэффициентом $\mu 1$ не только минимизирует общую стоимость канала в маршруте с учетом стоимости существующих каналов, а также

учитывает все значения стоимости вокруг узла. Значения слагаемых с коэффициентами $\mu 2$, $\mu 3$ и $\mu 4$ идентичны значениям слагаемых, приведенных в предыдущем выражении. Слагаемое с коэффициентом $\mu 5$ предотвращает появление петель в маршруте.

Динамика изменения состояний нейронов сети Хопфилда сводится к следующему:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U_{ij}}{\partial t} = & -\frac{U_{ij}}{\tau} - \frac{\partial E}{\partial V_{ij}} = -\frac{U_{ij}}{\tau} - \frac{\mu 1}{2} \sum_{k=1, k \neq i}^N (1 - C_{ik}) \times C_{ij} - \frac{\mu 2}{2} \rho_{ij} - \\
& -\mu 3 \left(\sum_{k=1, k \neq i}^N (V_{ik} - V_{ki}) - \Phi_i \right) + \mu 3 \left(\sum_{k=1, k \neq j}^N (V_{jk} - V_{kj}) - \Phi_j \right) - \\
& - \frac{\mu 4}{2} (1 - 2V_{ij}) - \frac{\mu 5}{2} \sum_{k=1, k \neq i}^N V_{ki}. \quad (14)
\end{aligned}$$

Применяя уравнение Эйлера первого порядка к уравнению (14), динамика входов нейронов может быть представлена в виде выражения:

$$U_{ij}(t + \Delta t) = U_{ij}(t) + \Delta t \times \left(-U_{ij}(t) - \frac{\partial E}{\partial V_{ij}} \right). \quad (15)$$

Используя выражение (14) и (15), получим формулу для расчета значений входов нейронов на очередном этапе эволюции сети Хопфилда в процессе построения маршрута:

$$\begin{aligned}
U_{ij}(t + \Delta t) = & U_{ij}(t) + \Delta t \times \left(-U_{ij}(t) - \frac{\mu 1}{2} \sum_{k=1, k \neq i}^N (1 - C_{ik}) \times C_{ij} - \frac{\mu 2}{2} \rho_{ij} - \right. \\
& -\mu 3 \times \left(\sum_{k=1, k \neq i}^N (V_{ik} - V_{ki}) - \Phi_i \right) + \mu 3 \times \left(\sum_{k=1, k \neq j}^N (V_{jk} - V_{kj}) - \Phi_j \right) - \\
& \left. - \frac{\mu 4}{2} (1 - 2V_{ij}) - \frac{\mu 5}{2} \sum_{k=1, k \neq i}^N V_{ki} \right). \quad (16)
\end{aligned}$$

Как показано в выражении (8), преимущество рассматриваемой модели состоит в том, что она отображает стоимость канала в смещениях, а не в связях нейронов. При этом гибкость рассматриваемой модели выражается в том, что стоимость дуги и топологическая информация сети изменяются путем изменения значений смещений нейронов. Указанный факт делает предлагаемый вариант маршрутизации с использованием нейронной сети предпочтительным для работы в режиме реального времени [2]. Кроме того, используя информацию об окружающих нейронах, рассматриваемая модель более эффективна при решении крупномасштабных сетей.

Общий вид алгоритма расчета маршрута передачи пакета с использованием нейронной сети Хопфилда представлен в виде блок-схемы, приведенной на рис. 2.

При проведении исследований были рассмотрены два вида сетей с пятью и десятью узлами, конфигурации

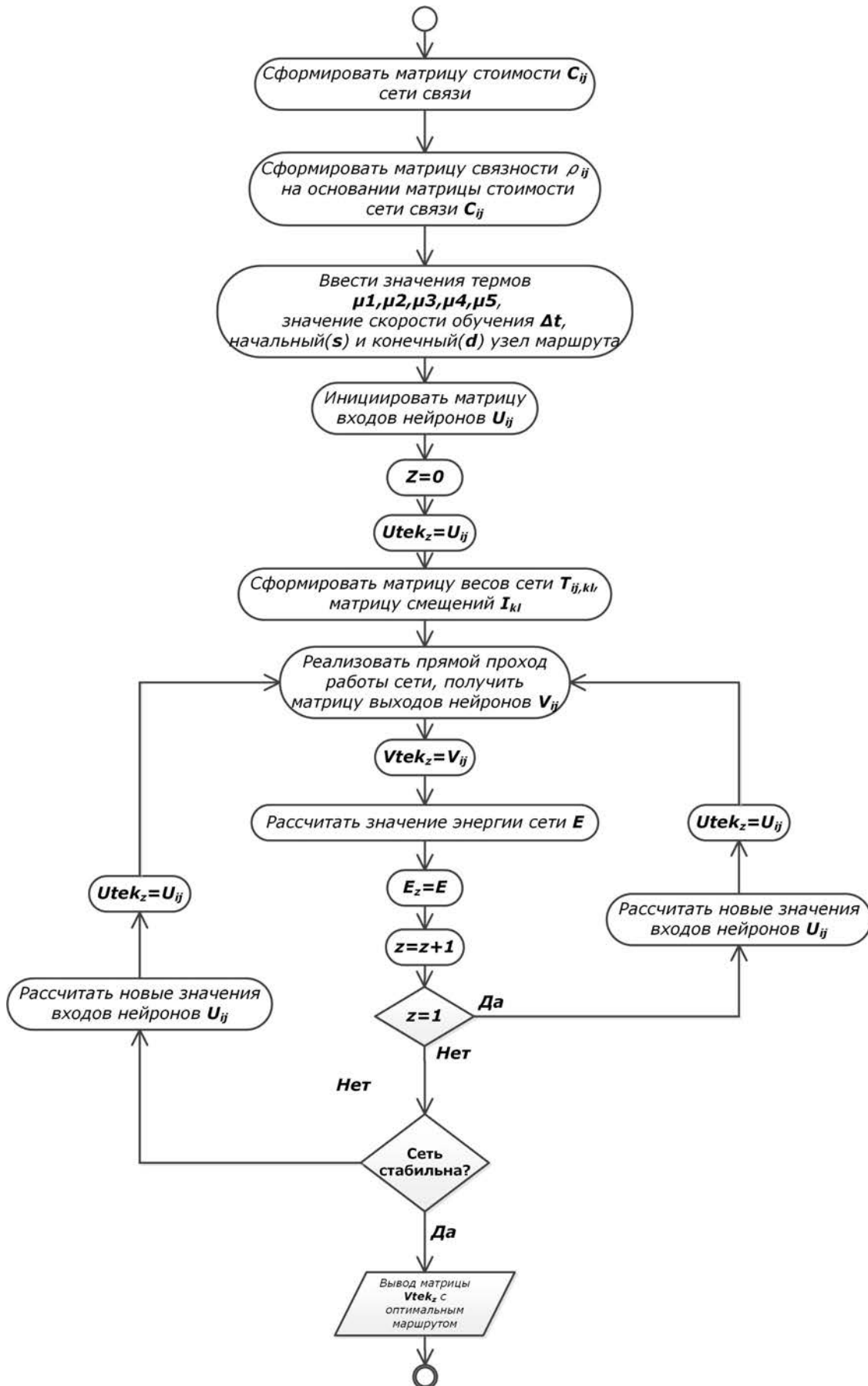


Рис. 2. Фрагмент блок-схемы алгоритма маршрутизации

которых приведены на рис. 3, 4, соответственно, при этом в качестве стоимости дуг использовались расстояния между узлами.

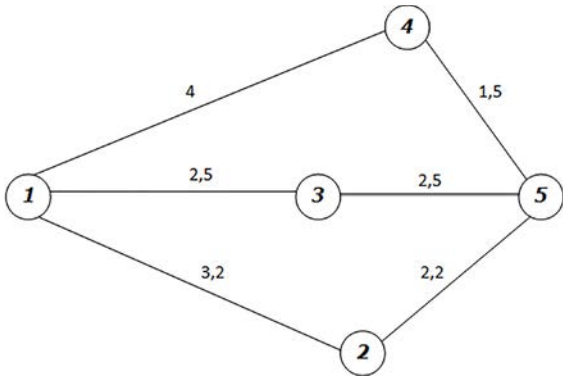


Рис. 3. Структура инфокоммуникационной сети из пяти узлов

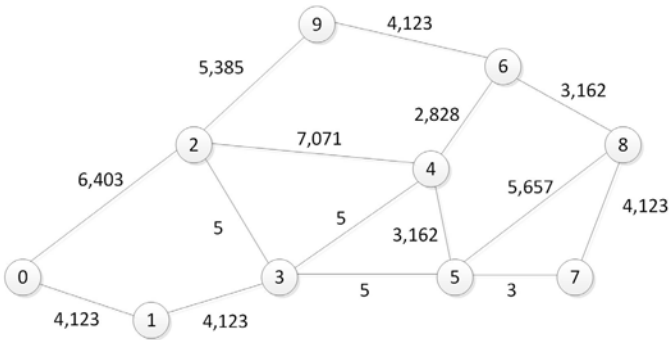


Рис. 4. Структура инфокоммуникационной сети из десяти узлов

Для моделирования процесса функционирования сети Хопфилда при построении маршрута в приведенных выше конфигурациях сетей были использованы следующие значения весовых коэффициентов энергетической функции Ляпунова [4]:

Таблица

Весовые коэффициенты энергетической функции

Обозначение коэффициента	Значение коэффициента
μ_1	950
μ_2	2500
μ_3	1900
μ_4	100
μ_5	500

16 зависимостей значений энергетической функции сети от эпохи эволюционирования сети Хопфилда при построении маршрута в сети из 5 узлов на интервалах случайной инициализации $[-5; 5]$, $[-10; 10]$, $[-15; 15]$ приведены на рис. 5–7, соответственно. Аналогичные зависимости для сети из 10 узлов приведены на рис. 8–10 для интервалов инициализации $[-10; 10]$, $[-20; 20]$, $[-30; 30]$, соответственно.

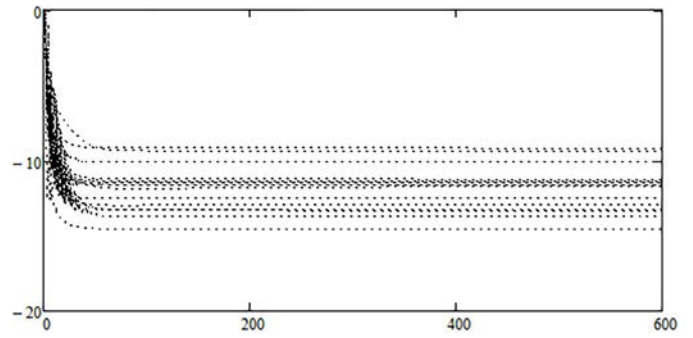


Рис. 5. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для интервала $[-5; 5]$

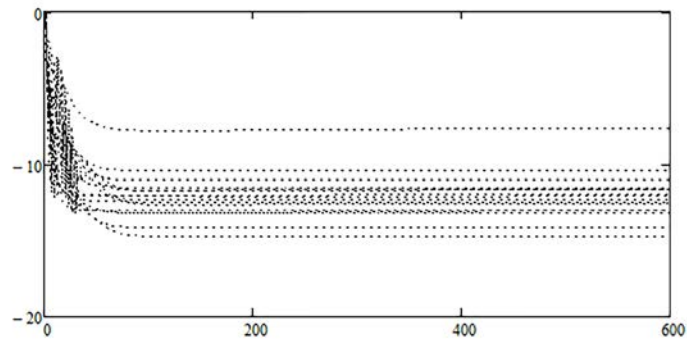


Рис. 6. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для интервала $[-10; 10]$

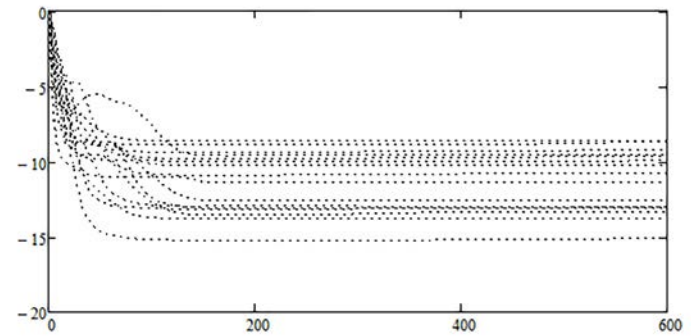


Рис. 7. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для интервала $[-15; 15]$

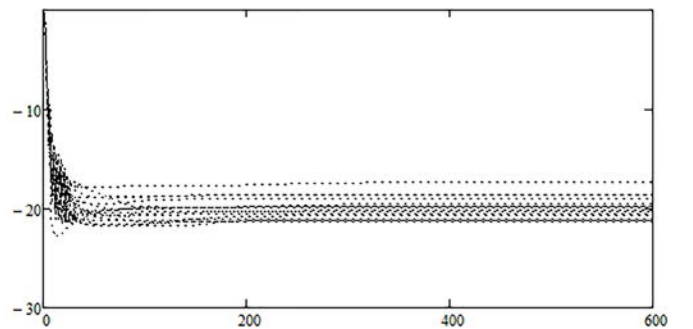


Рис. 8. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для сети из 10 узлов на интервале $[-10; 10]$

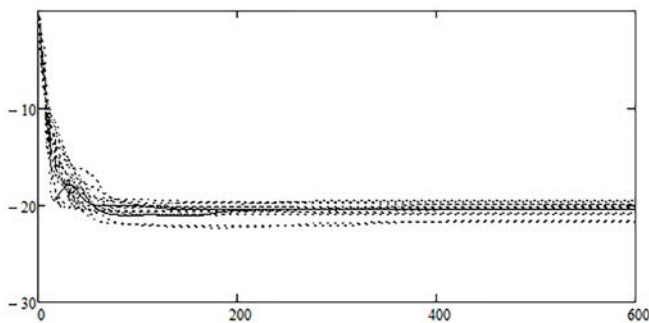


Рис. 9. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для сети из 10 узлов на интервале $[-20; 20]$

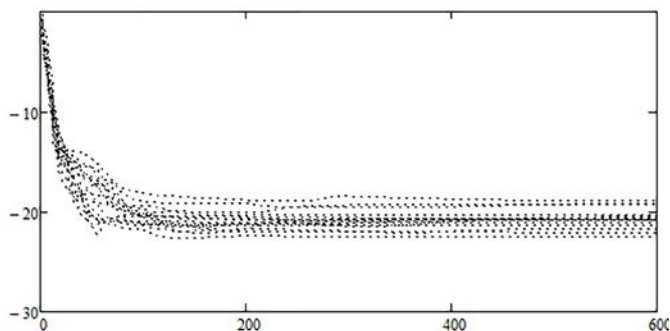


Рис. 10. Зависимость энергии нейронной сети Хопфилда $E(s)$ от эпох обучения (s) для сети из 10 узлов на интервале $[-30; 30]$

В результате моделирования работы сети Хопфилда в соответствии с рекомендациями, приведенными в [2, 10, 11] регламентирующими в качестве интервала случайной инициализации $[-0,0002; 0,0002]$ со скоростью обучения 0,0001, рассматриваемый алгоритм позволяет построить маршрут в 72% случаев, при этом на долю не построенных маршрутов относятся маршруты с тремя и более ретрансляциями. Следует отметить, что зависимость энергетической функции от эпохи обучения до интервала $[-2; 2]$ не изменяется.

При этом дальнейшее расширение интервала случайной инициализации повышает способность сети Хопфилда строить маршруты в любой комбинации исходных и конечных узлов, в том числе с тремя и более ретрансляциями, при этом целесообразно на порядок увеличить скорость обучения. Как показано на рисунках 4–9 расширение интервала инициализации обеспечивает в большинстве случаев стабилизацию энергетической функции сети, выраженную в монотонности её убывания. При этом, как показано на приведенных зависимостях рисунков 4–9, независимо от конфигурации сети интервал инициализации должен быть в пределах $(-3N; 3N)$, где N — количество узлов сети. Кроме того, как показали вычислительные эксперименты для сети из 10 узлов, использование для инициализации интервала меньше указанного выше не позволяет сформировать маршруты между максимально удаленными узлами, что подтверждает зависимость стоимости построенного маршрута от эпохи эволюционирования при построении маршрута из узла 0 в узел 8, приведенная на рис. 11. Также следует отметить, что превышение интервала инициализации значения $5N$ ослабляет действие пятого слагаемого в энергетической функции сети, приводя к появлению петель в рассчитанном маршруте.

В ходе вычислительного эксперимента была выявлена особенность математического аппарата сетей Хопфилда, состоящая в том, что при расчете маршрута между максимально удаленными узлами (большое коли-

чество ретрансляций) в случае наличия альтернативных маршрутов, повторное построение маршрута между той же парой узлов, рассчитанные маршруты отличны между собой. Этот факт позволяет, с одной стороны, обеспечить равномерность распределения нагрузки между каналами связи, с другой — уменьшить интервалы сбора данных о состоянии каналов сети, тем самым уменьшить количество служебного трафика, циркулирующего в сети.

Заключение

В работе приведен анализ перспективного подхода к решению задачи динамической маршрутизации с учетом состояния каналов в автоматизированной системе управления специального назначения с использованием нейронной сети Хопфилда.

Преимуществом данного подхода является вариативность построения маршрута между парой абонентов в сети, заложенная в рассматриваемом алгоритме. Выявленный факт предоставляет потенциальные возможности равномерного распределения нагрузки в ка-

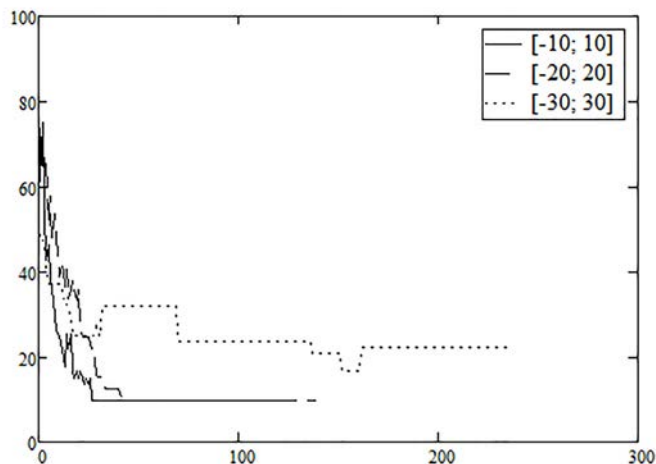


Рис. 11. Зависимость стоимости маршрута $TC(s)$ от эпох обучения (s)



налах, чего не обеспечивают оптимальные алгоритмы, в частности алгоритм Дейкстры. Кроме того, наличие указанного свойства обеспечивает возможность снижения накладных расходов, связанных с необходимостью организации служебного трафика для обновления информации о состоянии сети при реализации протоколов маршрутизации.

В связи с этим основополагающей задачей для использования нейронных сетей Хопфилда при построении маршрута в реальных инфокоммуникационных системах является формирование критерия останова процесса эволюции сети, который позволит корректно оценить время работы алгоритма, а также эффект, получаемый от применения рассмотренного алгоритма на интегральные показатели системы.

Литература

1. Легков К.Е. К вопросу о методах управления в сложных инфокоммуникационных системах специального назначения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 4. С. 19-23.
2. Павленко М.А., Романюк А.А., Яковлев В.Ю. Решение задачи маршрутизации на основе использования нейронной сети Хопфилда с разработкой функции Ляпунова с заданными свойствами // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 2 (7). С. 43-57.
3. Легков К.Е. Математическое описание потоков управляющей информации в процессе управления современной инфокоммуникационной сетью специального назначения // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 3. С. 34-39.
4. Носов В.С., Легков К.Е. К вопросу о повышении пропускной способности локальной вычислительной сети автоматизированной системы управления сил специального назначения // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2014. № 1. С. 72-74.
5. Легков К.Е. Основные подходы к управлению процессами функционирования сложных инфокоммуникационных систем // Вестник воздушно-космической обороны. 2015. № 4 (8). С. 69-75.
6. Носков А.Н., Манов И.А. Разработка механизма адаптивной маршрутизации трафика в программно-конфигурируемых сетях // Моделирование и анализ информационных систем. 2015. Т. 22. No. 4. Pp. 521-532.
7. Funabiki N., Takefuji Y. A parallel algorithm for broadcast scheduling problems in packet radio networks // IEEE transactions on communications. 1993. No. 41(6). Pp. 828-831.
8. Осипов Г.С., Уманский А.С. Решение задачи Коммивояжера с помощью нейронной сети Хопфилда // Постулат. 2016. № 8. С. 1-4.
9. Солдатенко А.А. Алгоритм оптимальной маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // ПДМ. Приложение. 2018. № 11. С. 122-127.
10. Ali M.K., Kamoun F. Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks // IEEE transactions on neural networks. 1993. No. 4 (6). Pp. 941-953.
11. Ahn C.W., Ramakrishna R.S. Neural network based near-optimal routing algorithm // Proceedings of international conference on neural information processing, 2002. No. 4. Pp. 1771-1776.

NEURAL NETWORK APPROACH TO BUILDING A ROUTE TO SPECIAL-PURPOSE AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

MIHAIL N. DANILCHENKO

Voronezh, Russia, m.n.danilchenko@sozvezdie.su

ANDREJ B. MURAVNIK,

Voronezh, Russia, amuravnik@mail.ru

KEYWORDS: routing algorithm, Hopfield network, Hopfield network energy, dynamic system, neuron link weight, neuron displacement, shortest path.

ABSTRACT

This work consists of the introduction, statement of the problem, descriptions of the method used and initial data for modeling, analysis of the results of the implementation of the methods, conclusions. The introduction substantiates the relevance of the problem consisting of the need to build a route in a telecommunications network in several metrics. The analysis of traditional methods is carried out and an alternative method is proposed in the form of an artificial Hopfield neural network. The goal of the presented work is formulated as follow in

implement a neural network algorithm for the constructing a route in an automated control systems to assess the possibilities of its practical application in real systems. The statement of the problem uses general terms to mathematically formalize the task of the route constructing; concepts such as an undirected graph, an arc of a graph, and the cost of an arc are introduced. As a result, the main routing problem is formulated as the task of the finding the path from the sender node to the minimum-cost recipient node, where the minimum cost

is the sum of the costs of the arcs that make up the constructed path. When describing the used method of the route constructing in an automated control systems system, the basic concepts (architecture and characteristics) of the approach under consideration are given. The sequence of the modification of the Lyapunov energy function identifying the state of the Hopfield neural network is given, its main disadvantages are noted and the final form of the energy function in the form of five terms is given. In particular, the first term not only minimizes the total cost of the channel in the route, taking into account the cost of existing channels, but also takes into account all the cost values around the considered node. The second term prevents the inclusion of no existing lines in the selected route option. The third term is equal to zero if the number of incoming communication directions is equal to the number of arcs in the outgoing direction, while the fourth term ensures the ability of the neural network to converge to the actual route. The fifth term prevents the appearance of loops in the route. The article describes the dependence that determines the dynamics of changes in the inputs of the Hopfield neural network. Based on the above dependencies, a block diagram of the algorithm for the functioning of an artificial neural network for the formation of a route in an automated control systems is developed. Then the initial data in the form of a network structure, the values of the coefficients of the energy function are provided. The conclusions of the work formulate the main tasks that are to be solved to use the neural network approach to construct routes in real networks as well as proposals for the confirming of the consistency of the considered method from the viewpoints of the system's integral indicators.

REFERENCES

1. Legkov K. E. On the question of management methods in complex infocommunication systems of special purpose. *T-Comm*. 2013. Vol. 7. No. 4. Pp. 19-23. (In Rus)
2. Pavlenko M.A., Romanyuk A.A., Yakovlev V. Yu. The solution of a problem of routing on the basis of use of a neural network of Hopfield with development of function of Lyapunov with the set properties. *Problemy telekommunikacij* [Problems of telecommunications]. 2012. No. 2 (7). Pp. 43-57.
3. Legkov K. E. Mathematical description of control information flows in the process of managing a modern special purpose infocommunication network. *Proceedings of the Rostov State University of Railway Transport*. 2014. No. 3. Pp. 34-39. (In Rus)
4. Nosov V. S., Legkov K. E. On the issue of increasing the capacity of the local computer network of the automated control system of special forces. *Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2014. No. 1. Pp. 72-74; 2010. No. 2. Pp. 29-34. (In Rus)
5. Legkov K. E. Basic approaches to managing the processes of functioning of complex information and communication systems. *Bulletin of Aerospace Defense*. 2015. No. 4 (8). Pp. 69-75. (In Rus)
6. Noskov A.N., Manov I.A. Development of the mechanism of adaptive routing of a traffic in program configured networks. *Modelirovanie i analiz informacionnyh system* [Modelling and the analysis of information systems]. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 521-532. (In Rus)
7. Funabiki N., Takefuji Y. A parallel algorithm for broadcast scheduling problems in packet radio networks. *IEEE transactions on communications*. 1993. No. 41 (6). Pp. 828-831. (In Rus)
8. Osipov G.S., Umansky A.S. Decision of a task of the Direct-sales representative by means of Hopfield's neural network. *Postulat* [Postulate]. 2016. No. 8. Pp. 1-4. (In Rus)
9. Soldatenko A.A. Algorithm of optimum routing in multiservice telecommunication networks. *PDM. Prilozhenie* [PDM. Appendix]. 2018. No. 11. Pp. 122-127. (In Rus)
10. Ali M.K., Kamoun F. Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks. *IEEE transactions on neural networks*. 1993. No. 4 (6). Pp. 941-953.
11. Ahn C.W., Ramakrishna R.S. Neural network based near-optimal routing algorithm. *Proceedings of international conference on neural information processing*, 2002. No. 4. Pp. 1771-1776.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Danilchenko M.N., PhD, Head of Department of the Joint-stock company "Sozvezdie «Concern»";
Muravnik A.B., PhD, Project Manager of the Joint-stock company "Sozvezdie «Concern".

For citation: Danilchenko M.N., Muravnik A.B. Neural network approach to building a route to special-purpose automated control systems. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 58-66. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-58-66 (In Rus)



http://intech-spb.com/conferences/konferencia_asu_vka@mail.ru

ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖВЕДОМСТВЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

по теоретическим и прикладным проблемам
развития и совершенствования АСУ
и связи специального назначения

Тематика конференции включает работу следующих секций:

01

Состояние и перспективы развития современных автоматизированных систем управления специального назначения

02

Математическое, программное и информационно-лингвистическое обеспечение автоматизированных систем управления

03

Безопасность в автоматизированных системах управления специального назначения

04

Применение современных инфокоммуникационных технологий и средств при разработке, техническом обеспечении и эксплуатации автоматизированных систем управления специального назначения

05

Состояние и перспективы развития систем, комплексов и средств радиосвязи специального назначения

06

Проблемы развития автоматизированных систем управления технологическим процессом

НИУ МИЭТ
Москва, Зеленоград

20 октября

*По итогам конференции отобранные оргкомитетом доклады в виде статей будут опубликованы в журналах из Перечня ВАК, РИНЦ
T-comm • Информация и космос • H&ES Research • I-methods • Техника средств связи*

Участие в конференции и публикация материалов в сборнике тезисов: БЕСПЛАТНО.



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-68-79

МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ФОРМАЛИЗУЮЩАЯ КОНТРОЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАМЯТИ И ОБРАЩЕНИЙ К НЕЙ ПРОЦЕССОРА

САМАРИН

Николай Николаевич

АННОТАЦИЯ

В условиях отсутствия исходных текстов программного обеспечения требуется использование технически сложных процедур, в том числе, декомпиляции, реверс-инжиниринга и т.д. При этом, на практике решение о том, принадлежит ли программное обеспечение к классу легитимных программ или нет, должно приниматься оперативно, что накладывает ограничение на время принятия решения. Также современные информационные и промышленные системы часто включают в свой состав значительное число компонентов с низкой вычислительной мощностью, в силу чего важно минимизировать потребление вычислительных ресурсов для анализа безопасности программного обеспечения. Решение задачи анализа безопасности также осложняется тем, что полная автоматизация этого процесса невозможна в связи с высокой сложностью предметной области. Для повышения эффективности решения данной задачи в условиях ограниченных временных и вычислительных ресурсов, а также отсутствия открытых исходных текстов программного обеспечения, предлагается модель безопасного функционирования программного обеспечения, включающая в свой состав гипервизор и учитывающая особенности проявлений вредоносного программного обеспечения в системе. В работе представлена модель, описывающая безопасное функционирование программного обеспечения с точки зрения выполняемых им процессов и функций. Особенность предложенной модели состоит в том, что она учитывает специфику работы вредоносных программ и подходит для реализации в системах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Сведения об авторе:

начальник научно-исследовательского
отделения № 6 Научно-исследовательского
института «Квант», г. Москва, Россия,
samarin_nik@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная безопасность; вредоносное программное обеспечение; гипервизор; модель безопасного функционирования.

Для цитирования: Самарин Н.Н. Модель безопасного функционирования программного обеспечения, формализующая контроль использования памяти и обращений к ней процессора // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 68-79. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-68-79



Введение

Число кибератак на важнейшие отрасли инфраструктуры во всем мире неуклонно растет с каждым годом. Так, по данным компании Positive Technologies¹, уже в первом квартале 2020 года в России было зафиксировано на 22,5% больше кибератак, чем в последнем квартале 2019 года. Во втором квартале число кибератак выросло еще на 9% по сравнению с первым кварталом 2020 года.

Одним из наиболее распространенных методов реализации кибератак является использование вредоносного программного обеспечения (ВПО). Так, в начале 2020 года число кибератак, реализованных этим методом, незначительно уступило только кибератакам методами социальной инженерии. Доля кибератак с использованием ВПО, по данным Positive Technologies¹, составила 71% для физических лиц и 60% для юридических лиц.

В связи с этим, актуальность задачи распознавания ВПО ежегодно возрастает. Следует также учитывать, что злоумышленники при реализации кибератак комбинируют различные типы ВПО — используют многофункциональные трояны или загружают на скомпрометированные объекты инфраструктуры множество различных по функционалу вредоносных программ. Это, в совокупности с редкой доступностью открытых текстов к распространяемым программам, значительно усложняет процесс анализа безопасности программного обеспечения (ПО). Особую остроту проблема приобретает в последнее время в связи с объективной необходимостью организации удаленной работы и доступа к информационным ресурсам компаний, системам управления и мониторинга технологическими процессами — что требует решения задачи защиты «территориально распределенного периметра». Возрастает опасность атак, использующих приемы как явно выраженной, так и скрытой социальной инженерии, когда для внедрения вредоносных программ используются доверенные источники.

Наибольшую проблему для анализа безопасности представляет ПО с закрытым исходным кодом, такое ПО является «черным» ящиком для пользователя, и даже в случае авторства известного и добросовестного разработчика и поставщика может содержать:

1. Недокументированные возможности (НДВ).
2. Вредоносные компоненты, внедренные в средства разработки вследствие атак на хранилища.
3. Вредоносное ПО и «черные ходы», внедренные

на этапе разработки, компиляции программного кода или же распространения.

4. Ошибки и недоработки, не устраненные в процессе тестирования.

5. Вредоносное ПО и «черные ходы», намеренно внедренные третьими лицами в процессе доставки.

Несмотря на широкую освещенность подходов к решению задачи анализа безопасности ПО в научнотехнической литературе [1, 2], на данный момент нет универсального и оптимального решения заявленной задачи обнаружения ВПО. Использование всего спектра имеющихся средств позволяет максимально приблизиться к решению задачи выявления вредоносного кода, определения его параметров и поведения, и даже идентификации методов, а возможно, даже личности злоумышленника, однако требует приложения значительных усилий, временных затрат и квалификации.

1. Модели безопасности и надежности ПО

Прежде чем предлагать оригинальную модель безопасного функционирования ПО, необходимо рассмотреть имеющиеся модели. Важно заметить, что в настоящее время обеспечение информационной безопасности современных сложных информационных и промышленных систем во многом сводится к обеспечению корректного функционирования систем даже в условиях кибератак [3, 4]. В таких условиях, решающее значение имеет не только безопасность функционирования ПО, но и надежность и качество функционирования ПО. Это связано с тем, что работа ПО во многом определяет поведение системы при реализации на нее кибератак, и для сохранения работоспособности системы функционирующее в ней ПО также должно корректно функционировать.

В силу специфики задачи обеспечения информационной безопасности для современных сложных информационных и промышленных систем, рассматриваются модели как безопасного, так и надежного и качественного функционирования ПО.

В соответствии с источниками^{2,3} [5], нет четкой градации таких моделей по категориям, однако обобщенно они делятся на эмпирические, статистические и аналитические. При этом в работах^{4,5} [6] показано, что единого мнения о том, что такое надежность ПО, пока нет.

Систематизируем эти модели по категориям, выделим их достоинства и недостатки для решения задачи обнаружения ВПО без исходных текстов (табл. 1).

¹Актуальные киберугрозы: I квартал 2020 года. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analitics/cybersecurity-threatscape-2020-q1/> (дата обращения 20.02.2021).

²Смагин В.А., Дорохов А.Н. Основы теории надежности программного обеспечения. СПб.: 2009. 303 с.

³Schneider V. Some experimental estimators for developmental and delivered errors in software development projects // Performance Evaluation Review. 1981. Vol. 10. Pp.169–172.

⁴Gnedenko B.V., Korolev V.Yu. Random Summation: Limit Theorems and Applications. CRC Press, BocaRaton, FL. 1996.

⁵Карповский Е.Я., Чижов С.А. Надежность программной продукции. Киев. 1990.

Таблица 1

Систематизация моделей безопасности, надежности и качества функционирования ПО

Модель	Описание	Достоинства	Недостатки
<i>Аналитические модели</i>			
Модель Джелиински–Моранды [7]	Модель основана на допущениях, что время до следующего отказа ПО распределено экспоненциально, а интенсивность отказов пропорциональна числу оставшихся в ПО ошибок. Вероятность безотказной работы ПО как функция времени t_i равна $P(t_i) = e^{-\lambda_i t_i}$, где λ_i — интенсивность отказов, $\lambda_i = C_D(N - (i - 1))$. C_D — коэффициент пропорциональности; N — начальное число ошибок.	Простота расчетов	При неточном определении величины N интенсивность отказов ПО может стать отрицательной. Предположение о том, что время подчинено известному (экспоненциальному) распределению
Модель Шумана [7]	Предполагается, что исследование безопасности и надежности ПО проводится в несколько этапов, каждый представляет собой выполнение набора тестовых данных. Пусть всего проводятся k этапов. Обозначим длительность каждого этапа через t_1, \dots, t_k , а число ошибок на каждом этапе через m_1, \dots, m_k . Пусть $T = t_1 + \dots + t_k$ — общее время тестирования; $n = m_1 + \dots + m_k$ — общее число обнаруженных и исправленных ошибок; $n_i = m_1 + \dots + m_i$ — число ошибок, исправленных к началу $(i + 1)$ -го этапа тестирования ($n_0 = 0$). Модель для ПО на i -м этапе тестирования описывается функцией надежности $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, где $\lambda_i = (N - n_i - 1)C$; N — начальное число ошибок в ПО; $N - n_i - 1$ — количество ошибок, оставшихся к началу i -го этапа; C — коэффициент пропорциональности, $C = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N - n_{i-1}}}{\sum_{i=1}^k t_i}$	Определение всех неизвестных параметров, необходимых для расчетов, и отсутствие необходимости обращения к другим моделям	Предположение модели о том, что при корректировке ПО не вносятся новые ошибки. Также для расчетов требуется большое количество зарегистрированных данных. Ошибки не отделяются от уязвимостей и недokumentированных функций ПО
Модель Муса ⁶	Надежность ПО на этапе эксплуатации оценивается по результатам тестирования. Пусть T — суммарное время тестирования, n — число отказов, произошедших за время тестирования, тогда средняя наработка ПО до отказа после тестирования определяется по формуле $\tau = \tau_0 \frac{CT}{n\tau_0}$, где τ_0 — средняя наработка до отказа до тестирования; C — коэффициент, учитывающий уплотнение тестового времени по сравнению с временем реальной эксплуатации. Неизвестный параметр τ_0 можно найти как $\tau_0 = \frac{1}{NKf}$, где N — первоначальное число ошибок в ПО, K — коэффициент проявления ошибок, определяется эмпирически.	Отсутствие необходимости фиксировать моменты отказов. В случае появления отказов ПО, ошибки регистрируются, а исправляются лишь по завершении этапа тестирования	Для определения первоначального числа ошибок в ПО необходимо вести расчеты по другой модели, а это приводит к дополнительным временным и вычислительным затратам

⁶Конструирование программного обеспечения: методические указания к практическим занятиям, лабораторным работам, курсовой работе и самостоятельной работе студентов / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. 44 с.



Продолжение таблицы 1

Модель	Описание	Достоинства	Недостатки
Модель Ла Падула ⁶	<p>Выполнение последовательности тестов для оценки безопасности и надежности ПО производится в m этапов. Каждый этап заканчивается внесением исправлений в ПО. Возрастающая функция надежности базируется на числе ошибок, обнаруженных в ходе каждого тестового прогона. Надежность ПО в течение i-го этапа вычисляется как $R(t) = R(\infty) - \frac{A}{i}$, $i = 1, 2, \dots$, где A — параметр роста, $R(\infty) = \lim_{i \rightarrow \infty} R(i)$ — предельная надежность ПО. Эти неизвестные величины можно вычислить, решив следующие уравнения:</p> $\sum_{i=1}^m \left[\frac{S_i - m_i}{S_i} - R(\infty) + \frac{A_i}{i} \right] = 0$ <p>и</p> $\sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{S_i - m_i}{S_i} - R(\infty) + \frac{A_i}{i} \right) \frac{1}{i} \right] = 0$ <p>где S_i — число тестов на i-м этапе; m_i — число отказов на i-м этапе.</p>	<p>Модель является прогнозной, вследствие чего, основываясь на данных, полученных в ходе тестирования, она дает возможность предсказать вероятность безотказной работы ПО на последующих этапах его выполнения</p>	<p>Необходимость накопления статистической информации об ошибках и сбоях во время выполнения тестирования</p>
Модель Шика-Волвертона ⁶	<p>В основе модели лежит предположение, согласно которому частота ошибок пропорциональна не только числу ошибок в ПО, но и времени тестирования, т.е., вероятность обнаружения ошибок с течением времени возрастает. Интенсивность обнаружения ошибок λ_i предполагается постоянной в течение интервала времени t_i и пропорциональна числу ошибок, оставшихся в ПО по истечении $(i-1)$-го интервала:</p> $\lambda_i = C(N - n_i - 1) \left(T_i - 1 + \frac{t_i}{2} \right),$ <p>где C — коэффициент пропорциональности; N — число ошибок, первоначально присутствующих в ПО; $n_i - 1$ — число ошибок, оставшихся в программе по истечении $(i-1)$-го интервала; $T_i - 1$ — суммарное время, затраченное на тестирование в течение $(i-1)$ этапов; t_i — среднее время выполнения ПО в текущем интервале.</p>	<p>Позволяет достаточно точно рассчитывать надежность ПО и проста в применении</p>	<p>Для распределений, отличных от экспоненциального, когда интенсивность ошибки изменяется со временем, необходимо использовать условные распределения. Условная вероятность для определённого интервала тестирования должна соответствовать промежутку времени от начала тестирования ПО до начала рассматриваемого интервала тестирования. Иначе процесс восстановления будет приводить к завышению вероятностей безошибочного функционирования ПО на всех участках тестирования</p>

⁶Конструирование программного обеспечения: методические указания к практическим занятиям, лабораторным работам, курсовой работе и самостоятельной работе студентов / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. 44 с.

Модель	Описание	Достоинства	Недостатки
<i>Статистические модели</i>			
Модель Миллса [7]	Предположим, что в программу искусственно внесено M ошибок, которые «случайно» рассредоточены в программе, и в ходе тестирования выявлено m ошибок из числа внесенных и n_i «естественных» ошибок. Тогда наилучшей оценкой для общего числа «естественных» ошибок будет: $\hat{n} = \frac{Mn_1}{m}$	Простота использования в расчетах	Предположение об одинаковости распределения внесенных и собственных ошибок, которое невозможно проверить, особенно на более поздних стадиях разработки ПО, когда многие простые ошибки, такие, как например, синтаксические, уже будут исправлены, и только наиболее сложные для обнаружения ошибки ещё остаются в ПО
Модель Нельсона [8]	Данные разбиваются на k непересекающихся классов, при этом P_i — вероятность того, что при очередном прогоне будут задействованы исходные данные из i -го класса ($i = 1, \dots, k$). Пусть m_i и r_i — количества соответственно прогонов и отказов при использовании данных i -го класса. Для вероятности p правильной работы ПО после $t = m_1 + \dots + m_k$ прогонов предлагается оценка: $\hat{p} = 1 - \sum_{i=1}^k \frac{r_i P_i}{m_i}$	Модель может использоваться для расчета надежности ПО на всех этапах его жизненного цикла	На ранних стадиях разработки ПО использовать эту модель некорректно, так как для объективной оценки безопасности и надежности требуется большое число прогонов ПО
Модель Коркорэна [9]	Модель предполагает наличие в ПО многих источников программных отказов, связанных с различными типами ошибок и уязвимостей, и разную вероятность их появления. Аргументом модели является число прогонов программы n . При этом оценка надежности ПО имеет вид: $R(n) = \frac{n^+}{n} + \sum_{i=1}^k \delta_i \frac{n_i^- - 1}{n}$, где n^+ — число успешных прогонов программного продукта; n_i^- — число обнаруженных ошибок i -го типа, устраняемых с вероятностью p_i ; δ_i — коэффициент, определяемый следующим образом: $\delta_i = \begin{cases} p_i & \text{если } n_i^- > 0 \\ 0, & \text{если } n_i^- = 0 \end{cases}$	Модель использует изменяющиеся вероятности отказов для различных типов ошибок и оценивается вероятность безотказного выполнения ПО на данный момент времени	Выполнение оценки на основе априорной информации или данных предшествующего периода функционирования однотипных образцов ПО



Окончание таблицы 1

Модель	Описание	Достоинства	Недостатки
Модель Липова ⁷	<p>Модификация модели Миллса, учитывающая вероятность обнаружения ошибки при использовании различного числа тестов. Если сделать предположение, что собственные и искусственные ошибки имеют равную вероятность быть найденными, то вероятность обнаружения n собственных и V внесенных ошибок вычисляется как $Q(n, V) = \left(\frac{m}{n+V} \right) q^{n+V} (1-q)^{m-n-V} \frac{\frac{N}{n} \frac{S}{V}}{\frac{N}{n} + \frac{S}{V}}$,</p> <p>где n — количество используемых тестов, q — вероятность обнаружения ошибки в каждом из m тестов, рассчитанная по формуле $q = \frac{n+V}{n}$;</p> <p>S — общее число искусственно внесенных ошибок; N — число собственных ошибок, имеющихся в ПО до начала тестирования.</p>	Модель дает возможность оценить вероятность обнаружения определенного количества ошибок к моменту оценки	Необходимость в накоплении статистического материала, что требует больших вычислительных ресурсов Одинаковая вероятность для различных ошибок и уязвимостей
Модель последовательности испытаний Бернулли ⁸	<p>Пространство элементарных событий содержит 2^n точек, где n — число испытаний (запуск ПО). Каждый запуск имеет два исхода: правильный и неправильный. Обозначим вероятность неправильного исхода p, а вероятность правильного — $(1-p)$.</p> <p>Вероятность того, что из n запусков k приведут к неправильному результату: $B(p, n, k) = C(n, k) p^k (1-p)^{n-k}$, где $C(n, k)$ — число сочетаний. Вероятность p априори неизвестна, но по результатам запусков известны n и k. Величина B имеет максимум при $p = \frac{k}{n}$.</p> <p>В качестве меры надежности ПО принимается величина $R = 1 - \frac{k}{n} = \frac{n-k}{n}$.</p>	Простота вычислений.	Произвольное задание вероятности p , не учитывается возможность неоднозначного трактования результатов испытаний
Эмпирические модели			
Модель Холстеда ⁹	<p>Для определения числа ошибок в программе после окончания ее разработки предложена формула $n \approx \hat{n} = kv \log_2 v_1$, где v — общее число операторов и операндов в программе, v_1 — общее число различных операторов и операндов в программе, k — коэффициент пропорциональности</p>	Простота вычисления	Необходимость подсчета общего числа операторов и операндов, невозможность применимости на стадии разработки ПО
Модель IBM [8]	<p>Число ошибок в различных версиях операционной системы предлагается оценивать по формуле: $n \approx \hat{n} = 23m_1 + 2m_2$, где m_1 — число модулей, потребовавших 10 и более исправлений, m_2 — число модулей, содержащих менее 10 исправлений.</p>	Простота вычисления	Необоснованность эмпирически выбранного числа исправлений (10), не учитываются уязвимости нулевого дня, не исследуются функции ПО

⁷Тейер Т., Липов М., Нельсон Э. Надежность программного обеспечения. М.: Мир, 1981. 323 с.

⁸Майерс Г. Надежность программного обеспечения: пер. с англ. / под ред. В. Ш. Кауфмана. М.: Мир, 1980. 360 с.

⁹Холстед М.Х. Начала науки о программах. М.: 1980.



Описание взаимодействия понятий модели, представленное на рисунке, отражает не только надежность функционирования ПО, связанную с выполнением заявленных функций, но и безопасность функционирования ПО, что отражается в понятиях «Память» и «Вычислительные ресурсы».

Безопасным будет считаться ПО, установка которого не ведет к нарушению легитимных отношений в системе, но также и то, которое не имеет такого потенциала вследствие наличия в своем составе определенного вредоносного функционала. Для формализации описания воспользуемся математическим аппаратом теории множеств. Опишем модель безопасного функционирования ПО формально, представив ПО (*Software*) как кортеж: $Software = \langle F, Sign, R, M, Memory \rangle$, где:

1. $F, F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ представляет собой счетное множество функций, которое выполняет рассматриваемое ПО. Функции, входящие в множество F , разделяются на легитимные функции F_{leg} и деструктивные F_{destr} : $F = F_{leg} \cup F_{destr}, F_{leg} \cap F_{destr} = \emptyset$. При этом, в любом из подмножеств F_{leg} и F_{destr} могут присутствовать как документированные функции ПО F_{doc} , так и недокументированные F_{undoc} , $F_{doc} \cap F_{undoc} = \emptyset$.

2. $Sign$ — множество признаков, характеризующих выполнение функций ПО. Имеем неоднозначное отображение множества F на множество $Sign$: $F \rightarrow Sign$, то есть, каждому элементу множества F соответствует один или несколько элементов множества $Sign$. Используя аналогичные индексы, зададим отображения $F_{leg} \rightarrow Sign_{leg}, F_{destr} \rightarrow Sign_{destr}, F_{doc} \rightarrow Sign_{doc}$ и $F_{undoc} \rightarrow Sign_{undoc}$.

3. R — вычислительные ресурсы, требуемые ПО для реализации своих функций. Имеем отображение $F \rightarrow R$, в результате которого каждой f_i назначаются три численных значения: $\{r_i, r_{imax}, r_{imin}\}$. Очевидно, что оценка требуемых вычислительных ресурсов может варьироваться, однако в системе для каждого ПО должен быть выделен определенный объем вычислительных ресурсов, чтобы система эффективно функционировала.

4. M — множество методов исследования, применяемых для выявления вредоносного ПО.

5. $Memory$ — множество операций над памятью, выполняемых при активации той или иной функции из множества F . Следовательно, имеем отображение $F \rightarrow Memory$, при котором каждой функции f_i сопоставляется набор операций над памятью: $f_i \rightarrow \{memory_{i1}, memory_{i2}, \dots, memory_{ik}\}$.

Важно отметить, что применение методов M только в идеальном случае позволит выявить все множество признаков $Sign$, характерных для ПО. На практике следует говорить об определении с помощью методов M некоторого подмножества $Sign', Sign' \in Sign$.

На практике решается задача оценки условной вероятности $P(A|B)$ события $A = \{Sign_{destr} = \emptyset \text{ and } Sign_{undoc} = \emptyset\}$ при условии выполнения события B — реализации некоторого набора методов $M', M' \in M$, позволяющего выявить достаточное число признаков $Sign'_{destr} \text{ и } Sign'_{undoc}$, $B = \{M' \rightarrow \{Sign'_{destr}, Sign'_{undoc}\} \neq \emptyset\}$. Распишем условную вероятность $P(A|B)$:

$$P(A|B) = P(A) \cdot P(B) = \\ = P\{Sign_{destr} = \emptyset \text{ and } Sign_{undoc} = \emptyset\} \cdot P\{M' \rightarrow \{Sign'_{destr}, Sign'_{undoc}\} \neq \emptyset\}$$

Достижение максимальной эффективности используемых методов M маловероятно, однако в таком случае будет достигнуто равенство

$$Sign_{destr} = Sign'_{destr}, Sign = Sign'_{undoc}.$$

Сформулируем критерии безопасного функционирования ПО в терминах модели:

1) ПО не реализует деструктивных и вредоносных функций: $F_{destr} = \emptyset$ и $F_{undoc} = \emptyset$;

2) объем задействованных для анализа безопасности (с помощью множества методов M) вычислительных ресурсов минимизирован: $M : R \rightarrow R_{min}, R_{min} = \{r_{imin}, r_{2min}, \dots, r_{nmin}\}$, то есть, каждая функция ПО в идеале должна требовать для реализации минимально допустимого объема вычислительных ресурсов;

3) не должно быть вычислительных ресурсов, затрачиваемых на какое-либо множество функций F' , не пересекающееся с множеством $F : \nexists F' \rightarrow R$, поскольку присутствие ВПО в системе часто приводит к активации новых, нетипичных для работы системы, функций;

4) множество операций над памятью $Memory$ должно иметь отображение на множество признаков $Sign$, поскольку, как показано выше, важным признаком наличия ВПО в системе являются нетипичные операции с памятью: $Memory \rightarrow Sign \neq \emptyset$;

5) множество методов исследования, применяемых для выявления ВПО, должно использовать результаты отображения $Memory \rightarrow Sign$, что означает, что для решения поставленной задачи целесообразно применять те методы, которые учитывают операции ПО с памятью;

6) множество используемых методов должно быть таким, что условная вероятность $P(A|B)$ максимизирована, то есть, $M : P(A|B) \rightarrow 1$.

3. Аспекты реализации разработанной модели

Разработанная модель отличается от рассмотренных моделей оценки безопасности, надежности и качества функционирования ПО тем, что она учитывает, как осо-

бенности функционирования ВПО на компоненте системы, так и необходимость в минимизации вычислительных ресурсов при анализе.

Особенное внимание следует уделить вопросам практической реализации разработанной модели, поскольку она должна сочетать высокую эффективность обнаружения ВПО и оптимальное использование вычислительных ресурсов.

Введем такое понятие, как «ПО с потенциально опасными возможностями». Данным определением назовем ПО, реализующее одну или несколько функций, последствия выполнения которых могут либо непосредственно представлять угрозу нарушения безопасности данных, либо приводить к выполнению кода, представляющего данную угрозу [12].

Виды опасных возможностей представлены на (рис. 2), значимость их систематизации базируется на особенностях их работы с памятью. Выделены возможности, представляющие собой:

- передачу управления в область модифицированных данных;
- самомодификацию или изменение кода другого ПО в оперативной памяти или на внешних носителях;
- самодублирование, подмену собой другого ПО или перенос своих фрагментов в область оперативной или внешней памяти, не принадлежащей программе;

- сохранение информации из областей оперативной памяти, не принадлежащих ПО;
- искажение, блокирование или подмену информации, являющейся результатом работы других программ;
- скрытие своего присутствия в программной среде.

Выявление функций, осуществляющих работу с памятью таким образом, что появляются потенциально опасные возможности, особенно значимо, т.к. это основная характеристика поведения ВПО. Поэтому при реализации модели на практике следует использовать механизм, обеспечивающий эффективный мониторинг обращений к памяти и ее использования.

Процесс в виртуальной операционной среде с полным контролем действий ПО и отслеживанием алгоритма его работы осуществляется более эффективно. Тогда можно сделать вывод о том, что реализация разработанной модели должна базироваться на гипервизоре. Под гипервизором принято понимать программное или микропрограммное обеспечение, позволяющее виртуализировать системные ресурсы вычислительных систем.

Их принято разделять на два типа: гипервизоры первого типа (рис. 3) работают непосредственно на оборудовании системы, а гипервизоры второго типа (рис. 4) работают поверх базовой операционной системы, которая обеспечивает службы виртуализации, такие как поддержка устройства ввода/вывода и управление памятью.



Рис. 2. Виды потенциально опасных возможностей

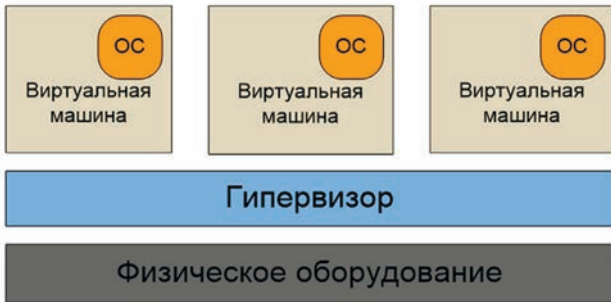


Рис. 3. Гипервизор первого типа

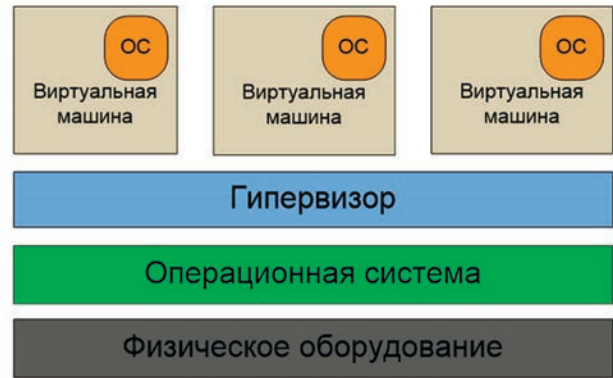


Рис. 4. Гипервизор второго типа

Частным случаем гипервизора первого типа являются вложенные гипервизоры (рис. 5) [13].

В настоящее время самыми популярными гипервизорами являются следующие программные продукты: PowerVM, VMware ESX Server, Xen, KVM, z/VM, Bochs^{10,11} [13]. Выбор гипервизора для реализации разработанной модели, несомненно, зависит от типа системы, на базе которой будет функционировать модель. Однако следует заметить, что значительными преимуществами обладают

гипервизоры, имеющие исходный код. К таким гипервизорам относятся Xen, KVM, Bochs. В табл. 2 представлена их сравнительная характеристика. Из табл. 2 очевидно преимущество гипервизора Bochs по основным параметрам: пошаговый контроль выполнения инструкций процессора и наименьший объем исходного кода. Указанный гипервизор может быть модернизирован с целью предоставления информации о состоянии функционирования операционной системы и ПО, работающего под её управлением [145].

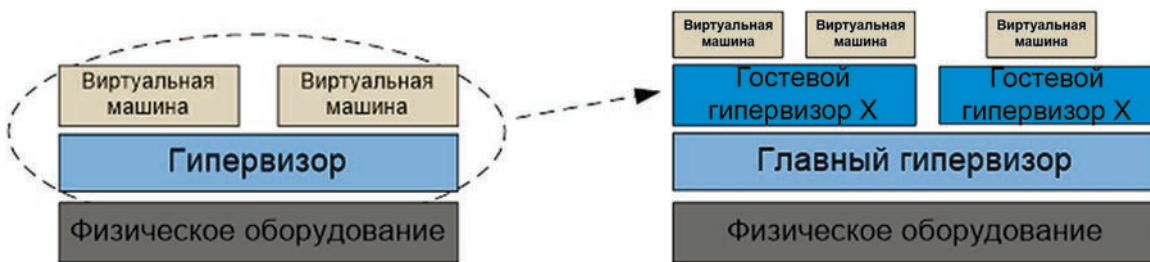


Рис. 5. Вложенные гипервизоры

Таблица 2

Сравнительная характеристика гипервизоров

№ п/п	Свободное распространение	Возможность модернизации	Пошаговый контроль выполнения инструкций процессора	Объем исходного кода последней версии, Кбайт
Xen	+	+	-	15 229
KVM	+	+	-	6 680
Bochs	+	+	+	4 262

¹⁰Bochs — бесплатный эмулятор аппаратного обеспечения IBM PC. URL: <http://bochs.sourceforge.net/> (дата обращения 20.01.2021).

¹¹VMProtect Software. Vmprotect software protection, 2008. URL: <http://vmprotect.com/> (дата обращения 20.01.2021).

Заключение

В работе предложена модель безопасного функционирования программного обеспечения, учитывающая характер поведения вредоносных программ, а именно, их влияние на вычислительные ресурсы системы и активную эксплуатацию памяти. Модель отражает как надежность, так и безопасность функционирования ПО за счет выделения деструктивных и недокументированных функций ПО. В терминах модели сформулированы критерии безопасного функционирования ПО, приведены рекомендации по практической реализации разработанной модели. В частности, отмечается, что реализация должна быть выполнена с использованием гипервизора. Выбор того или иного гипервизора зависит от потребностей, назначения и специфики системы, однако по итогам базового анализа выделен гипервизор Bochs. Он реализует пошаговый контроль выполнения инструкций процессора и требует наименьшего объема исходного кода, что значимо в условиях ограниченности вычислительных ресурсов.

Литература

1. *Kolosnjaji B., Demontis A., Biggio B., Maiorca D., Giacinto G., Eckert C., Roli F.* Adversarial malware binaries: Evading deep learning for malware detection in executables // 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), IEEE, 2018. Pp. 533–537.
2. *Sharma S., Krishna C. R., Sahay S. K.* Detection of advanced malware by machine learning techniques // In *Soft Computing: Theories and Applications*, Springer, Singapore, 2019. Pp. 333–342.
3. *Зегжда Д. П., Павленко Е. Ю., Лаврова Д. С., Штыркина А. А.* Подход к созданию критерия устойчивого функционирования киберфизических систем // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2019. № 2. С. 156–163.
4. *Лаврова Д. С., Зегжда Д. П., Зайцева Е. А.* Моделирование сетевой инфраструктуры сложных объектов для решения задачи противодействия кибератакам // *Вопросы кибербезопасности*. 2019. № 2 (30). С. 13–20.
5. *Довгальок В. А., Макаров П. М., Падарян В. А., Романев М. С., Фурсова Н. И.* Применение программных эмуляторов в задачах анализа бинарного кода // *Труды Института системного программирования РАН*. 2014. Т. 26. № 1. С. 227–296.
6. *Van Pul M. C.* Asymptotic properties of statistical models in software reliability // *Second Bernoulli Society World Congress. Abstracts of Communications*. Uppsala. 1990. Pp. 43–44.
7. *Юров А. В., Леонов С. В.* Методология расчета надежности программного обеспечения автоматизированных систем // *Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и современные информационные технологии»* (Томск, 04–07 декабря 2017 г.). 2017. С. 100–101.
8. *Марков А. С.* Модели оценки и планирования испытаний программных средств по требованиям безопасности информации // *Вестник МГТУ им. НЭ Баумана. Сер. Приборостроение*. 2011. С. 90–103.
9. *Пошивалов В. П., Даниев Ю. Ф.* О моделях надежности программного обеспечения эргатических систем // *Техническая механика*. 2017. № 4. С. 89–95.
10. Signs and symptoms of Trojan // *IT Computer Technical Support Newsletter*. 2015. Vol. 1. No. 21. Pp. 1–8. URL: https://ehs.siu.edu/_common/documents/IT%20newsletter/vol-1-no21.pdf (дата обращения 20.01.2021).
11. *Hardikar A., Bambenek J.* Malware 101–Viruses. SANS Institute, 2008. 76 p. URL: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/incident/malware-101-viruses-32848>. (дата обращения 20.01.2021).
12. *Самарин Н. Н.* Виды потенциально-опасных возможностей, реализуемых вредоносным кодом // *Успехи современной науки и образования*. 2016. Т. 4. № 9. С. 199–202.
13. *Бхану П. Толети.* Гипервизоры, виртуализация и облако: О гипервизорах, виртуализации систем и о том, как это работает в облачной среде // *IBM DeveloperWorks®*. 2012. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/cl-hypervisorcompare> (дата обращения 20.01.2021).
14. *Самарин Н. Н.* Анализ виртуальных машин с целью их применения на возможность выявления недокументированных действий программного обеспечения без исходного кода // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013. № 12. С. 84–89.

A MODEL OF SECURE SOFTWARE OPERATION THAT FORMALIZES THE CONTROL OF MEMORY USAGE AND CPU ACCESSES

NIKOLAY N. SAMARIN

Moscow, Russia, samarin_nik@mail.ru

ABSTRACT

In the absence of software source codes, it is necessary to use technically complex procedures, including decompilation, reverse engineering, etc. At the same time, in practice, the decision on

KEYWORDS: information security; malware; hypervisor; secure functioning model.

whether the software belongs to the class of legitimate programs or not should be made promptly, which imposes a limit on the decision-making time. Also, modern information and industrial systems



often include a significant number of components with low computing power, which is why it is important to minimize the consumption of computing resources for software security analysis. Solving the problem of security analysis is also complicated by the fact that full automation of this process is not possible due to the high complexity of the subject area. To improve the efficiency of solving this problem in conditions of limited time and computing resources, as well as the lack of open source software, a model of secure software functioning is proposed, which includes a hypervisor and takes into account the features of malicious software manifestations in the system. This paper presents a model that describes the secure operation of software in terms of the processes and functions it performs. The peculiarity of the proposed model is that it takes into account the specifics of malware operation and is suitable for implementation in systems with limited computing resources.

REFERENCES

1. Kolosnjaji B., Demontis A., Biggio B., Maiorca D., Giacinto G., Eckert C., Roli F. Adversarial malware binaries: Evading deep learning for malware detection in executables. *2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE, 2018. Pp. 533-537.
2. Sharma S., Krishna C.R., Sahay S.K. Detection of advanced malware by machine learning techniques. *In Soft Computing: Theories and Applications*, Springer, Singapore, 2019. Pp. 333-342.
3. Zegzhda D.P., Pavlenko E. Yu., Lavrova D.S., Shtyrkina A.A. An approach to creating a criterion for the sustainable functioning of cyberphysical systems. *Problems of information security. Computer Systems*. 2019. No. 2. Pp. 156-163. (In Rus)
4. Lavrova D.S., Zegzhda D.P., Zaitseva E.A. Modeling of the network infrastructure of complex objects for solving the problem of countering cyber attacks. *Cybersecurity*. 2019. No. 2(30). Pp. 13-20. (In Rus)
5. Dovgalyuk V.A., Makarov P.M., Padaryan V.A., Romaneev M.S., Fursova N.I. Application of software emulators in binary code analysis problems. *Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Science*. 2014. Vol. 26. No. 1. Pp. 227-296.
6. Van Pul M.C. Asymptotic properties of statistical models in software reliability. *Second Bernoulli Society World Congress. Abstracts of Communications*. Uppsala. 1990. Pp. 43-44. (In Rus)
7. Yurov A.V., Leonov S.V. Methodology for calculating the reliability of software for automated systems. *Cbornik trudov XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Molodezh' i sovremennye informacionnye tehnologii"* [Youth and Modern Information Technologies: proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Tomsk, 04-07 December 2017] 2017. Pp. 100-101. (In Rus)
8. Markov A.S. Models for evaluating and planning tests of software tools for information security requirements. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*. 2011. Pp. 90-103. (In Rus)
9. Poshivalov, V. P., Daniev, Yu.F. On models of software reliability for ergatic systems. *Technical Mechanics. Техническая механика*. 2017. No. 4. Pp. 89-95. (In Rus)
10. Signs and symptoms of Trojan. *IT Computer Technical Support Newsletter*. 2015. Vol. 1. No. 21. Pp. 1-8. URL: https://ehs.siu.edu/_common/documents/IT%20newsletter/vol-1-no21.pdf (date of access 20.01.2021).
11. Hardikar A., Bambenek J. *Malware 101-Viruses*. SANS Institute, 2008. 76 p. URL: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/incident/malware-101-viruses-32848> (date of access 20.01.2021)
12. Samarin N.N. Types of potentially dangerous opportunities implemented by malicious code. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2016. Vol. 4. No. 9. Pp. 199-202. (In Rus)
13. Toleti Bhanu P., Hypervisors, virtualization and cloud: About hypervisors, system virtualization, and how it works in a cloud environment. *IBM DeveloperWorks®*. 2012. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/cl-hypervisorcompare> (date of access 20.01.2021). (In Rus)
14. Samarin N.N. Analysis of virtual machines for the purpose of their application for the possibility of identifying undocumented actions of software without source code. *Mining informational and analytical Bulletin*. 2013. No. 12. Pp. 84-89. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Samarin N.N., Head of the Research Department No. 6, Federal State Unitary Enterprise "Kvant Research Institute".

For citation: Samarin N.N. A model of secure software operation that formalizes the control of memory usage and cpu accesses. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 68-79. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-68-79 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-80-91

СКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ В АУДИОСИГНАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

ШЕЛУХИН

Олег Иванович¹

РЫБАКОВ

Сергей Юрьевич²

МАГОМЕДОВА

Дженнет Исламутдинова³

АННОТАЦИЯ

В настоящее время открытие детерминированного хаоса является одним из важных предметов исследований в различных областях науки. В данной работе детерминированный хаос рассматривается как некоторая последовательность с определенными свойствами, которую используют для передачи информационного сигнала в стеганографической системе. Анализируется эффективность алгоритма стеганографического встраивания и извлечения цифровой информации в аудиоконтейнеры методом расширения спектра с использованием хаотических сигналов. Метод расширения спектра характеризуется наличием большого количества ошибок на приемной стороне при использовании в классическом варианте, без исходного незаполненного контейнера, т.е. отсутствовала возможность слепого извлечения. Ошибки, возникающие при передаче аудиосигнала по каналу связи, приводили к невозможности корректного извлечения встраиваемой информации. Предлагается использовать алгоритм, повышающий эффективность извлечения информационного сигнала на приемной стороне. Эффективность предложенного алгоритма оценивается величиной вносимых в аудиоконтейнер искажений, а также достоверностью извлечения встраиваемой информации характеризуемой величиной вероятности ошибки. Показано, что для извлечения встраиваемых данных с высокой достоверностью из аудиоконтейнеров следует использовать алгоритм адаптивной фильтрации – трешолдинг с применением дискретного вейвлет преобразования. Проведено исследование по определению наилучшей фильтрации с применением различных ортогональных материнских вейвлетов (Хаар, Добеши и Симлет), при разном уровне разложения сигнала. В ходе данного исследования были даны рекомендации по использованию материнских вейвлетов и было отдано предпочтение вейвлетам Добеши и Симлет. Сформулированы требования к численным значениям параметров встраивания и параметрам генераторов хаотических процессов, используемым для расширения спектра.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Московского Технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, sheluhin@mail.ru

²магистр Московского Технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, svolkov.97@gmail.com

³ассистент Московского Технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, jimamedova@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод расширения спектра; детерминированный хаос; корреляционный прием; дискретное вейвлет преобразование; трешолдинг.

Для цитирования: Шелухин О.И., Рыбаков С.Ю., Магомедова Д.И. Скрытие информации в аудиосигналах с использованием детерминированного хаоса // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 80-91. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-80-91

Введение

Исследования в области теории хаоса нашли своё применение во многих областях науки, в таких как: теории связи и информации, теория электрических цепей, экономике, биологии, социологии.

Теория хаоса на сегодняшний момент может считаться относительно новой областью знаний, применение [1] хаотических систем в приборах в настоящий момент времени может быть подтверждено на следующих примерах:

- обработка информации с применением хаотических процессоров [2];
- распознавание слабых периодических сигналов на фоне сильных шумов [1];
- увеличении точности измерений [1];
- построение радаров с применением хаотических сигналов [3];

Тем не менее, использование хаотических систем в стеганографии ещё не было реализовано.

Хаотическая система — это динамическая система, которая имеет долговременное аperiodическое поведение и демонстрирует чувствительность к значениям начальных условий. Под чувствительностью к значениям начальных условий будем понимать следующее, что две несовпадающие, но очень близкие точки фазового пространства имеют траектории, которые с течением времени существенно отдаляются друг от друга.

Если на генератор хаоса, который работает в хаотическом режиме, действует внешнее случайное воздействие, то от этого вид установившегося колебания существенно не изменится. Напротив, внешнее воздействие определённой частоты может привести к бифуркации и в системе будет наблюдаться установившийся режим. Этот режим при внешних случайных воздействиях будет устойчив к ним. Порог обнаружения находится в самой динамике хаотической системы. При помощи механизма схожего с явлением случайного резонанса достигается улучшение отношения сигнал/помеха. Способность нелинейной динамической системы (генератора хаоса) находиться в устойчивом динамическом режиме на фоне сильных внешних помех должна помочь решить задачу повышения помехоустойчивости передачи (встраивания) цифровой информации на фоне сигнала контейнера (аудиосигнала).

Под хаотической стеганографической системой будем понимать совокупность средств и методов детерминированного хаоса, которые используются с целью формирования скрытого (незаметного) канала передачи информации [7,11,12]. Его целью является не ограничение или регламентирование доступа к сигналу (файлу-контейнеру), а в значительной степени гарантия того, что встроенные данные останутся незамеченными и неподлежащими восстановлению [4].

Наиболее эффективно компьютерная стеганография используется для решения следующих задач:

- защита конфиденциальной информации от несанкционированного доступа;
- защита авторского права на интеллектуальную собственность;
- создание скрытых от законного пользователя каналов утечки информации.

Целью статьи является оценка эффективности алгоритма стеганографического скрытия цифровой информации в аудиоконтейнеры методом расширения спектра с использованием хаотических сигналов.

Алгоритм встраивания водяных знаков в аудиосигналы на основе теории детерминированного хаоса

Стеганографические методы скрытия информации в аудиоконтейнере основаны на особенностях слуховой системы человека, обусловленных слабой восприимчивостью слуха человека к малым изменениям амплитуды при встраивании в него дополнительного информационного сигнала [4, 7]. В качестве подобного информационного сигнала будем рассматривать двоичную псевдослучайную последовательность, встраиваемую в аудиосигнал $\{S_{\text{аудио}}(t_i); i = \overline{1, N}\} = \{S_{a,i}; i = \overline{1, N}\}$ с помощью вспомогательной хаотической непрерывнозначной последовательности $\{X_{\text{хаос}}(t_i); i = \overline{1, N}\} = \{X_{x,i}; i = \overline{1, N}\}$. Алгоритм встраивания будем описывать соотношением:

$$y_i = S_{\text{аудио}}(t_i) + \alpha X_{\text{хаос}}(t_i) \text{ПСП}_{\sigma,j}(t_i); \quad (1)$$

$$i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, K}$$

где α — масштабирующий коэффициент, величина которого выбирается исходя из требований незаметности (скрытности) встраивания информационной последовательности в аудиоконтейнер; N — количество дискретных отсчетов аудио сигнала; K — количество бит встраиваемой ПСП; T_{σ} — длительность одного бита встраиваемой ПСП; $M = \frac{N}{K}$ — количество дискретных выборок аудио-сигнала приходящееся на один бит встраиваемой ПСП; $\Delta t = t_i - t_{i-1} = \frac{T_1}{M}$ период дискретизации аудиосигнала.

Для удобства будем в дальнейшем пользоваться также следующими обозначениями $\text{ПСП}_{\sigma,k(t)} = \text{ПСП}_{\sigma,k,i}$, так что соотношение (1) может быть переписано в виде:

$$y_i = S_{a,i} + \alpha X_{x,i} \text{ПСП}_{\sigma,j,i}; \quad i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, K}. \quad (2)$$

В качестве $\text{ПСП}_{\sigma,k,i} \in \{0, 1\}$ — используется псевдослучайная битовая последовательность, а в качестве шумовой последовательности — непрерывный хаотический процесс.

Хаотический процесс $\{X_{x,i}; i = \overline{1, N}\}$ характеризуется наличием периодичности в своей структуре. Траектория таких процессов имеет свойство воспроизводиться, так что при повторном задании начального состояния динамической системы воспроизводится одна и та же траектория вне зависимости от ее сложности [6, 12]. Хаосом в отличие от обычного шума можно управлять и даже прогнозировать его значения на короткие промежутки времени.

Свойства дискретных генераторов хаоса определяются видом функции отображения и значениями управляющих параметров [9, 10]. Хаотическое колебание можно генерировать, например, используя разностное уравнение. В качестве генератора хаоса (ГХ), формирующего хаотическую последовательность, будем использовать динамическую систему, описываемую разностным уравнением:

$$X_{x,i+1} = \lambda_1 X_{x,i} \exp\{-\beta_1 X_{x,i}^2\}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Здесь λ_1, β_1 — параметры, задающие тип колебаний в динамической системе.

Будем рассматривать хаотическую последовательность со следующими статистическими характеристиками: математическое ожидание $m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_{x,n} = 0$; и дисперсия $D = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (X_{x,n} - m)^2 = 2$.

Распределение детерминированной хаотической последовательности $W(X_x)$ представлено на рис. 1.

Для подбора параметров λ_1 и β_1 , задающих тип колебаний будем использовать бифуркационные диаграммы, отражающие поведение динамической системы в зависимости от значения этих параметров, как это иллюстрируется на рис. 2 и 3. Под бифуркацией понимается изменение вида движения в нелинейной динамической системе при относительно малых изменениях параметров, описывающих данную систему [5]. Выбрав параметр λ в области

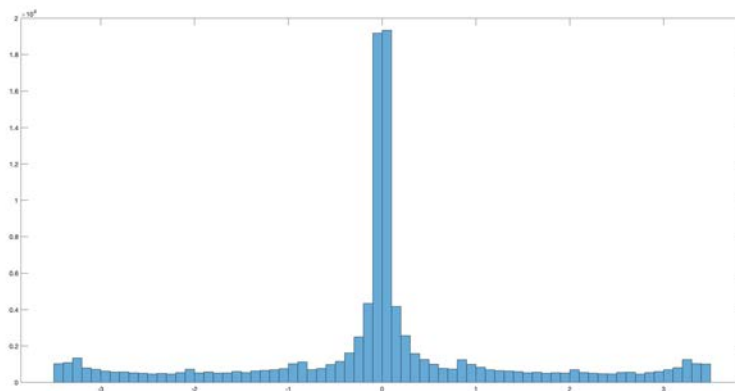


Рис. 1. Плотность распределения хаотической последовательности

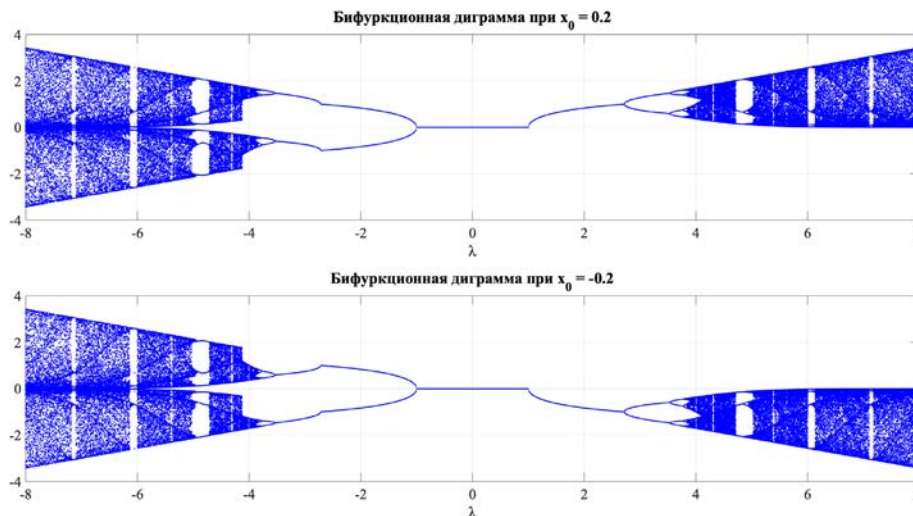


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма по параметру λ при $\beta = 1$, и начальных значениях $x_0 = 0,2$ и $x_0 = -0,2$

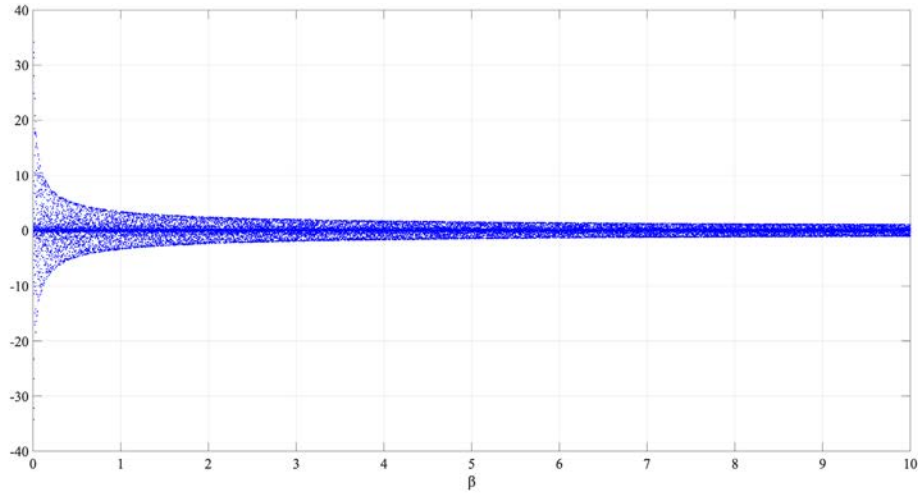


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма по параметру β в области хаоса

$\lambda \in [-8; -4,5]$ или $\lambda \in [4,5; 8]$, получим хаотическое колебание с требуемыми свойствами. В случае выбора параметра в интервале $\lambda \in [-4; 4]$, будем получать колебания с циклически повторяющимися значениями.

Параметр β выступает в роли масштабирующего коэффициента. Чем меньше параметр β , тем больше будет размах амплитуд выходной хаотической последовательности. С увеличением величины параметра β размах амплитуд генерируемых колебаний уменьшается.

При извлечении встроенной ПСП на приемной стороне должны одновременно решаться две задачи [8].

Задача 1. Оценка с высоким качеством аудиосигнала $\hat{S}_{a,i}$ из наблюдаемой реализации заполненного аудиоконтейнера (2).

Задача 2. Выделение с высокой достоверностью информационной последовательности встроенной в аудиосигнал и оценка достоверности скрытной передачи ПСП.

Структурная схема предлагаемого алгоритма выделения аудиосигнала и встроенной ПСП представлена на рис. 4.

На рис. 4 под y_i^* понимается огрубленная копия аудиосигнала, выделяемая из входной последовательности $\{y(t_i); i = \overline{1, N}\}$ рассмотренным ниже способом. Генератор хаотической последовательности $\{X_{x,i}^*; i = \overline{1, N}\}$ на приемной стороне описывается уравнением аналогичным (2) с параметрами λ_2, β_2 .

Как видно из представленной схемы процесс выделения встроенной в аудиосигнал ПСП осуществляется следующим образом. При отсутствии воздействия (режим паузы) на систему хаотических колебаний или при воздействии только одного аудиосигнала корреляционная функция $B_f(m)$ принимает значения близкие к нулю.

При воздействии хаотических колебаний $\{X_{x,i}^*; i = \overline{1, N}\}$ даже при неполной компенсации огрубленной копии аудиосигнала корреляционная функция $B_f(m)$ на входе ПУ принимает значения близкие к максимуму.

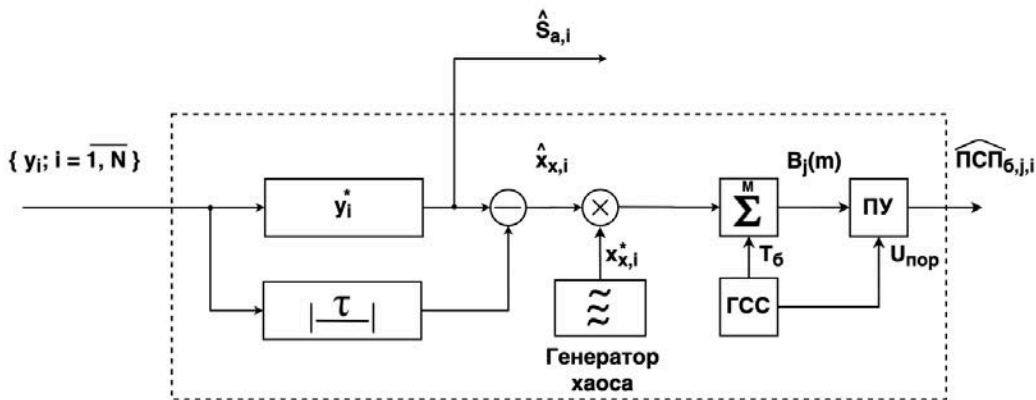


Рис. 4. Структурная схема алгоритма извлечения ПСП из аудиоконтейнера: ГСС — генератор синхросигнала; ПУ — пороговое устройство

Алгоритм формирования огрубленной копии сигнала

Одним из важных звеньев рассматриваемого алгоритма выделения встроенной ПСП является формирование огрубленной оценки аудио сигнала по наблюдаемой реализации $y(t_i)$. Получение подобной оценки предлагается реализовать с помощью прямого (ПДВП) и обратного (ОДВП) дискретного вейвлет преобразования и дополнительного порогового устройства (ПУ), как это показано на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема блока формирования огрубленной копии аудиосигнала

В соответствии с представленной схемой, процедура очистки сигнала $y(t_i)$ от шума с целью формирования огрубленной копии аудиосигнала состоит из трех этапов:

1. Декомпозиция. Выбирается тип материнского вейвлета и производится вейвлет-разложение входного сигнала до уровня разложения P .

2. Детализация. Для каждого уровня разложения от 1 до P производится пороговая обработка детализирующих коэффициентов.

3. Реконструкция. После осуществления пороговой обработки производится вейвлет-реконструкция огрубленной копии входного сигнала.

Рассмотрим этапы более детально.

Как известно любую последовательность дискретных отсчетов анализируемого процесса $y(t_i)$, при конечном числе уровней разложения P , можно представить в виде упорядоченной совокупности коэффициентов разложения по системе масштабирующих функций и вейвлет-функций:

$$y(t_i) = \sum_{k=1}^{2^{N-M}} a_{m,k} \Phi_{m,k}(t_i) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{2^{N-M}} d_{m,k} \Psi_{m,k}(t_i), \quad (4)$$

$m, k \in I,$

где $\Phi_{m,k}(t_i)$ — базисная масштабирующая функция; $\Psi_{m,k}(t_i)$ — базисная вейвлет-функция; $a_{m,k}, d_{m,k}$ — аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты; m, k — параметры масштаба и сдвига в пространстве целых чисел I .

Для адаптации соотношения (4) к обработке сигнала в реальном времени фиксируем длительность бита ПСП размером M отсчетов.

Выполняя дискретное вейвлет преобразование для выборки внутри выбранного окна, размер которого равен

длительности бита в M отсчетов, в каждый момент времени t_p будем получать на некотором масштабном уровне j набор коэффициентов аппроксимации $\{a_{1x}, a_{2x}, a_{3x}, \dots, a_{mx}\}_{t,j}$ и детализации $\{d_{1x}, d_{2x}, d_{3x}, \dots, d_{mx}\}_{t,j}$. Причем количество коэффициентов n на уровне j в окне M будет определяться выражение $n = M/2^j$.

Таким образом, в соответствии с положениями вейвлет-анализа временной ряд $y(t)$ может быть представлен в виде

$$y(t) = y_J(t) + \sum_{j=1}^J D_j(t), \quad (5)$$

где $y_J(t) = \sum_{k=0}^{n_0-1} a_{J,k} \Phi_{J,k}(t)$ — функция начальной аппроксимации, соответствующая масштабу $J (J < J_{\max})$,

$a_{J,k} = \langle y(t), \Phi_{J,k} \rangle$ — масштабный коэффициент аппроксимации, равный скалярному произведению исходного ряда $y(t)$ и масштабной функции «самого грубого» масштаба J , смещенной на k единиц масштаба вправо от начала координат;

$D_j(t) = \sum_{k=0}^{n_0-1} d_{j,k} \Psi_{j,k}(t)$ — функция детализации j -го масштаба,

$d_{j,k} = \langle y(t), \Psi_{j,k} \rangle$ — вейвлет-коэффициент детализации масштаба j , равный скалярному произведению исходного ряда $y(t)$ и вейвлета масштаба j , смещенного на k единиц масштаба вправо от начала координат. Здесь $n_0 = 2^{J_{\max}}$, ($n_0 \leq N$), а $J_{\max} = [\log_2 N]$ — максимальное число масштабов разложения; $[\log_2 N]$ — целая часть числа.

Как показано на рис. 6 коэффициенты аппроксимации вейвлет декомпозиции представляют собой сглаженный сигнал, полученный путем аппроксимации, в то время как коэффициенты детализации имеют вид шумовых колебаний.

Подобные составляющие могут быть удалены с использованием процедуры обнуления или пересчета коэффициентов детализации, значения которых меньше по сравнению со значением порога.

На рис. 7 показана развернутая процедура очистки сигнала $y(t_i)$ от шума. Как видно преобразованный сигнал (3) подвергается дополнительной пороговой процедуре названной трешолдингом (thresholding) в «окне обработки» размером M перед поступлением на окно анализа.

Известным инструментом «очистки» сигнала от высокочастотных компонент (шумов) является трешолдинг. Следующие виды трешолдинга получили наибольшее распространение.

При «жестком» трешолдинге все коэффициенты, превышающие некоторый порог, считаются принадлежащими к «оригинальному» сигналу, а остальные относят к шуму и обнуляют:

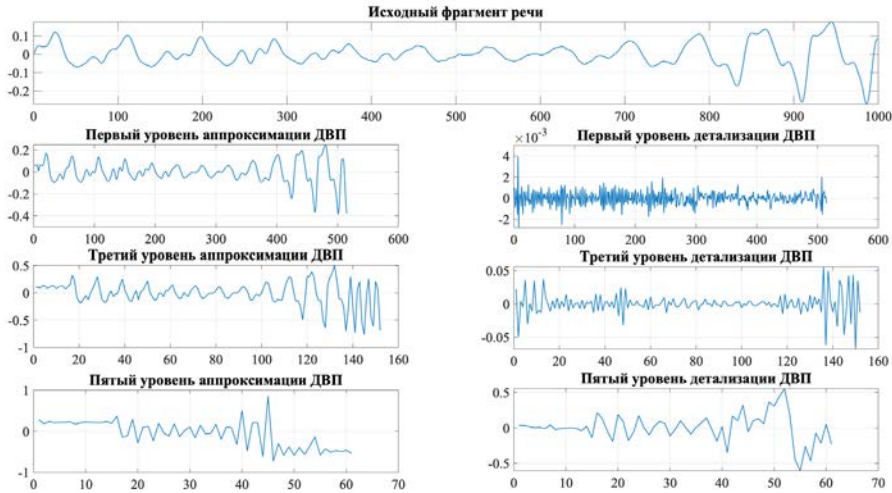


Рис. 6. Разложение фрагмента сигнала на вейвлет-коэффициенты

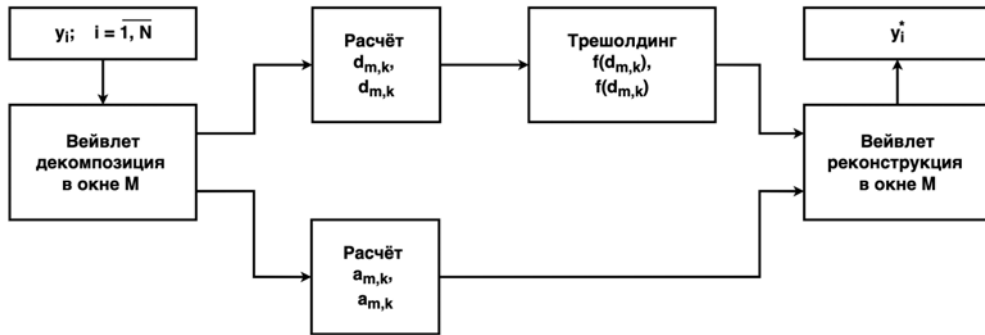


Рис. 7. Развернутая процедура очистки сигнала $y(t_i)$ от шума

$$f(d_{m,k}) = \begin{cases} d_{m,k}, & d_{m,k} > \tau \\ 0, & d_{m,k} \leq \tau \end{cases} \quad (6)$$

где τ — пороговое значение.

Жесткий трешолдинг устанавливает определенный пороговый уровень для каждой последовательности ДВС и заменяет на 0 все компоненты последовательности меньше этого порога. Такой подход, совмещенный с адаптивным алгоритмом выбора порога, позволяет успешно удалять шумы без какой-либо дополнительной информации о сигнале.

«Мягкий» трешолдинг, при котором из коэффициентов детализации, превышающих установленный порог, вычитается его значение:

$$f(d_{m,k}) = \begin{cases} (|d_{m,k}| - \tau) \text{sign}(d_{m,k}), & d_{m,k} > \tau \\ 0, & d_{m,k} \leq \tau \end{cases} \quad (7)$$

где $\text{sign}(d_{m,k})$ — оператор взятия знака,

Процесс формирования огрубленной копии сигнала путем очистки от посторонних шумов и шумов вейвлет-преобразования с помощью «жесткого» трешолдинга» иллюстрируется на рис. 8.

При выборе «жесткого» трешолдинга, с учетом того, что $\overline{X_{x,i}} = 0$, можно считать $\alpha X_{x,i} < \tau$. Так что можно записать $y_i^* = S_{a,i}^*$, где $S_{a,i}^* = S_{a,i} + \Delta_i$.

Здесь Δ_i — погрешность восстановления огрубленной копии аудиосигнала после трешолдинга.

Алгоритм формирования оценки элементов ПСП

В соответствии со схемой, представленной на рис. 4 полученная на предыдущем этапе, огрубленная копия аудиосигнала вычитается из принятого фрагмента в соответствии с алгоритмом

$$\begin{aligned} \widehat{X}_{x,i} &= y_i - y_i^* = y_i - S_{a,i}^* = S_{a,i} + \\ &+ \alpha \text{ПСП}_{\delta,j,i} X_{x,i} - S_{a,i}^* = \Delta_i + \alpha \text{ПСП}_{\delta,j,i} X_{x,i}; \end{aligned} \quad (8)$$

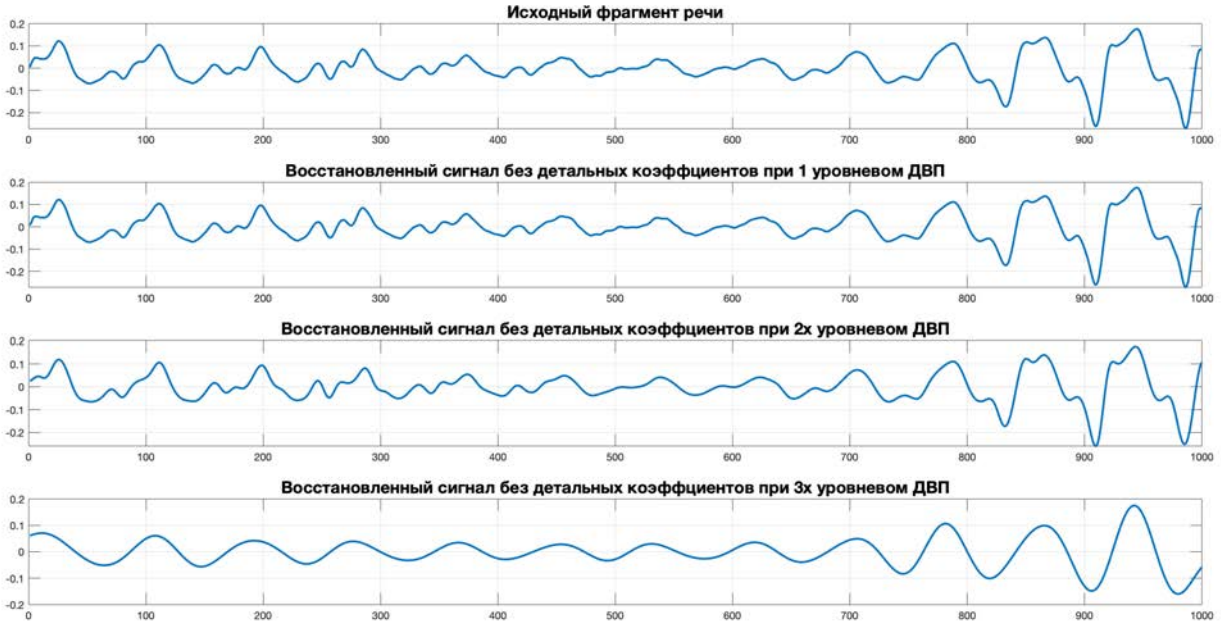


Рис. 8. Создание огрубленной копии аудиосигнала на разных уровнях вейвлет-разложения сигнала

$$\Delta_i = S_{a,i} - S_{a,i}^* \quad (9)$$

Полученная разница подается на коррелятор, где для каждого фрагмента полученной разницы вычисляется корреляционная функция:

$$B_j(m) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m X_{x,j,i}^* \widehat{X}_{x,j,i+m} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m (\Delta_i + \alpha \text{ПСП}_{\delta,j} X_{x,j,i+m}) X_{x,j,i}^* = B_{jx}(m) + \Delta B_{jx}(m), \quad (10)$$

где $\{X_{x,i}^*; i = \overline{1, N}\}$ — опорная последовательность хаотического сигнала на приемной стороне; $B_{jx}(m)$ — корреляционная функция хаотического сигнала длительностью M ; $\Delta B_{jx}(m)$ — погрешность вычисления корреляционной функции обусловленная погрешностями вычисления огрубленной копии аудиосигнала.

Решение об наличии –элемента ПСП в наблюдаемом фрагменте зашумленного аудиосигнала принимается путем сравнения текущего значения статистики $B_j(m = M)$ с пороговым уровнем.

$$\text{ПСП}_{\delta,j}^*(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } B_j(m = M) > U_{\text{пор}} \\ 0, & \text{при } B_j(m = M) < U_{\text{пор}} \end{cases} \quad (11)$$

Пороговое значение $U_{\text{пор}}$ определяется допустимым процентом ложных срабатываний в соответствии с выбранным критерием путем анализа решающей статистики на интервале обучения:

$$C = \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} w(B_j(m) | \text{ПСП } j = 0) dB_j, \quad (12)$$

где $w(B_j(m) | \text{ПСП } j = 0)$ — функция плотности распределения вероятности j -ой корреляционной функции при условии, что ПСП $j = 0$ отсутствует; C — допустимый процент ложных срабатываний.

Результаты встраивания и извлечения

Для оценки качества аудиоконтейнера после встраивания в него ПСП использовались метрики MSE и SNR.

MSE (Mean Square Error) — среднеквадратичная ошибка, одна из простых метрик для оценивания отклонения значений амплитуд заполненного от исходного аудиоконтейнера.

$$MSE = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (S_a(l) - y(l))^2, \quad (13)$$

где L — длина аудиоконтейнера; $S_a(l)$ — l -ое значение амплитуды «пустого» аудиоконтейнера; $y(l)$ — l -ое значение амплитуды заполненного аудиоконтейнера.

SNR (Signal to Noise Ratio) — отношение сигнал/шум, выражается в децибелах.

$$SNR = 10 \lg \sum_{l=1}^L \frac{S_a(l)^2}{(S_a(l) - y(l))^2}, \quad (14)$$

Зависимости указанных метрик для аудиоконтейнеров после встраивания в них ПСП с использованием раз-

личного типа используемых материнских вейвлетов (Хаар, Добеши 4 и Симлет 4) при использовании одноуровневого разложения ($P = 1$) в трешолдинге.

В ходе тестирования использовались два аудиоcontainers, характеристики которых представлены в табл. Для тестирования и получения характеристик MSE, SNR и BER были заданы следующие параметры $M = 1000$; $N = 1\,000\,000$ и $K = 1000$.

Как видно из представленных зависимостей (рис. 9) предпочтение для формирования огрубленной копии аудиосигнала следует отдать материнским вейвлетам Добеши

и Симлет. При выборе параметра встраивания α в формуле (1) в интервале от $10^{-1} \dots 10^{-2}$ качество аудиоcontainerа после встраивания в него ПСП лежит в допустимых пределах как для аудио, так и для речи.

Качество встраивания и извлечения ПСП оценивалось величиной BER (Bit Error Rate) — битовой ошибки, равной отношению количества ошибок к общему количеству бит.

$$BER = \frac{N_{\text{ош}}}{K}, \quad (15)$$

где $N_{\text{ош}}$ — количество неправильно детектированных бит.

Характеристика аудио стегоcontainerов

Тип аудио	Речь	Музыка. Классическая композиция
Длительность	3 мин. 22 сек.	2 мин. 48 сек.
Частота дискретизации	8 кГц	44,1 кГц
Количество каналов	1	2
Формат	wav	wav

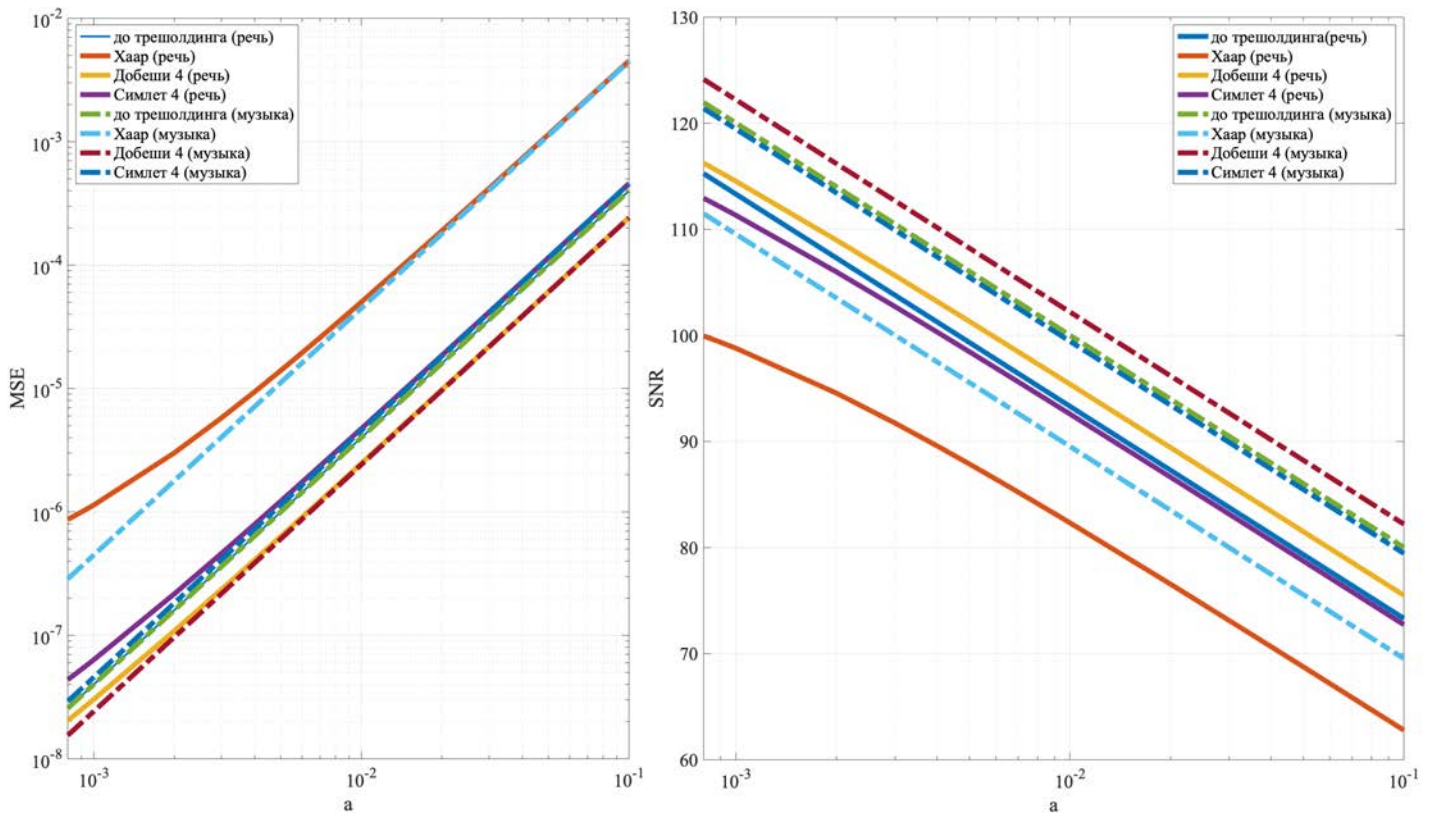


Рис. 9. Зависимость MSE и SNR от масштабирующего коэффициента α , при использовании разных типов вейвлетов в трешолдинге

Зависимости BER от показателя α для разных типов материнских вейвлетов представлены на рис. 10–11.

Как видно из представленных зависимостей предпочтение для извлечения ПСП с высокой достоверностью из аудиоконтейнеров следует отдать материнским вейвлетам Добеши и Симлет. При выборе параметра встраивания α больше, чем 10^{-3} вероятность ошибки составляет менее 10^{-3} .

Из полученных зависимостей видно, что длина встраиваемой хаотической последовательности при $N > 500$ незначительно влияет на качество извлечения.

Важное место в анализе работоспособности предло-

женного алгоритма встраивания занимает вопрос выбора параметров генерации хаотических процессов на передающей λ_1 и β_1 и приемной стороне λ_2 , β_2 и величины их расхождения $\Delta\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) / \lambda_1$.

Как видно из представленных на рис. 12 зависимостей BER от масштабирующего коэффициента α , при различной расстройке параметров λ_1 и β_1 на приемной и λ_2 , β_2 на передающей стороне для обеспечения вероятности ошибки менее 10^{-3} следует выбирать параметр α больше чем $2 \cdot 10^{-3}$ и обеспечивать расхождение параметров $\Delta\lambda$ генераторов хаоса на передающей и приемной стороне менее 0,15.

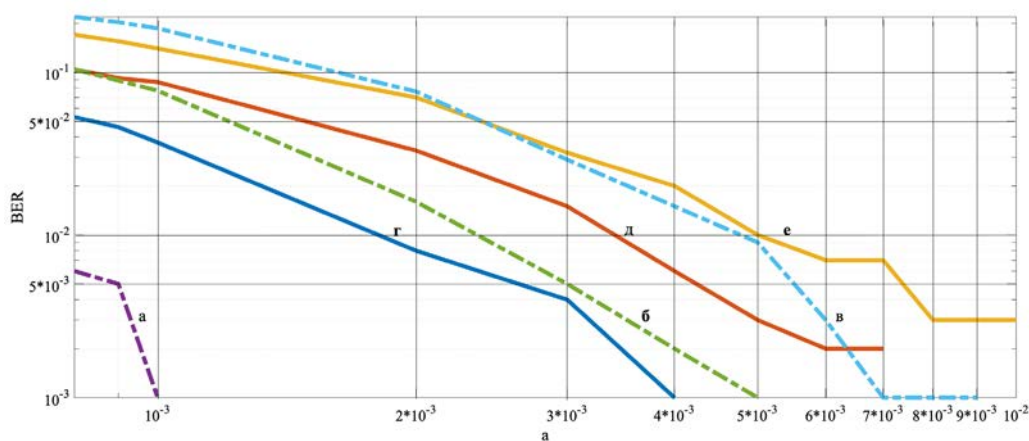


Рис. 10. Зависимость BER от масштабирующего показателя α при разном уровне разложения ($P = 1,2,3$) в трешолдинге при использовании материнского вейвлета Добеши 4: а) $P = 1$ для аудио; б) $P = 2$ для аудио; в) $P = 3$ для аудио; г) $P = 1$ для речи; д) $P = 2$ для речи; е) $P = 3$ для речи

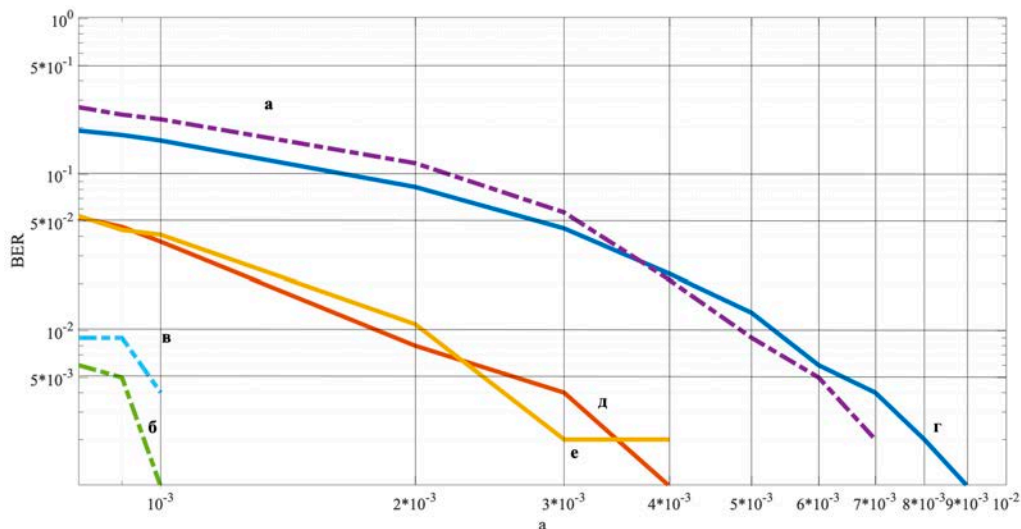


Рис. 11. Зависимость BER от масштабирующего показателя α , при разном типе вейвлета в трешолдинге при $P = 1$: а) Хаар для аудио; б) Добеши 4 для аудио; в) Симлет 4 для аудио; г) Хаар для речи; д) Добеши 4 для речи; е) Симлет 4 для речи

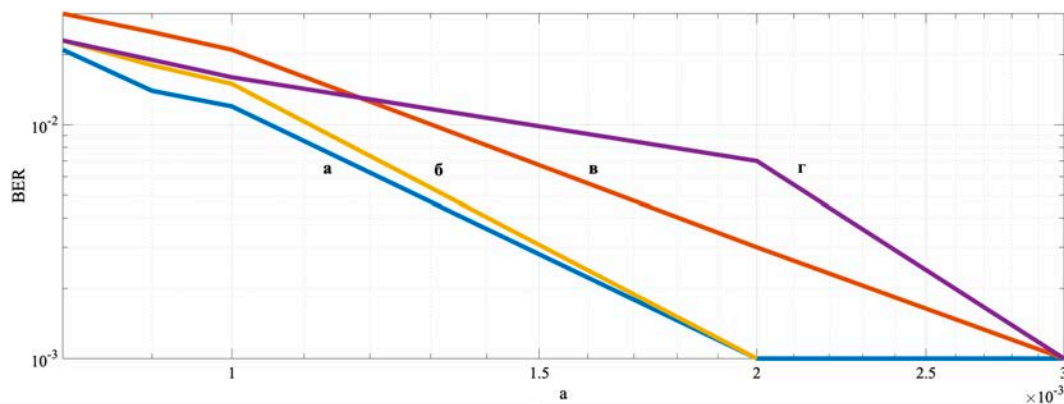


Рис. 12. Зависимость BER от масштабирующего коэффициента α , при разной расстройке параметров на приемной и передающей стороне: а) $\Delta\lambda = 0; \beta_1 = \beta_2 = 1$; б) $\Delta\lambda = 0,15; \beta_1 = 1; \beta_2 = 0,8$; в) $\Delta\lambda = 0,1; \beta_1 = 1; \beta_2 = 0,8$; г) $\Delta\lambda = 0,2; \beta_1 = 1; \beta_2 = 0,8$

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование детерминированного хаоса в стеганографических целях позволяет осуществить скрытное встраивание данных в аудиосигналы.

Показано, что для извлечения ПСП с высокой достоверностью из аудиоконтейнеров предпочтение следует отдать материнским вейвлетам Добеши и Симлет.

При выборе параметра встраивания $\alpha > 10^{-3}$ вероятность ошибки $BER < 10^{-3}$. Длина встраиваемой хаотической последовательности при $N > 500$ незначительно влияет на качество извлечения.

Для обеспечения требуемой достоверности извлечения, встроенной ПСП необходимо обеспечить расхождение параметров $\Delta\lambda$ генераторов хаоса на передающей и приемной стороне менее 0,15.

Литература

1. Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л. Управление хаосом: методы и приложения. II. Приложения // Автоматика и телемеханика. 2004. № 4. С. 3–34.
2. He Bin, Yang Canjun, Zhou Yin-sheng, Chen Ying. Using chaos to improve measurement // Journal of Zhejiang University. 2002. Vol. 3. No. 1. Pp. 47–51.
3. Weinberg G. V., Alexopoulos A. Examples of a Class of Chaotic Radar Signals // Science Report. Edinburgh, Australia: Defense Science and Technology Organization. 2005. 37 p.
4. Абазина Е. С., Ерунов А. А. Цифровая стеганография: состояние и перспективы // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 182–201.
5. Капранов М. В., Томашевский А. И. Система скрытной связи с использованием корреляционного приема и синхронного хаотического отклика // Электромагнитные волны и электрические системы. 2003. Т. 8. № 3. С. 35.

6. Tayel M., Shawky H., Hafez A. A New Chaos Steganography Algorithm for Hiding Multimedia Data // ICACT2012. 2012. Pp. 208–212.
7. Rachmawanto E. H., Setiadi D. R. I. M., Sari C. A., Andono P. N., Farooq O., Pradita N. Spread Embedding Technique in LSB Image Steganography based on Chaos Theory // 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic), Semarang, Indonesia. 2019. Pp. 1–6.
8. Kadhim A. A., Jalal A. S. A. The use of spread spectrum to improve information hiding in images // 2008 Mosharaka International Conference on Communications, Computers and Applications. 2008. Pp. 32–36.
9. Krishnaveni N., Periyasamy S. Image Steganography using LSB Embedding with Chaos // Int. J. Pure Appl. 2018. Vol. 118. No. 8. Pp. 505–509.
10. Shehab J. N., Abdulkadhim H. A. Image Steganography Based on Least Significant Bit (LSB) and 4-Dimensional Lu and Liu Chaotic System // International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE). 2018. Pp. 274–279.
11. Hussain A., Bora P. Novel Watermarking Technique Using Encryption Steganography, Chaotic Logistic Map and Multiple Embedding // Procedia Computer Science. 2020. Pp. 2105–2114.
12. Dogan S. A new data hiding method based on chaos embedded genetic algorithm for color image // Artif Intell Rev. 2016. Pp. 129–143.
13. Tanwar R., Singh K., Zamani M., Verma A., Kumar P. An Optimized Approach for Secure Data Transmission Using Spread Spectrum Audio Steganography, Chaos Theory, and Social Impact Theory Optimizer // Journal of Computer Networks and Communications. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–11.
14. Kadhim O., Hussain Z. Information Hiding using Chaotic-Address Steganography // Journal of Computer Science. 2018. No. 14(9). Pp. 1247–1266.
15. Abod Z., Ismael H., Abdullah A. Chaos-Based Speech Steganography and Quantum One Time Pad // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Pp. 739–745.

AUDIO STEGANOGRAPHY METHOD USING DETERMINED CHAOS

OLEG I. SHELUHIN

Moscow, Russia, sheluhin@mail.ru

SERGEJ Y. RYBAKOV

Moscow, Russia, svolkov.97@gmail.com

DZHENNET I. MAGOMEDOVA

Moscow, Russia, jimagomedova@gmail.com

KEYWORDS: spread spectrum method; deterministic chaos; correlation technique; discrete wavelet transform; thresholding; steganographic system.

ABSTRACT

At present, the discovery of deterministic chaos is one of the significant subjects of research in various fields of science. In this work, deterministic chaos considered as a sequence with specific properties, which is used to transmit information in a stegosystem. The efficiency of the algorithm for steganographic embedding and extraction of digital information into audio containers by the method of spreading the spectrum using chaotic signals is analyzed. The spread spectrum method is characterized by the presence of a large number of errors on the receiving side when used in the classical version, without the original audio, i.e. there was no possibility of blind extraction. Errors arising when transmitting an audio signal over a communication channel made it impossible to extract the embedded information correctly. It proposed to use an algorithm that increases the efficiency of information signal extraction on the receiving side. The efficiency of the method is estimated by the amount of distortion in the original audio and by the reliability of extracted information, which is characterized by the value of the error probability. It showed that to extract embedded data with high reliability from stegoaudio, one should use an adaptive filtering algorithm - thresholding using discrete wavelet transform (DWT). The best filtering method, using various orthogonal mother wavelets (Haar, Daubechies, and Symlet) at different levels of signal decomposition, was determined. In the course of this study, recommendations were made on the use of mother wavelets, and was given preference to Daubechies and Symlet wavelets. Requirements for the numerical values of the embedding parameters and the parameters of the generators of chaotic processes used to expand the spectrum formulated.

REFERENCES

1. Andrievskii B.R., Fradkov A.L. Control of Chaos: Methods and Applications. II. *Applications. Avtomatika i telemekhanika*. 2004. No.4. Pp. 3-34. (In Rus)
2. He Bin, Yang Canjun, Zhou Yin-sheng, Chen Ying Using chaos to improve measurement precision. *Journal of Zhejiang University*. 2002. Vol. 3. No. 1. Pp. 47-51.

3. Weinberg G.V., Alexopoulos A. *Examples of a Class of Chaotic Radar Signals. Science Report*. Edinburgh, Australia: Defense Science and Technology Organization. 2005. 37 p.
4. Abazina E.S., Erunov A.A. Digital steganography: state and prospects. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2016. No. 2. Pp. 182-201. (In Rus)
5. Kapranov M.V. Tomashevskij A.I. A covert communication system using a correlation technique and a synchronous chaotic response. *Electromagnetic waves and electrical systems*. 2003. Vol. 8. No. 3. Pp. 35. (In Rus)
6. Tayel M., Shawky H., Hafez A. A New Chaos Steganography Algorithm for Hiding Multimedia Data. *ICACT 2012*. 2012. Pp. 208-212.
7. Rachmawanto E.H., Setiadi D.R. I. M., Sari C.A., Andono P.N., Farooq O., Pradita N. Spread Embedding Technique in LSB Image Steganography based on Chaos Theory. *2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, Semarang, Indonesia. 2019. Pp. 1-6.
8. Kadhim A.A., Jalal A.S.A. The use of spread spectrum to improve information hiding in images. *2008 Mosharaka International Conference on Communications, Computers and Applications*. 2008. Pp. 32-36.
9. Krishnaveni N., Periyasamy S. Image Steganography using LSB Embedding with Chaos. *Int. J. Pure Appl.* 2018. Vol. 118. No. 8. Pp. 505-509.
10. Shehab J.N., Abdulkadhim H.A. Image Steganography Based on Least Significant Bit (LSB) and 4-Dimensional Lu and Liu Chaotic System. *International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE)*. 2018. Pp. 274-279.
11. Hussain A., Bora P. Novel Watermarking Technique Using Encryption Steganography, Chaotic Logistic Map and Multiple Embedding. *Procedia Computer Science*. 2020. Pp. 2105-2114.
12. Dogan Ş. A new data hiding method based on chaos embedded genetic algorithm for color image. *Artif Intell Rev*. 2016. Pp. 129-143.
13. Tanwar R., Singh K., Zamani M, Verma A., Kumar P. An Optimized Approach for Secure Data Transmission Using Spread Spectrum



Audio Steganography, Chaos Theory, and Social Impact Theory Optimizer. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1-11.

14. Kadhim O., Hussain Z. Information Hiding using Chaotic-Address Steganography. *Journal of Computer Science*. 2018. No.14 (9). Pp. 1247-1266.

15. Abod Z, Ismael H., Abdullah A. Chaos-Based Speech Steganography and Quantum One Time Pad. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol.13. Pp. 739-745.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Sheluhin O. I., PhD, Full Professor, Head of Department Information Security of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

Rybakov S. Y. Postgraduate student of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Department of Information Security.

Magomedova D. I., Assistant of the Moscow Technical University of Communications and Informatics.

For citation: Sheluhin O. I., Rybakov S. Y., Magomedova D. I. Audio steganography method using determined chaos. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1. Pp. 80-91. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-80-91 (In Rus)



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем

▶ npcirs.ru

Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр информационных региональных систем" является предприятием, разрабатывающим автоматизированные системы специального назначения.

Основными направлениями нашей деятельности являются:

- проектирование, создание и ремонт автоматизированных систем управления и их составных частей, систем обработки данных, программного обеспечения, информационных систем для государственных организаций и коммерческих компаний;
- разработка общесистемного и прикладного ПО, внедрение и сопровождение информационных систем;
- защита информации в системах управления, локальных вычислительных сетях, программно-аппаратных комплексах, телекоммуникационных системах;
- производство и поставка технических средств, в офисном и защищенном исполнении;
- создание, внедрение и сопровождение оперативных и учетных систем любой сложности;
- анализ автоматизированных систем на предмет разработки к ним классификаторов и нормативно-справочной информации;
- разработка проектов и создание глобальных, корпоративных, локальных телекоммуникационных систем и структурированных кабельных сетей.

Создаваемые предприятием средства (комплексы средств автоматизации, программные и программно-информационные комплексы, информационные изделия) эксплуатируются в различных государственных органах: в органах военного управления Министерства обороны РФ, а также на предприятиях, в организациях, в органах местного самоуправления субъектов РФ, занимающихся воинским учетом.

Научные исследования в сфере КНСИ позволяют нам качественно анализировать автоматизированные системы и разрабатывать к ним классификаторы и нормативно-справочную информацию.



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем
▶ npcirs.ru

Телефон: 8(800)100-40-90
E-mail: administrator@npcirs.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

Редакция журнала H&ES Research принимает к публикации статьи на русском и английском языках. Предоставляемая рукопись должна быть актуальной, обладать новизной, отражать постановку задачи, содержать описание основных результатов исследования, выводы, а также соответствовать указанным ниже правилам оформления. Текст должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала.

Статья предоставляется в электронном виде, единым файлом, имеющим следующую структуру: заглавие статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, текст статьи (включая иллюстрации, таблицы и формулы), пристатейный список литературы, англоязычный блок. Также представляется отдельная папка с экспортированными изображениями рисунков в формате TIFF, EPS по требованиям указанным в п.7.

К статье прилагается экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати и две рецензии кандидатов или докторов наук по профилю планируемой публикации материалов (сканированные копии в электронном виде).

Все материалы высылаются электронной почтой в адрес журнала: HT-ESResearch@yandex.ru.

1. **Статья подготавливается** в редакторе MS Word. Шаблон статьи можно скачать на сайте журнала www.h-es.ru.

2. **Данные об авторе:** фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и полное название организации – места работы, город, страна, адрес электронной почты и почтовый адрес каждого автора полностью.

3. **Объем аннотации** 200-250 слов. Аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов), без сокращений, структурированной, отражать основное содержание статьи: предмет, цель, методологию проведения исследований, результаты исследований, область их применения, выводы. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Предложения должны начинаться словами: показано, получено, исследовано, предсказано и т.д. и т.п.

4. **Ключевые слова:** от 5 до 7 слов (словосочетаний), разделенных точкой с запятой.

5. **Объем статьи** без аннотации – от 15 до 30 тыс. знаков с пробелами. Рисунки и таблицы в объеме статьи не учитываются.

6. **Формульные выражения** выполняются в редакторе Math Type. Формулы нумеруются в круглых скобках, источники – в прямых. Нумерация формул и приведение в списке источников, на которые нет ссылок по тексту, не допускается. Длина формулы в одну строчку 8-9 см.

Простые формулы и буквенные обозначения величин следует писать в строку обычным текстом. В формулах использовать только буквы латинского и греческого алфавита!

Размеры шрифтов (Size) предварительно перед набором первой формулы установить (в MathType) следующие: кегль основной – 10, крупный индекс – 7, мелкий индекс – 5, крупный символ – 12, мелкий символ – 8. Формулы, не содержащие специальных математических символов, должны быть набраны в тексте (в формате Word). Греческие обозначения, скобки (квадратные и круглые) и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются курсивом

как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log, exp, det ...).

Нельзя использовать сканированные формулы! Все формулы должны быть набраны вручную!

7. **Рисунки и таблицы** в статье должны быть пронумерованы и снабжены подписями, в тексте статьи должны иметься ссылки на каждый рисунок и таблицу (рис.1 и табл.1). Если рисунок или таблица единственные в статье, то их не нумеруют.

Рисунки должны быть четкими, с хорошо проработанными деталями. Избегать текстовых надписей на иллюстрациях. Заменять их цифровыми обозначениями, которые поясняются в подписи или в основном тексте. Все рисунки прилагаются в виде отдельных файлов в формате TIFF, EPS с разрешением не менее 300 dpi для оригинального размера в печатном издании (для больших рисунков ширина от 14 до 20 см, для маленьких от 7 до 9 см).

8. **Список литературы:** от 15 до 50 наименований. Из них самоцитирований не должно быть более 25%. В числе источников желательное не менее 50 % иностранных источников (для статей на английском языке – 15% российских). Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее 8 статей из научных журналов не старше 10 лет, из них 4 – не старше 3 лет.

Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. В списках литературы не размещать ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты и другую нормативную и непериодическую документацию. Эти данные можно указывать в теле статьи в скобках или в виде постраничных сносок (если автор непременно хочет указать нормативный документ или сослаться на свою диссертацию). Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.052008. **Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала www.h-es.ru.**

9. **На английском языке** предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

Все названия издательств и журналов должны быть транслитерированы, а не переведены. Названия организаций в списках литературы (Труды Академии...) должны быть четко выверены с данными организации и иметь официальное английское наименование, которое указано на их сайте или также транслитерированы. Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала www.h-es.ru.

10. Структура статьи на английском языке

Introduction (введение)

Materials and methods (материалы и методы).

Results and Discussions (результаты и обсуждение).

Conclusions (вывод)

Acknowledgements (благодарности, необязательный раздел)

References (ссылки на использованную литературу)

На русском языке предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

Внимание! Редакция оставляет за собой право отклонить представленные материалы, оформленные не по указанным правилам.