

Издательский дом

МЕДИА ПАБЛИШЕР

Научный журнал "Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт"

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

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

Язык публикации: русский, английский.

Территория распространения:

Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж: 1000 экз.

Периодичность выхода: 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра: 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

Предпечатная подготовка:

ООО "ИД Медиа Паблшер"

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 Паблшер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2023

Адрес редакции и издателя

111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная,

д. 8, стр. 1, офис 323

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

Тел.: +7 (495) 957-77-43

Адрес типографии

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

Индексация журнала:

Ulrich's Periodicals Directory; EBSCO; elibrary.ru (РИНЦ)

Google Scholar; CyberLeninka (Open Science);

Bielefeld Academic Search Engine (BASE); OCLC WorldCat;

Registry of Open Access Repositories (ROAR)

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

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

Media Registration Certificate

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

Publication language: Russian, English.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved.

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

© "Media Publisher", 2023

Editorial and Publisher Address

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

www.media-publisher.ru

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

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович

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

Бугаев Александр Степанович

(академик РАН), Россия

Вааль Альберт

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

Варламов Олег Витальевич

(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Гребенников Андрей Викторович

(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

Данилов Владимир Григорьевич

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

Дулкейтс Эрик

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

Елизаров Андрей Альбертович

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

Ибрагимов Байрам

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

Корбетт Ровэлл

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

Кузовкова Татьяна Алексеевна

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

Омельянов Георгий Александрович

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

Самойлов Александр Георгиевич

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

Сысов Николай Николаевич

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

Чиров Денис Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич

(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шарп Майкл

(д.э.н., Европейский институт стандартизации – ETSI), Великобритания

Яшина Марина Викторовна

(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Горгадзе С.Ф., Ву Ши Дао

Обнаружение и синхронизация слабых по мощности шумоподобных сигналов в спутниковой радиосистеме

4

Аристархов Г.М., Кириллов И.Н.,

Кувшинов В.В., Марковский А.В.

Селективные свойства двухрезонаторных структур и высокоизбирательные фильтры на их основе

29

СВЯЗЬ

Лихтциндер Б.Я.

Связь и цифровые двойники

30

ИНФОРМАТИКА

Беззатеев С.В., Елина Т.Н., Ходырев Е.С.

Распределенный реестр истории эксплуатации транспортного средства на основе блокчейн-платформы Hyperledger Fabric

38

Фомичева С.Г.

Влияние ранжирования индикаторов атак на качество моделей машинного обучения в агентных системах непрерывной аутентификации

45

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФОРМАТИКА

Илья Сафонов, Михаил Вяткин, Олеся Хиженкова,

Ксения Неживлева, Игорь Власюк

Анализ угроз и средств обеспечения безопасности персональных данных при использовании пользовательских компьютеров со встроенными устройствами отслеживания взгляда

56

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Яшина М.В., Алероев М.Т.

К проблеме оптимизации свойств вязкоупругих материалов с помощью уравнения Бегли-Торвика

63

CONTENT

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Gorgadze S.F., Vu Sy Dao.
Detection and synchronization of weak power spread spectrum signals in a satellite radio system 4

Aristarkhov G.M., Kirillov I.N., Kuvshinov V.V., Markovskiy A.V.
Selective properties of two-resonator structures and highly selective filters based on them 29

COMMUNICATIONS

Likhtsinder B.Ya.
Communications and digital twins 30

COMPUTER SCIENCE

Bezzateev S.V., Yelina T.N., Khodyrev E.S.
Distributed registry of vehicle operating history based on the blockchain platform Hyperledger Fabric 38

Fomicheva S.G.
Influence of attack indicator ranking on the quality of machine learning models in agent-based continuous authentication systems 45

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMPUTER SCIENCE

Ilya Safonov, Mikhail Vyatkin, Olesya Hizhenkova, Kseniya Nezhivleva, Igor Vlasuyk
Threat analysis and security of personal data using user devices with eye-trackers 56

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Yashina M.V. Aleroev M.T.
On problem of properties optimizing for viscoelastic materials using the Begley-Torvik equation 63

T - C o m m

Telecommunications and transport

Volume 17. No. 8-2023

Release date: 07.08.2023

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

Founder: "Media Publisher", Ltd.

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

Editor in Chief: Dr. Valery O. Tikhvinskiy

Editorial board

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

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

Alexander S. Bugaev
Academician of the RAS, Russia

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

Denis S. Chirov
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

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

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

Julius Golovachyov
Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

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

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

Tatyana A. Kuzovkova
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

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

Alexander G. Samoilov
Doctor of sciences, VLSU, Russia

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

Sergey S. Shavrin
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

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

Oleg V. Varlamov
Doctor of sciences, MTUCI, Russia

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

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

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

ОБНАРУЖЕНИЕ И СИНХРОНИЗАЦИЯ СЛАБЫХ ПО МОЩНОСТИ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В СПУТНИКОВОЙ РАДИОСИСТЕМЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-4-20

Горгадзе Светлана Феликсовна,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
svetlana-gorgadze@yandex.ru

Ву Ши Дао,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
vusydaomtusi@gmail.com

Manuscript received 10 June 2023;
Accepted 25 July 2023

Ключевые слова: шумоподобный сложный сигнал, канал синхронизации, обнаружение (поиск) сигналов, коррелятор, согласованный фильтр, цифровой накопитель, фазовая автоподстройка частоты, автоматическая подстройка времени

Задача одновременной оценки параметров несущих частот и задержек по времени одного, либо сразу нескольких слабых по мощности копий одного и того же шумоподобного сложного сигнала (СлС), либо разных по структуре шумоподобных сигналов, является актуальной для целого ряда спутниковых систем – как радионавигационных, так и предназначенных для передачи информации. Рассматривается проблема совместного обнаружения (поиска) и синхронизации одного или сразу нескольких слабых шумоподобных сложных сигналов, рассогласованных по несущей частоте, фазе частоты и задержке по времени, в аппаратуре спутниковой радиосистемы. Предполагается использование многоэтапной параллельно-последовательной процедуры обнаружения и синхронизации сигналов с совместно работающими устройствами обнаружения и слежения за изменением параметров сигналов с формированием их копий в квазикогерентном приемнике. Для заранее заданных значений характеристик погрешностей оценки несущих частот и задержек по времени шумоподобных сложных сигналов разработана методика приближенной оценки длительности времени их обнаружения и синхронизации в спутниковой радиосистеме. Показано, что при отношении сигнал/шум порядка (-10...-40) дБ эта длительность времени может составить менее 0.5 с при учете возможностей современных методов обработки сигналов и технологических решений, использующихся при их реализации.

Информация об авторе:

Горгадзе Светлана Феликсовна, Московский технический университет связи и информатики, профессор, д.т.н., Москва, Россия
Ву Ши Дао, Московский технический университет связи и информатики, аспирант, Москва, Россия

Для цитирования:

Горгадзе С.Ф., Ву Ши Дао. Обнаружение и синхронизация слабых по мощности шумоподобных сигналов в спутниковой радиосистеме // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 4-20.

For citation:

Gorgadze S.F., Vu Sy Dao. (2023) Detection and synchronization of weak power spread spectrum signals in a satellite radio system. T-Comm, vol. 17, no.8, pp. 4-20. (in Russian)

Введение

Задача одновременной оценки параметров несущих частот и задержек по времени одного, либо сразу нескольких слабых по мощности копий одного и того же шумоподобного сложного сигнала (СлС), либо разных по структуре шумоподобных сигналов, является актуальной для целого ряда спутниковых систем – как радионавигационных, так и предназначенных для передачи информации [1-3,9,10,17,19,20]. В последнем случае, кроме проблемы синхронизации квази-когерентных приемников и обеспечения суммирования сигналов разных спутниковых ретрансляторов, необходимо отметить и необходимость для ряда случаев оперативного выявления всех наземных станций, использующих спутниковые системы, с определением их местоположения с целью контроля частотного ресурса спутниковых ретрансляторов и защиты от несанкционированного доступа [2-4].

Обнаружение (поиск) слабых шумоподобных сигналов при отношениях сигнал/шум на входе приемника по мощности порядка (-10...-40) дБ производится посредством длительного накопления их энергии в приемнике [2,3], причем при неизвестных частоте и задержке по времени принимаемого сигнала первоначальное ее накопление производится с помощью набора корреляторов (Кор) или согласованных фильтров (СФ) [9,10], на выходе которых формируются отсчеты функции неопределенности (ФН) [7,9,10,15,18] фрагмента принимаемого СлС. При этом в большинстве работ, посвященной теме обнаружения (поиска) СлС, как правило ограничиваются рассмотрением только данного подхода. Но необходимо подчеркнуть, что имеются существенные ограничения на длительность времени накопления энергии СлС в таких устройствах, связанные в основном с техническими сложностями их изготовления в случае необходимости обработки СлС с большими базами при значительной ширине области их неопределенности по частоте, что неизбежно в случае применения слабых по мощности СлС в спутниковых радиосистемах.

В результате, длительность времени поиска таких СлС может составлять несколько десятков секунд или даже минут при последовательной перестройке устройств обнаружения по частоте [1-3]. Поэтому во многих случаях необходимо рассматривать Кор или СФ только как устройства, использующиеся с целью повышения достоверности работы последующего последетекторного энергетического обнаружителя СлС [6,26,27], в котором накапливается энергия необходимого количества (до нескольких десятков или даже сотен) фрагментов СлС [13,16,17,23].

Отметим, что точность оценки частоты и задержки по времени СлС, также эффективность различения его копий, рассогласованных по этим параметрам, определяется только размерами проекции(ий) основного пика ФН СлС на плоскость частота-время, то есть характеристиками первого блока накопления энергии СлС, включающего набор Кор или СФ [9,10]. Последующий энергетический накопитель позволит лишь обеспечить точность оценки параметров СлС, соответствующую размерам этой проекции, с требуемой достоверностью [16,17].

При неизвестной частоте СлС значение его рассогласования по частоте относительно опорного сигнала Кор или центральной частоты амплитудно-частотной характеристики

(АЧХ) СФ неизбежно приводит к ограничению длительности времени накопления его энергии в этом устройстве [4,5], что приводит к потерям в отношении сигнал/шум на входе последующего некогерентного накопителя. Другой причиной, ограничивающей длительность времени накопления энергии СлС, является нестабильность несущих и тактовых частот их генераторов как на передающей, так и на приемной стороне [14,15]. Таким образом, при обнаружении (поиске) шумоподобного сигнала одновременно производится и оценка его частоты и задержки по времени. Но в любом случае в конечном итоге на этапе обнаружения (поиска) точность такой оценки определяется размерами проекции основного пика ФН сигнала на плоскость частота-время [1,10-12]. Более точная оценка параметров синхронизации для работы квази-когерентного приемника может быть произведена в устройствах слежения за их изменением в системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и устройстве автоматической подстройки времени (АПВ) [7,9-12]. То есть устройство обнаружения используется с целью вывода дискриминационных характеристик устройств слежения за параметрами сигнала на их линейные участки [7].

Оценка параметров частоты и задержки по времени сигналов осуществляется как правило в канале синхронизации (КС) либо по специальным синхросигналам (СИНХ), либо по информационным сигналам (ИНФ) цифровой системы передачи информации. В случае шумоподобных СлС СИНХ излучаются как правило общей полосе частот с ИНФ и формируются на основе периодически повторяющихся псевдослучайных последовательностей (ПСП) [17,19,20-22]. Распределение мощности радиоканала между СИНХ и ИНФ может оптимизироваться при учете общей эффективности радиосистемы [24,31,32]. В этом случае ИНФ, передаваемые с СИНХ в общей полосе частот, могут рассматриваться как дополнительные шумовые помехи, существенно превосходящие по мощности полезный СлС, являющийся СИНХ. Во многих случаях, например, в спутниковых радионавигационных системах, ИНФ отсутствует, и в канале связи фактически передаются только периодические СИНХ [29,30].

Отметим, что часть КС, состоящая из набора Кор или СФ и энергетического накопителя, может работать и по более мощным, по сравнению с СИНХ, ИНФ, поскольку в цифровом канале связи набор последних всегда ограничен, и они всегда повторяются во времени, но ФАПЧ и АПВ могут работать только по СИНХ [17].

В дальнейшем будем рассматривать в качестве СИНХ периодические двоичные фазоманипулированные (ФМн) СлС, описывающиеся на длительности периода их повторения T_s как

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i S_0(t - iT_s) \cos(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

где N_s – период повторения двоичной ПСП, $d_i \in \{-1,1\}$ – ее элементарные символы, $i = 1, \dots, N_s$ – номер символа ПСП, $S_0(t)$ – функция формы элементарного импульса СИНХ длительностью T_s , f_0 – его несущая частота.

Ширина полосы частот, занимаемой радиосистемой с шумоподобными СлС, приблизительно равна их тактовой частоте $f_T = 1/T_s$, и может составлять от единиц до десятков, а

в перспективе сотен МГц в разных спутниковых радиосистемах. Поэтому рассмотрим и более сложный вариант шумоподобных СлС, когда для их формирования используются составные ПСП. При этом основная ПСП является двоичной, но за длительность времени T_s частота соответствующего двоичного ФМн СлС многократно перескакивает по закону модулирующей многозначной ПСП на одну из частотных позиций. Таким образом, рассматриваются СлС с дискретной перестройкой рабочей частоты без разрыва ее фазы при фазовой манипуляции этой частоты. В дальнейшем будем называть их дискретными частотными сигналами с фазовой манипуляцией (ДСЧ-ФМн СлС). В качестве многозначных ПСП можно рассматривать, например, четверичные E -последовательности Велти [9] для перескоков по четырем частотам.

В результате для формирования ДСЧ-ФМн СлС используются двоично-четверичные ПСП. Описание данных СлС будет не полным, если не отметить, что в приемнике при формировании второй промежуточной частоты в ее преобразователе используется один гетеродин с целью исключения разрыва фазы, у разночастотных сегментов принимаемого двоичного ФМн СлС; так же для исключения разрыва фазы у этих сегментов каждая из четырех частот является кратной тактовой частоте СлС f_T . В передатчике начальные фазы элементарных импульсов двоичной ПСП формируются также одинаковыми. В результате разночастотные сегменты двоичных ПСП имеют одинаковые начальные фазы, определяемые фазовым сдвигом сигнала гетеродина приемника относительно принимаемого сигнала.

Целью данной работы является рассмотрение совместной работы устройств обнаружения (поиска) слабых шумоподобных сигналов и устройств слежения за изменением их параметров при заданной точности их конечной оценки с формированием копий принимаемых сигналов в квазикогерентном приемнике при многоэтапной параллельно-последовательной процедуре обнаружения и синхронизации, а также выработка единого критерия качества синхронизации и его анализ для спутниковой радиосистемы.

Обобщенная структурная схема канала синхронизации слабых шумоподобных сигналов

В соответствии с вышесказанным предполагается, что в КС первоначально производится обнаружение-различение всех шумоподобных СлС, одновременно присутствующих на входе приемника, то есть как разных по форме СлС, так и всех их копий, рассогласованных по частоте и задержке по времени. При этом в приемнике имеется банк возможных форм СлС, которые могут оказаться на его входе. С этой целью используется устройство обнаружения СлС (УОСлС), входящее в состав КС, структурная схема которого приведена на рисунке 1. Таким образом, в УОСлС производится обнаружение и первоначальная грубая оценка параметров синхронизации (частоты и задержки по времени) всех шумоподобных СлС, одновременно присутствующих на входе приемника.

Информация о грубых значениях параметров синхронизации всех обнаруженных СлС вводится в устройство выделения квазикогерентных опорных СлС (УВКОСлС) с помощью схемы захвата (СЗ) (см. рис. 1). В УВКОСлС производится более точная оценка и слежение за задержками по времени и несущими частотами всех обнаруженных в УОСлС сигналов.

Для идентификации режима слежения в соответствующих устройствах используется схема подтверждения (СхП). Она инициирует процедуру обнаружения СлС заново в случае, если он был обнаружен в УОСлС, но не произошел его захват в УВКОСлС, либо если произошел срыв слежения за его параметрами. На рисунке 1 показано также устройство обработки информационных сигналов (УОИС) когерентного типа, так как по результатам работы КС могут формироваться когерентные опорные информационные сигналы.

Более подробно структурная схема приемника совокупности шумоподобных СлС представлена на рисунке 2, где показано, что УВКОСлС состоит из набора схем ФАПЧ, а также набора схем автоматической подстройки времени (АПВ), причем каждая схема ФАПЧ с помощью перекрестных связей объединена с одной из схем АПВ. Вместе они осуществляют совместное слежение за несущей частотой и задержкой по времени одного из обнаруженных СлС. На рисунке 2 показан также генератор опорных синхросигналов (СИНХ) (Ген. СИНХ), который фактически входит в состав набора схем АПВ и содержит банк всех возможных синхросигналов, по которым и работает КС. Но в нем, с целью настройки схем АПВ на слежение за задержками по времени обнаруженных СлС, формируются опорные сигналы только тех форм, которые были обнаружены в УОСлС.

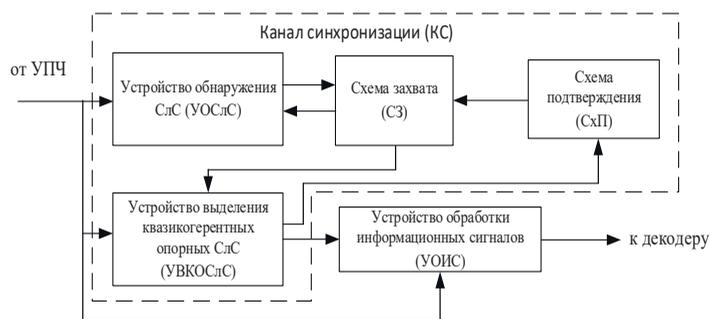


Рис. 1. Обобщенная структурная схема приемника совокупности шумоподобных СлС

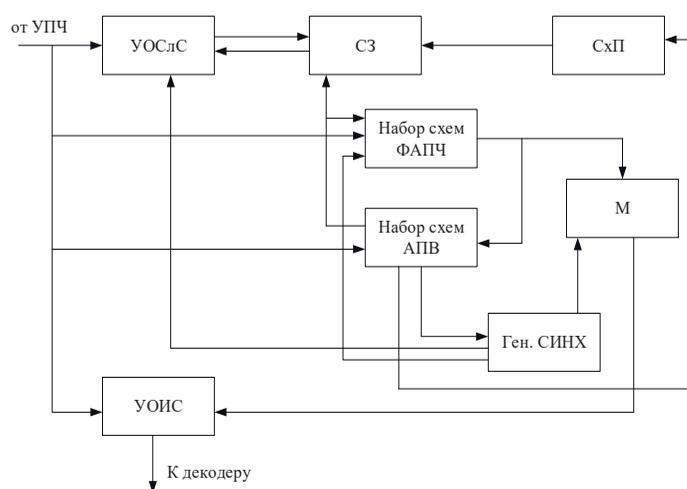


Рис. 2. Схема приемника шумоподобных СлС с системами ФАПЧ и АПВ

Таким образом, синхронизация опорных СИНХ, формируемых этим генератором, производится в АПВ, конечным итогом работы которого является формирование в Ген.

СИНХ копий принимаемых СлС на видеочастоте, синхронных с ними по времени. Банк СИНХ, содержащийся в Ген. СИНХ, используется также для программирования УОСлС. Кроме того, опорные СИНХ используются для формирования опорных информационных СлС на радиочастоте в модуляторе (М) с целью когерентной обработки информационных сигналов. Несущие частоты обнаруженных СлС подаются на М с выходов генераторов, управляемых напряжением (ГУН) схем ФАПЧ [7]. Для ДСЧ-ФМн СлС структурная схема КС для одного принимаемого СИНХ рассмотрена на рисунке 3.

В данном случае УВКОСлС состоит из одной схемы АПВ и четырех идентичных схем ФАПЧ, каждая из которых работает на своей промежуточной частоте. Схемы ФАПЧ и АПВ работают с перекрестными связями. УОИС работает по ИНФ.

Для синхронизации УВКОСлС используется отдельный непрерывно повторяющийся ДСЧ-ФМн СИНХ. УВКОСлС включается в работу после обнаружения СлС в УОСлС; после вхождения в синхронизм УВКОСлС начинается прием полезной информации в УОИС. Поскольку в каждый момент времени принимаемый СлС присутствует только на одной из четырех частот, то для повышения помехоустойчивости УВКОСлС и УОИС путем улучшения в четыре раза отношения сигнал/помеха, – после вхождения в синхронизм схем ФАПЧ и АПВ стробирующие импульсы с генератора четверичной Е-последовательности поочередно открывают один из соответствующих четырех ключей (Кл) на время, равное длительности частотных сегментов СлС.

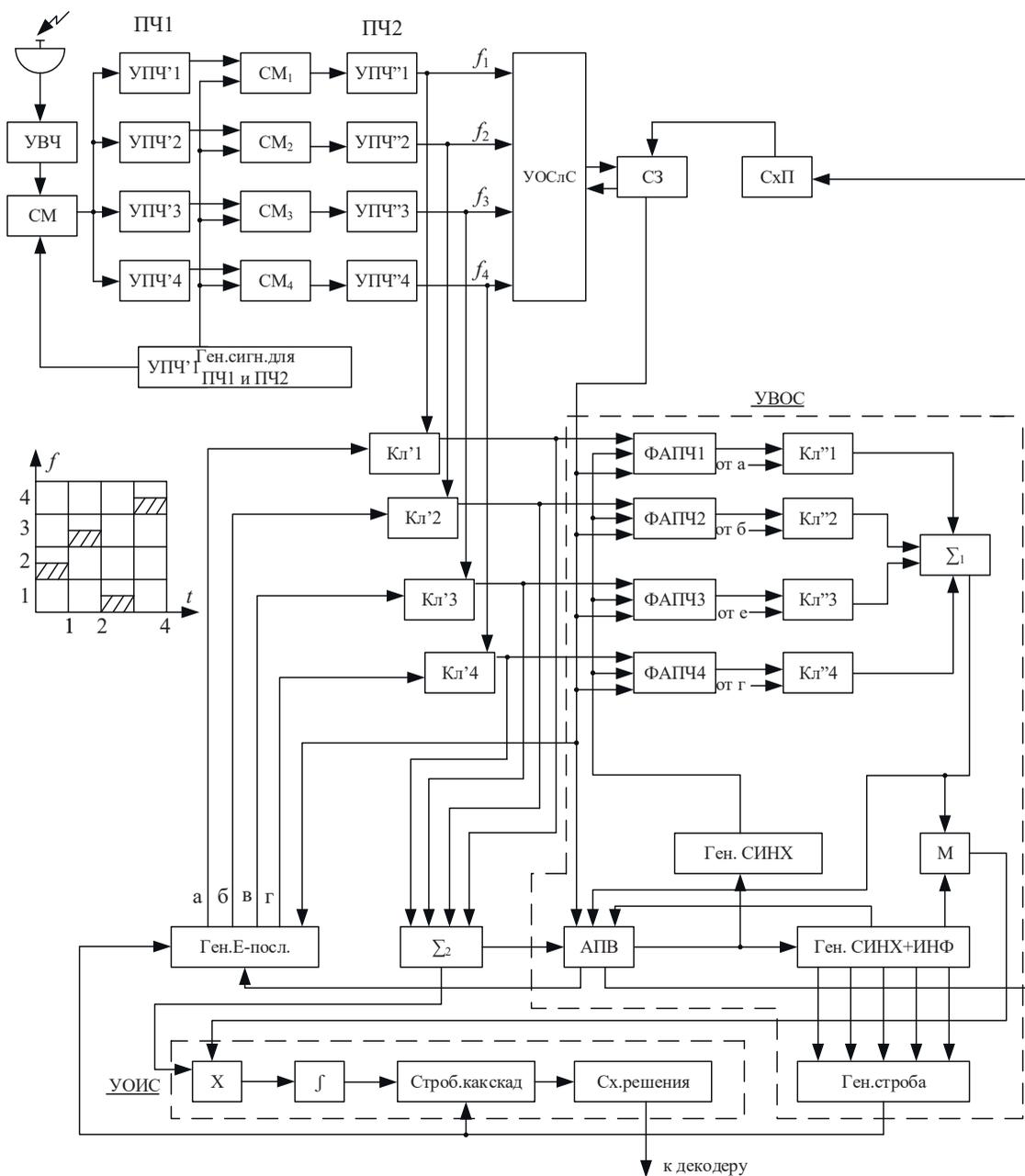


Рис. 3. Структурная схема канала синхронизации двоично-четверичного ФМн СлС. УВЧ – усилитель высокой частоты, СМ – смеситель, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, ПЧ – промежуточная частота, Кл – ключ.

Обнаружение (поиск) шумоподобных СлС

Предположим, что на входе приемника, присутствует в общем случае неизвестное число K аддитивных копий одного и того же СлС $s(t)$, рассогласованных друг относительно друга по временным задержкам, частотам несущих колебаний и их начальным фазам, то есть $s(t-t_1-\tau_1, f_1-\Delta f_1, \Delta\varphi_1), \dots, s(t-t_k-\tau_k, f_k-\Delta f_k, \Delta\varphi_k), \dots, s(t-t_K-\tau_K, f_K-\Delta f_K, \Delta\varphi_K)$, а также белый гауссовский шум, где $k = 1, \dots, K$ – номер копии СлС, $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_k, \dots, \tau_K]$ и $\Delta f = [\Delta f_1, \dots, \Delta f_k, \dots, \Delta f_K]$ – неизвестные относительно малые и медленные смещения временных задержек и несущих частот этих СлС относительно постоянных и известных их значений $t=[t_1, \dots, t_k, \dots, t_K]$, $f = [f_1, \dots, f_k, \dots, f_K]$, а $\Delta\varphi = [\Delta\varphi_1, \dots, \Delta\varphi_k, \dots, \Delta\varphi_K]$ – случайные сдвиги начальных фаз колебаний соответствующих несущих частот относительно нулевого сдвига фазы.

В случае, если $K = 1$, оценка параметров СлС, то есть его смещения по времени $\hat{\tau}_1$, частоте $\hat{\Delta f}_1$ и фазе частоты $\hat{\Delta\varphi}_1$ относительно t_1 , f_1 и нулевого фазового сдвига на фоне аддитивного белого гауссовского шума в соответствии с критерием максимального правдоподобия описывается как [7,33]:

$$\hat{\tau}_1, \hat{\Delta f}_1, \hat{\Delta\varphi}_1 = \arg \max_{\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1} \left(\text{Re} \left[\dot{Z}(\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1) + \xi \right] \right), \quad (2)$$

где ξ – аддитивная шумовая составляющая на входе решающего устройства,

$$\dot{Z}(\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1) = e^{j\Delta\varphi_1} \dot{\chi}(t_1, \tau_1), \quad (3)$$

$$\dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1) = \frac{1}{E_{1T_{\text{нак}}}} \int_0^{T_{\text{нак}}} \dot{S}(t) \dot{S}^*(t-\tau_1) e^{j2\pi\Delta f_1 t} dt, \quad (4)$$

$\dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1)$ – комплексная ФН СлС, $\dot{S}(t)$ – его комплексная огибающая, $E_{1T_{\text{нак}}}$ – его энергия, накопленная в течение времени $T_{\text{нак}}$. Таким образом,

$$\hat{\tau}_1, \hat{\Delta f}_1, \hat{\Delta\varphi}_1 = \arg \max_{\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1} \left(\text{Re} \left[e^{j\Delta\varphi_1} \dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1) \right] \right). \quad (5)$$

Далее учитывают, что оценка $\Delta\varphi_1$ является мало информативной и значительно усложняет алгоритм оценки $\tau_1, \Delta f_1$, в результате чего в (2) вместо действительной части функции $\dot{Z}(\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1) + \xi$ рассматривают ее модуль, то есть $|\dot{Z}(\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1) + \xi| = |\dot{Z}(\tau_1, \Delta f_1, \Delta\varphi_1)| + \xi_{\chi^2}$ [3,26]. Тогда (5) можно переписать в виде:

$$\hat{\tau}_1, \hat{\Delta f}_1 = \arg \max_{\tau_1, \Delta f_1} \left(\left| \dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1) \right| + \xi_{\chi^2} \right). \quad (6)$$

Как следует из анализа последних формул, вариант алгоритма оценки параметров $\tau_1, \Delta f_1$ (5) требует оценки и $\Delta\varphi_1$. Основным его преимуществом является то, что ξ – аддитивный гауссовский белый шум. Но в алгоритме (6) помеховая составляющая ξ_{χ^2} имеет обобщенное хи-квадрат распределение [26]. Этим можно было бы объяснить выигрыш алгоритма (5), по сравнению с (6), по точности оценок искомым параметров. Но в действительности выигрыш является спорным из-за увеличения размерности области определения функции $e^{j\Delta\varphi_1} \dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1)$, по сравнению с $|\dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1)|$, и влияния точности оценки $\Delta\varphi_1$ на точность $\hat{\tau}_1, \hat{\Delta f}_1$.

Таким образом, в приемнике необходимо вычислить функцию $|\dot{\chi}(\tau_1, \Delta f_1)|$, типичный вид которой для двоичного ФМн СлС показан на рисунке 4. Также на этом рисунке приведены ее сечения по оси времени $|\dot{\chi}(\tau_1, 0)|$ и по оси частот $|\dot{\chi}(0, \Delta f_1)|$. Ширина первого из них до его первых нулевых значений составляет $2T_3 = 2/f_T$, откуда следует, что-то точность оценки времени задержки СлС увеличивается при увеличении ширины его спектра. Вместе с тем, как следует из (4), ширина сечения ФН $|\dot{\chi}(0, \Delta f_1)|$ составит $2/T_{\text{нак}}$, то есть с увеличением $T_{\text{нак}}$ увеличивается и точность оценки частоты СлС. Причем, как следует из (4), при $\Delta f_1 = 0$ функция $\dot{\chi}(\tau_1, 0)$ представляет собой свертку комплексных огибающих опорного и принимаемого СлС. Но в общем случае комплексная огибающая принимаемого СлС – это $\dot{S}(t)$, а в приемнике формируется опорный комплексный видеосигнал $\dot{S}^*(t-\tau_1) e^{j2\pi\Delta f_1 t}$ при всех возможных значениях τ_1 и Δf_1 с учетом t_1 и f_1 .

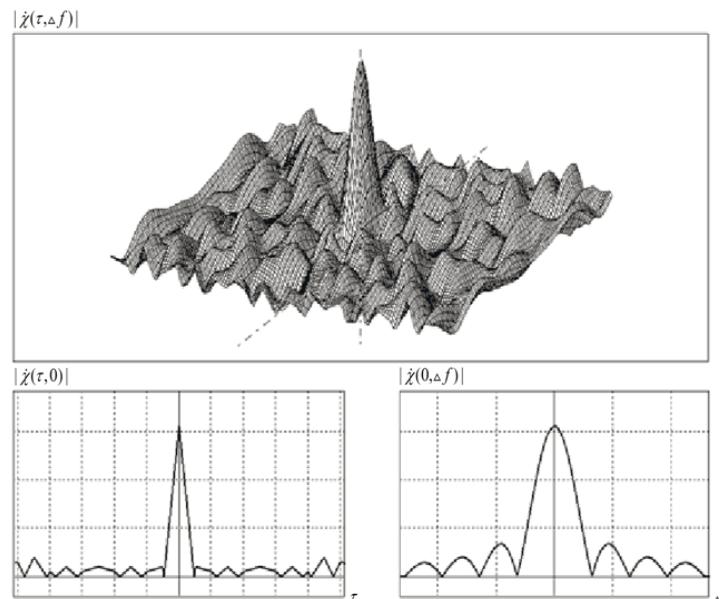


Рис. 4. Типичный вид модуля ФН СлС и его сечений по времени и частоте

УОСлС с цифровыми устройствами вычисления свертки комплексных огибающих опорных и принимаемых СлС

С учетом вышесказанного, полагая, что в приемнике вычисляется цифровая свертка опорного и принимаемого СлС, представим УОСлС для одного СлС (то есть УОСлС1) в виде, показанном на рис. 5. Из его анализа видно, что генератор опорной частоты (ГОЧ1) формирует гармонический сигнал частоты $f_{оп1} = f_1 + \Delta f_1$, а на выходе ФНЧ1 (рис. 5) формируется функция $Re[\dot{S}(t)\exp(j2\pi\Delta ft + \varphi)]$, на выходе ФНЧ2 – функция $Im[\dot{S}(t)\exp(j2\pi\Delta ft + \varphi)]$, где Δf – разница между $f_{оп1}$ и несущей частотой входного СлС $s(t)$, а φ – случайный сдвиг фазы между сигналами этих частот. Далее производится дискретизация этих сигналов по времени с помощью АЦП с тактовой частотой $f_T = 1/T_3$, вырабатываемой тактовым генератором (ТГ). Но согласно теореме Котельникова, частота дискретизации данного сигнала по времени должна быть в два раза больше f_T . В данном случае повышение этой частоты обеспечивается повторной дискретизацией этого же сигнала, но со сдвигом по времени на $T_3/2$. Затем вычисляются дискретные свертки отсчетов синфазной и квадратурной составляющих принимаемого СлС и опорной ПСП, на основе которой он сформирован, в устройствах свертки ПСП (УСПСП). При этом УСПСП1-УСПСП4 – это одно и то же устройство, вычисляющее дискретную свертку синфазной (УСПСП1 и УСПСП3) и квадратурной (УСПСП2 и УСПСП4) составляющих комплексной огибающей входного СлС с опорной ПСП, но в УСПСП3 и УСПСП4 отсчеты входного СлС сдвинуты на $T_3/2$ относительно его отсчетов в УСПСП1 и УСПСП2.

Необходимо учитывать, что f_T не может быть точно равна тактовой частоте принимаемого СлС из-за нестабильностей ТГ как на приемной, так и на передающей стороне, что неминуемо приведет к так называемому проскальзыванию, когда соседние отсчеты СлС в любом АЦП будут приходиться на один и тот же его элементарный импульс, либо один импульс будет пропущен. Но очевидно, что благодаря повторной дискретизации принимаемого СлС со сдвигом по времени на $T_3/2$ проскальзывание не может произойти в АЦП1 и АЦП2 одновременно с таким же событием в АЦП3 и АЦП4. Таким образом, проблема проскальзывания из-за нестабильности ТГ частично решается повторной дискретизацией принимаемого СлС. Но длительность СлС, энергия которого может накапливаться в УСПСП $T_{нак}$, ограничивается длительностью промежутка времени между соседними проскальзываниями. Очевидно, это время будет соответствовать длине ПСП, равной δ^{-1} , где δ – максимальное относительное отклонение частоты ТГ от ее номинального значения. Тогда длина ПСП, обрабатываемая в устройстве свертки, теоретически может составлять несколько сотен тысяч, поскольку δ в современных радиосистемах обычно не менее $10^{-5} \dots 10^{-6}$. Таким образом, казалось бы, можно выбрать значение $T_{нак}$ таким, чтобы обеспечить отношение сигнал/шум на выходе УСПСП достаточным для обнаружения

СлС с любыми заданными значениями вероятности правильного обнаружения $p_{обн}$ и ложной тревоги $p_{лт}$. Но в действительности, если рассогласование по частоте сигнала с выхода ГОЧ1 и принимаемого СлС больше, чем $1/2T_{нак}$, то он не будет обнаружен из-за отсутствия сигнала на выходе устройства цифровой свертки. Значение $T_{нак}$ ограничивается также требованиями к сложности или длительности времени ее вычисления.

Если энергии СлС длительностью $T_{нак}$ не достаточно для его обнаружения с заданными $p_{обн}$ и $p_{лт}$, можно использовать цифровое последетекторное накопление энергии некоторого числа СлС с этой длительностью в энергетическом цифровом накопителе (НЦ), показанном на рисунке 5, где в РУ1 принимается решение о превышении сигналом порогового уровня, то есть происходит дополнительное квантование сигнала на два уровня. Затем с помощью набора счетчиков (Сч) подсчитывается число превышений порогового уровня РУ1 в течение некоторого промежутка времени, соответствующего числу накапливаемых СлС длительностью $T_{нак}$. При этом число Сч равно длине ПСП N , соответствующей $T_{нак}$, а разрядность каждого из них определяется числом импульсов СлС с длительностью $T_{нак}$, энергию которых необходимо накопить. Таким образом, рассматривается два варианта накопления энергии СлС – с помощью вычисления его свертки и некогерентное накопление с помощью цифрового энергетического накопителя. Эффективность последнего варианта объясняется существенным увеличением отношения сигнал/шум на входе РУ1, по сравнению со входом приемника, из-за использования цифровой свертки принимаемого СлС. Отметим, что НЦ не позволяет повысить точность оценки параметров принимаемого СлС, а лишь улучшить вероятностные характеристики его обнаружения.

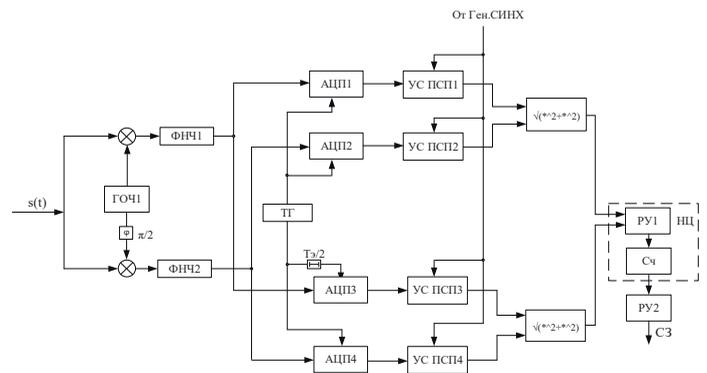


Рис. 5. Функциональная схема устройства обнаружения СлС

Рассмотрим возможность обнаружения K аддитивных копий одного и того же СлС, рассогласованных по частоте и задержке. При этом будем учитывать, что ширина сечения ФН СлС по частоте составляет $1/T_{нак}$, в результате чего можно обеспечить эффективное накопление энергии только тех СлС, разность несущих частот которых и $f_{оп1}$, то есть Δf , не больше $1/3T_{нак}$. В конечном итоге следует выбрать значение $T_{нак}$ таким, чтобы в пределах полосы частот

$[f_{оп1} - 1/3T_{нак}, f_{оп1} + 1/3T_{нак}]$ имелась только одна копия принимаемого СлС с неизвестной задержкой по времени, либо совокупность СлС с одинаковыми несущими частотами и разными задержками по времени.

В этом случае нелинейное преобразование при вычислении квадратного корня из суммы квадратов синфазной и квадратурной составляющих результирующего сигнала не приводит к появлению существенных взаимных помех между копиями одного и того же СлС, поскольку фактически в каждый момент времени данному преобразованию подвергается лишь один СлС, а взаимные помехи между копиями минимизируются при выборе значения $T_{нак}$.

Для обнаружения всех копий СлС, рассогласованных по частоте и задержке по времени, необходимо либо последовательно перестраивать $f_{оп1}$ с шагом $1/3T_{нак}$, либо параллельно формировать опорные частоты с тем же шагом, перекрывая область неопределенности СлС по частоте. В последнем случаях необходимо одновременно использовать УОСлС1, УОСлС2, ..., УОСлС N_q , число которых N_q соответствует числу формируемых опорных частот $f_{оп1}, f_{оп2}, \dots, f_{опN_q}$. Структурная схема УОСлС для этого случая представлена на рисунке 6. Таким образом, в УОСлС реализуется грубая оценка задержек по времени несущих частот СлС с точностью $1/(3T_{нак})$ и их задержек по времени с точностью T_3 .

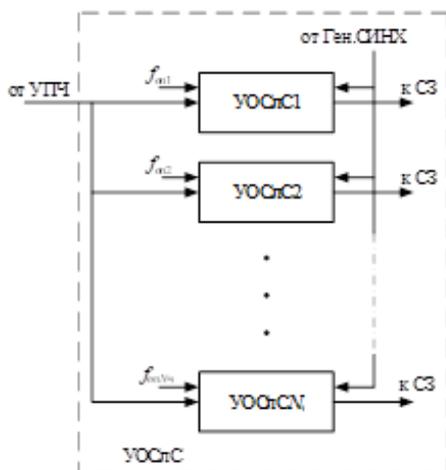


Рис. 6. Структурная схема УОСлС, предназначенных для обнаружения совокупности СлС, рассогласованных по частоте и временной задержке

Вероятностные характеристики обнаружения совокупности СлС, рассогласованных по частоте и временной задержке, можно повысить, если увеличить $T_{нак}$. Данное обстоятельство иллюстрируется с помощью рисунка 7, где показаны результирующая ФН четырех копий одного и того же СлС при двух значениях параметра $T_{нак}$. Отметим, что с целью обнаружения СлС, формируемых на основе разных по структуре ПСП, необходимо последовательно перестраивать УСПСП данного УОСлС, либо параллельно использовать УОСлС, согласованные с разными по структуре СлС.

Эффективность данного устройства в существенной степени зависит от длительности времени вычисления цифровой свертки в УСПСП. Ее ускоренные алгоритмы, основанные на приведении матриц-циркулянтов ПСП к матрице Уолша-Адамара или ее фрагментам, известны для большого класса ПСП таких как М-последовательности (МП) и их отрезки (сегменты), коды Голда и их сегменты, последовательности Касами и т.д. [35]. Самый существенный выигрыш по числу элементарных математических операций, равный N/m , будет при использовании периодических МП, по сравнению с традиционным способом вычисления свертки, где N – длина ПСП, соответствующая $T_{нак}$, а m – глубина памяти ПСП [8,14,19]. На практике такой выигрыш по длительности времени вычисления свертки может достигать нескольких десятков секунд. В любом случае отрезок ПСП сначала записывается в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), после чего ускоренно вычисляется его свертка с опорной ПСП и фиксируется время вычисления, затем производится экстраполяция по времени обнаруженного фрагмента ПСП на сигнал канала связи с учетом ее возможной погрешности [20-22].

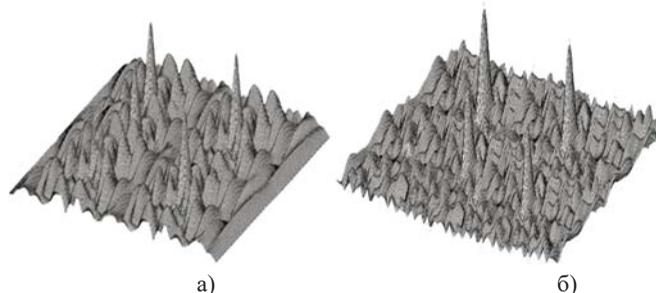


Рис. 7. Результирующие ФН четырех рассогласованных копий одного и того же СлС для двух значений $T_{нак}$; рисунок а) построен для значения $T_{нак}$, меньшего, чем рисунок б)

При достаточно высокой эффективности УСПСП, которая, кроме алгоритма ускоренного вычисления свертки, зависит еще и от быстродействия используемых цифровых сигнальных процессоров (ЦПОС), возможно и не потребуется последетекторное цифровое накопления энергии принимаемых СлС.

УОСлС с аналоговыми согласованными фильтрами на ПАВ

Вариант УОСлС для ДСЧ-ФМн СлС с аналоговыми перестраиваемыми СФ показан на рисунке 8. Последние довольно часто реализуются на основе устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [34], которые могут работать непосредственно на рабочих частотах СлС вплоть до 1,5 ГГц [36,37], либо на промежуточных частотах, если используется более высокочастотный диапазон, и могут легко перепрограммироваться при смене ПСП [36]. В данном случае используется по два набора СФ на ПАВ на каждой из четырех частот ДСЧ-ФМн СлС, поскольку допустимые размеры подложек таких фильтров существенно ограничивают длительность СлС $T_{нак}$, который может непосредственно обрабаты-

ваться в них. Обычно удается обрабатывать ФМн СлС с шириной полосы частот не более нескольких десятков МГц и длительностью $T_{\text{СФ}}$, соответствующей длине ПСП не более $N = 1024$. Два таких СФ могут быть соединены последовательно. Поэтому в каждом наборе СФ обрабатывается СлС длительностью $T_{\text{СФ}} = T_{\text{нак}} / 2$. На рисунке 8 на нижний СФ сигнал подается через линию задержки (ЛЗ), которая тоже представляет собой прибор на ПАВ. После ЛЗ используется линейный усилитель (У), поскольку потери в ней по мощности составляют несколько десятков дБ [34]. Таким образом, длительность фрагмента СлС, обрабатываемая с помощью данной схемы, равняется $4T_{\text{СФ}}$, но значение $T_{\text{нак}}$, определяющее ее разрешающую способность, равно $2T_{\text{СФ}}$, поскольку производится суммирование откликов двух пар СФ. Кроме того, рисунок 8 соответствует случаю, когда ширина области неопределенности СлС по частоте лишь в три раза превосходит ширину полосы пропускания любого из СФ. То есть в данном случае $N_{\text{ч}} = 3$, поэтому на каждой из четырех промежуточных частот параллельно включено три частотно-смещенные группы СФ, перекрывающих всю область неопределенности СлС по частоте $F_{\text{неоп}}$.

Возможен вариант с разработкой СФ и ЛЗ на промежуточных частотах и последовательным преобразованием частот входного СлС на средние частоты АЧХ СФ. Тогда можно реализовать поиск СлС в более широкой области неопределенности по частоте, по сравнению с общей полосой пропускания трех аналоговых СФ на ПАВ, но преобразование входного СлС по частоте приведет к дополнительным рассогласованиям по фазе несущей частоты.

С целью последетекторного накопления энергии СлС на каждой из четырех частот используется амплитудный детектор (АД) в каждом из трех частотно-смещенных каналов, перекрывающих область неопределенности СлС по частоте. При этом на выходе АД в первом решающем устройстве РУ1 производится бинарное квантование сигнала перед набором счетчиков (Сч) двоичных импульсов. Число счетчиков соответствует удвоенному значению N , а разрядность каждого из них определяется тем, энергию скольких импульсов длительностью $T_{\text{нак}}$ надо накопить для обеспечения заданных характеристик обнаружения СлС.

Если частота принимаемого СлС попадет в полосу пропускания одного из трех СФ на уровне 0,7 от максимального значения его амплитудно-частотной характеристики, то в РУ2 он будет обнаружен с некоторой вероятностью $p_{\text{обн1}}$ на выходе одного из $2N$ Сч, поскольку там с наибольшей вероятностью появляется сигнал в момент возникновения основного пика ФН сегмента СлС, передаваемого на одной из четырех частот. Но в РУ2 под действием помех может возникнуть и ложная тревога с некоторой вероятностью $p_{\text{лт1}}$. Погрешность момента обнаружения по времени сегмента СлС, передаваемого на одной из четырех частот и периодически повторяющегося в соответствии с ПСП переключения частот, составляет $T_{\text{с}} / 4$. Эта последовательность определяется также в РУ2.

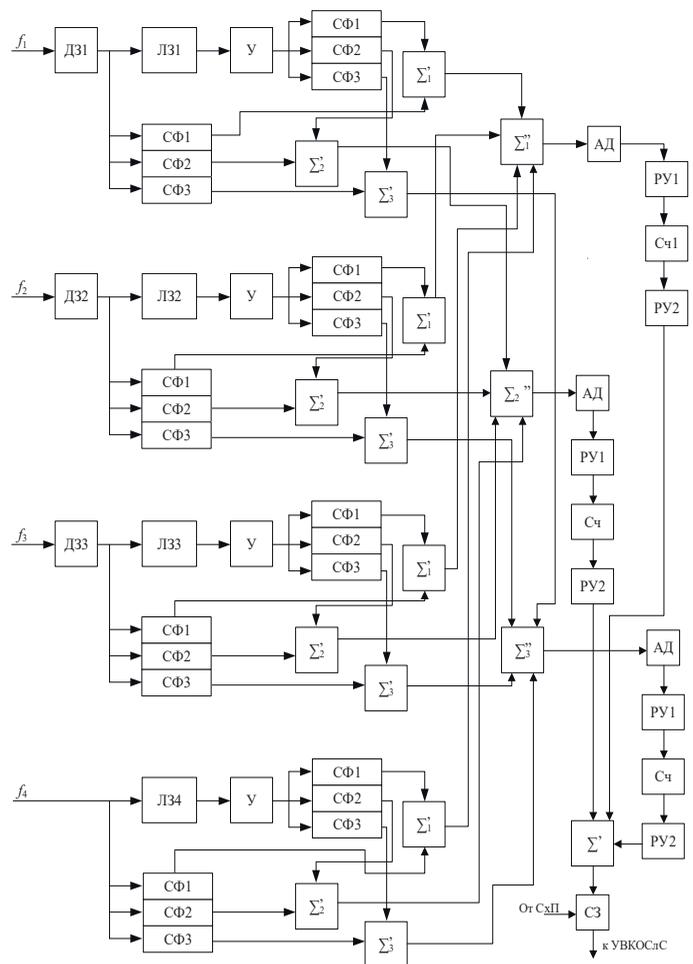


Рис. 8. УОСлС, разработанное на ПАВ для ДСЧ-ФМн СлС

В данном случае производится додетекторное суммирование разночастотных откликов СФ, хотя на вход УОСлС с выхода преобразователя частоты приемника эти сегменты СлС, излученные на разных частотах, поступают без разрыва фазы высокочастотного колебания, поскольку используется один гетеродин для всех несущих частот. Но очевидно, что потери из-за такого суммирования будут тем меньше, чем больше среднearифметическое значение четырех используемых частот отличается от суммарной ширины спектра ДСЧ-ФМн СлС. Производится обработка только действительной части ФН СлС, поскольку только именно ей соответствует отклик СФ, причем в случае использования преобразователя частоты на входе СФ неизбежно возникновение неизвестного фазового сдвига φ несущей частоты принимаемого СлС, в результате чего отклик СФ уменьшается пропорционально $\cos\varphi$.

Относительно небольшие длины ПСП, которые могут обрабатываться в СФ на ПАВ, приводят к существенно меньшей разрешающей способности соответствующего УОСлС, по сравнению с вариантом использования в нем цифровых УСПСП. Эффективность его работы определяется в основном устройством цифрового накопления энергии СлС, а СФ на ПАВ при малых отношениях сигнал/шум по мощности на входе КС можно рассматривать как устройства, позволяющие существенно повысить эффективность цифрового энергетического

ческого обнаружителя. Кроме того, несомненно, что быстродействие УОСЛс с СФ на ПАВ будет более высоким, по сравнению с его вариантом с цифровыми УСПСП.

Необходимо отметить, что вариант УОСЛс, рассмотренный в данном разделе, позволяет уменьшить ширину области неопределенности принимаемого СлС по частоте в три раза только в том случае, если $1/(3T_{\text{нак}}) \approx F_{\text{неоп}} / N_{\text{ч}}$. Учитывая, что в данном случае $N_{\text{ч}} = 3$ и $T_{\text{нак}} = NT_3$, а $f_T = 1/T_3$, получим, что длина ПСП, которая должна обрабатываться в одном СФ, должна составлять не менее $f_T / F_{\text{неоп}}$. Так, например, если $F_{\text{неоп}} = 10\text{кГц}$, а ширина полосы частот, соответствующая одному из четырех фрагментов ДСЧ-ФМн СлС равна 20МГц (ширина общей занимаемой полосы частот порядка 80МГц), то эта длина для каждого СФ должно быть не менее 1000, что соответствует предельным возможностям СФ на ПАВ. Но если при ширине полосы частот двоичного ФМн СлС порядка 20 МГц используются СФ на длину ПСП порядка 500, что может быть легко реализовано, то $T_{\text{нак}} \approx 2.5 \cdot 10^{-5} \text{с}$, а ширина сечения основного пика ФН по частоте такого СлС составит приблизительно 40кГц, что больше $F_{\text{неоп}}$. Тогда одночастотный сегмент ДСЧ-ФМн СлС с высокой вероятностью будет обнаружен одновременно на выходе всех трех СФ, перекрывающих $F_{\text{неоп}}$. В этом случае использование трех СФ для обнаружения каждого одночастотного сегмента не имеет смысла, и достаточно одного СФ на каждый сегмент. В этом случае работа УОСЛс не приведет к уменьшению $F_{\text{неоп}}$ принимаемого ДСЧ-ФМн СлС, но позволит обеспечить точность оценки его задержки по времени порядка $T_3 / 4$.

Повышение точности оценки параметров СлС в УВКОСЛс

В случае обнаружения в УОСЛс совокупности копий различных по структуре СлС, каждый из которых излучается на своей (одной) несущей частоте, необходимо использовать один комплект схем поисковых ФАПЧ и АПВ, работающих с перекрестными связями, для каждой обнаруженной копии. Учитывая, что структура КС для варианта обнаружения совокупности двоичных ФМн СлС достаточно очевидна, рассмотрим случай, когда в УОСЛс обнаружена совокупность ДСЧ-ФМн СлС. Тогда для каждого такого СлС УВКОСЛс состоит из четырех поисковых схем ФАПЧ, которые работают совместно с одной схемой АПВ, как это показано на рисунке 9.

На вход схемы АПВ, кроме принимаемого СлС, поступает и квазиогерентная опорная несущая на промежуточной частоте (ПЧ), сформированная в ГУН ФАПЧ. В результате можно выделить ПСП, на основе которой сформирован СлС на этой частоте, что необходимо для работы схемы АПВ. Тем не менее, в каждом из двух ее каналов используется двухполупериодный выпрямитель (ДППВ) [17] для формирования видеочастотного сигнала. Этот сигнал с выхода ДППВ одного из каналов схемы АПВ используется не только для формирования ее дискриминационной характеристики, но и служит входным сигналом схемы подтверждения (СхП), показанной на рисунке 9. Пороговый уровень в ее решающем устройстве (РУ_{СхП}) выбирается при учете допустимого среднеквадрати-

ческого отклонения значения частоты опорного сигнала, формируемого системой ФАПЧ, и смещения по времени опорной ПСП, формируемой в Ген.СИНХ+ИНФ, по отношению к принимаемому СлС. Еще раз подчеркнем, что УОСЛс может работать по ИНФ, а синхронизация систем ФАПЧ осуществляется по периодическому СИНХ. В случае, если спутник находится на геостационарной орбите, максимальная помехоустойчивость УОИС обеспечивается в случае, если на СИНХ выделяется не более 10% общей мощности радиопередатчика, поскольку в этом случае ширина полосы частот петлевого фильтра ФАПЧ может быть весьма узкой из-за слабой динамики изменения частоты СлС [24]. Но в случае использования эллиптических или низких орбит вопрос об оптимальном распределении мощности между ИНФ и СИНХ нуждается в исследовании.

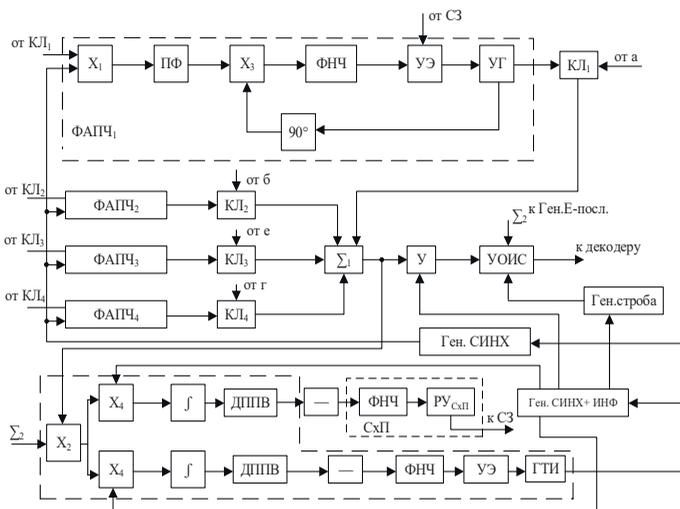


Рис. 9. Схемы ФАПЧ и АПВ, работающие с перекрестными связями, для ДСЧ-ФМн СлС

Грубая оценка каждой из четырех несущих частот уже произведена в УОСЛс, а уточнение ее значения с помощью поисковой ФАПЧ может осуществляться путем дискретной перестройки частоты ее ГУН и уменьшения полосы пропускания ее петлевого фильтра.

Многоэтапный параллельно-последовательный поиск частоты и задержки СлС по времени

Первый этап поиска СлС по частоте и задержке по времени производится в УОСЛс, причем в любом из рассмотренных его вариантов вся область неопределенности СлС по частоте и задержке по времени фактически разбивается на совокупность частотно-временных интервалов, число которых равно $N_{\text{ч}} \times 2N$, где N – число элементарных импульсов ПСП, соответствующих $T_{\text{нак}}$, а $N_{\text{ч}}$ – число частотных интервалов. Обозначим вероятность правильного обнаружения всех копий СлС в УОСЛс как $p_{\text{обн1}}$, а вероятность ложной тревоги – как $p_{\text{лт1}}$. Таким образом, на первом этапе ширина области неопределенности СлС по частоте сокращается в z_1 раз и составляет $F_2 = F_1 / z_1$, где $z_1 = N_{\text{ч}}$, $F_1 = F_{\text{неоп}}$.

Второй этап поиска параметров частоты и задержки СлС по времени реализуется в УВКОСлС путем дискретной перестройки частоты ГУН поисковой ФАПЧ в полосе частот с шириной F_2 . При этом ширина полосы частот петлевого фильтра $\Delta f_{\text{ФАПЧ2}}$ выбирается в несколько раз меньшей F_2 , а общее число анализируемых частотных интервалов составит $z_2 = F_2 / \Delta f_{\text{ФАПЧ2}}$. Далее, выбирается начальная частота ГУН в первом частотном интервале с шириной полосы частот $\Delta f_{\text{ФАПЧ2}}$, а подтверждением того, что частота принимаемого СлС не более чем на $\Delta f_{\text{ФАПЧ2}}$ отклоняется от выбранной частоты ГУН и схема ФАПЧ находится в режиме синхронизма, является превышение порогового уровня в РУ_{СхП}.

Но если превышение порога не произошло, и режим синхронизма отсутствует – значение частоты ГУН перестраивается на $\Delta f_{\text{ФАПЧ2}} / 2$, и анализируется следующий интервал частот с шириной $\Delta f_{\text{ФАПЧ2}}$. В случае, если обнаружение СлС не произошло ни в одном из частотных интервалов, считается, что в УОСлС произошла ложная тревога, и СхП подает соответствующий сигнал в СЗ, которая вновь инициирует первый этап поиска СлС, после чего повторяется второй этап. Но если в каком-то из частотных интервалов был обнаружен СлС – инициируется третий этап поиска, при котором общая ширина области неопределенности СлС по частоте составляет $F_3 = F_2 / z_2$, а ширина полосы пропускания петлевого ФНЧ $\Delta f_{\text{ФАПЧ3}}$ выбирается в несколько раз меньшей F_3 .

Кроме того, пропорционально увеличивается пороговый уровень в РУ_{СхП} с целью уменьшения вероятности ложной тревоги. Очевидно, что второй и третий этапы поиска, а при необходимости последующие его этапы сопровождаются уменьшением ширины полосы пропускания петлевого фильтра $\Delta f_{\text{ФАПЧ}}$, что повышает помехоустойчивость ФАПЧ и точность оценки частоты СлС. Но уменьшение $\Delta f_{\text{ФАПЧ}}$ ограничивается необходимостью отслеживать изменение частоты принимаемого СлС. Таким образом, точность оценки частоты СлС и минимальная ширина полосы пропускания петлевого фильтра, равно как число этапов поиска СлС, задаются заранее при учете динамики изменения его частоты.

Законченный цикл обнаружения и оценки параметров СлС с заранее известной точностью соответствует ситуации его обнаружения на последнем этапе поиска в последнем частотном интервале, анализируемом ФАПЧ. Но на любом из этапов поиска может произойти пропуск или ложная тревога, что будет обнаружено с помощью СхП, и СЗ инициирует вновь первый этап поиска. Очевидно, что в этом случае возврат к первому этапу произойдет за более короткий интервал времени, по сравнению с длительностью законченного цикла. То есть длительность цикла поиска является случайной величиной.

Обозначив общее число этапов поиска СлС как Z , их нумерацию будем производить с помощью символа $i = 1, \dots, Z$. Число частотных интервалов на каждом этапе определим как z_i , а ширину области неопределенности по частоте для каждого из них – как F_i . При этом ширина полосы пропускания петлевого фильтра на каждом этапе составит

$\Delta f_{\text{ФАПЧ}i}$, а длительность времени анализа каждого частотного интервала T_i , начиная со второго этапа. Общую длительность времени обнаружения СлС на первом этапе в УОСлС обозначим как T_1 . По окончании промежутка времени T_i , $i = 1, \dots, Z$ произойдет правильное обнаружение СлС с вероятностью $p_{\text{обн}i}$, либо его пропуск с вероятностью $1 - p_{\text{обн}i}$, либо ложная тревога с вероятностью $p_{\text{лт}i}$. Начиная со второго этапа поиска значения $p_{\text{обн}i}$ и $p_{\text{лт}i}$ зависят, во-первых, от вероятности захвата частоты СлС в системе ФАПЧ p_{zi} при его наличии в этой полосе, во-вторых, от вероятности ложного захвата этой частоты $p_{лзи}$, в третьих, от вероятности правильного обнаружения $p_{\text{обн.СхП}i}$ и вероятности ложной тревоги $p_{\text{лт.СхП}i}$ в СхП. Очевидно, что $p_{\text{обн}i} = 1 - p_{zi}(1 - p_{\text{обн.СхП}i})$, $p_{\text{лт}i} = p_{лзи}p_{\text{лт.СхП}i}$.

В качестве иллюстрации многоэтапной параллельно-последовательной процедуры поиска СлС, описанной выше, на рисунке 10 показана область неопределенности СлС с шириной по частоте $F_1 = 10\text{кГц}$. Ширина области неопределенности по времени определяет возможность использования всего лишь трех СФ, перекрывающих F_1 . Таким образом, $z_1 = 3$, кроме того, выбрано три интервала обнаружения на втором этапе, то есть $z_2 = 3$, а также $z_3 = 4$. Предполагается, что обнаружен один двоичный ФМн СлС.

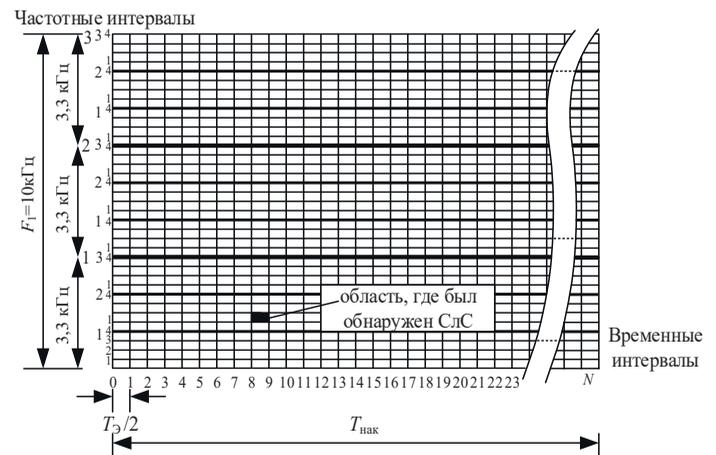


Рис. 10. Иллюстрация многоэтапной параллельно-последовательной процедуры совместного обнаружения и оценки параметров СлС

Общее число частотно-временных интервалов для процедуры параллельно-последовательного поиска составит $2N \prod_{i=1}^Z z_i$, и для обозначения каждого из них будем использовать $(Z + 1)$ -мерный вектор $[x_{1t} x_{1f} x_{2f} \dots x_{zf}]$, где $x_{1t} = 1, \dots, 2N$ – номер временного интервала при последовательном анализе временных интервалов на первом этапе поиска, $x_{if} = 1, \dots, z_i$ – номер частотного интервала, анализируемого на i -ом этапе поиска, $i = 1, \dots, Z$.

Характеристики эффективности КС

Полагая, что СлС присутствуют на входе приемника, будем считать основными показателями эффективности его КС длительность времени до начала слежения за их параметрами несущих частот и задержек по времени, а также вероятностные характеристики их обнаружения. Отметим, что анализ эффективности работы КС для совокупности СлС, одновременно присутствующих на его входе, весьма сложен, и для его разработки метода ее исследования необходимо создание соответствующей компьютерной модели. Поэтому ограничимся случаем обнаружения и синхронизации одного СлС.

Длительность времени до начала слежения за параметрами СлС

Предположим, что СлС находится в последнем частотно-временном интервале, анализируемом с помощью УОСлС и УВКОСлС, с $(Z + 1)$ -мерным номером $[2N z_1 \dots z_Z]$, когда время до начала слежения за таким СлС будет максимальным, по сравнению с другими возможными его позициями на частотно-временной плоскости. Длительность среднего максимального времени поиска такого СлС определим как:

$$\overline{T_{max}} = \overline{T_{ц}} \overline{N_{ц}}, \quad (7)$$

где $\overline{T_{ц}}$ – средняя длительность одного цикла поиска; $\overline{N_{ц}}$ – среднее число таких циклов, которые пришлось реализовать с целью обнаружения СлС при заранее заданных значениях вероятностных характеристик этого обнаружения.

Значение $\overline{T_{ц}}$ можно найти, суммируя по всем $(Z + 1)$ – мерным номерам частотно-временных интервалов произведения длительностей времени от начала цикла до начала анализа каждого из интервалов и вероятностей окончания цикла на этом интервале ложной тревогой, правильным обнаружением, либо пропуском СлС, то есть

$$\overline{T_{ц}} = T_1 + \sum_{x_{1l}=1}^{2N-1} \sum_{x_{2f}=1}^{z_2} \dots \sum_{x_{Zf}=1}^{z_Z} T_{4x_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} P_{лтх_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} + T_{и2Nz_1 \dots z_Z} (P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z} + P_{пр.2Nz_1 \dots z_Z}), \quad (8)$$

где T_1 – длительность времени анализа двумерного интервала области неопределенности СлС на первом этапе цикла, $T_{ц_{и1} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} = x_{1l} T_1 + x_{1f} T_2 + \dots + x_{Zf} T_Z$ – длительность времени одного цикла при ложном обнаружении СлС в каком-то частотно-временном интервале с номером $[x_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}]$ при $x_{1l} = 1, \dots, 2N$, $x_{if} = 1, \dots, z_i$, $i = 1, \dots, Z$, а $P_{лтх_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}}$ – вероятность окончания цикла на этом этапе ложной тревогой. Тогда $T_{ц2N z_1 \dots z_Z}$ – длительность времени законченного цикла поиска, $P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z}$ – вероятность окончания цикла поиска на последнем частотно-временном интервале при правильном обнаружении СлС, $P_{пр.2Nz_1 \dots z_Z}$ – вероятность пропуска СлС. При этом очевидно, что в случае, если на первом этапе число

частотных интервалов, анализируемых параллельно, составляет z_1 , то вероятность окончания первого этапа цикла поиска ложной тревогой при анализе временного интервала x_{1l} составит:

$$P_{лтх_{1l}} = (1 - p_{лт.i})^{(x_{1l}-1)z_1} \left(1 - (1 - p_{лт.i})^{z_1}\right), \quad (9)$$

а на каждом из последующих этапов

$$P_{лтх_{if}} = (1 - p_{лт.i})^{(x_{if}-1)} p_{лт.i}, i = 1, \dots, Z. \quad (10)$$

При анализе последнего временного интервала, когда число параллельно анализируемых частотных интервалов составляет z_1 , вероятность ложной тревоги

$$P_{лт.2N} = (1 - p_{лт.1})^{2Nz_1-1} \sum_{x_{1f}=1}^{z_1-1} (1 - p_{лт.1})^{x_{1f}-1} p_{лт.1}. \quad (11)$$

В результате

$$P_{лтх_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} = P_{лтх_{1l}} \prod_{i=2}^Z P_{лтх_{if}} + P_{лт.2N} \prod_{i=2}^Z P_{лтх_{if}},$$

то есть

$$P_{лтх_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} = \left\{ (1 - p_{лт.1})^{(x_{1l}-1)z} \left[1 - (1 - p_{лт.1})^z \right] (1 - p_{лт.1})^{2NZ-1} (1 - p_{лт.1})^{z_1-1} \right\} \times [p_{лт.1} (1 - p_{лт.1}) \sum_{i=2}^Z ((x_{if} - 1))]. \quad (12)$$

При выводе формулы (12) предполагалось, вероятности ложных тревог при анализе всех частотно-временных интервалов, кроме первого, одинаковые и равны $p_{лт}$, а на первом этапе эта вероятность в общем случае отличается от $p_{лт}$ и равна $p_{лт.1}$.

Вероятность правильного обнаружения СлС в последнем анализируемом частотно-временном интервале составит:

$$P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z} = (1 - p_{лт.1})^{2NZ-1} p_{обн.1} \cdot \prod_{i=2}^Z (1 - p_{лт.i})^{z_i-1} p_{обн.i}, \quad (13)$$

а вероятность его пропуска –

$$P_{пр.2Nz_1 \dots z_Z} = 1 - P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z}, \quad (14)$$

то есть $P_{пр.2Nz_1 \dots z_Z} + P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z} = 1$. Для определения $\overline{T_{ц}}$ надо подставить (9)-(14) в (7), где $\overline{N_{ц}} = 1 / p_{ц}$, а $p_{ц}$ – полная вероятность окончания процедуры поиска на одном цикле [17], причем

$$p_{ц} = \sum_{x_{1l}=1}^{2N-1} \sum_{x_{1f}=1}^{z_1} \dots \sum_{x_{Zf}=1}^{z_Z} P_{обнх_{1l} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}} + P_{обн.2Nz_1 \dots z_Z}.$$

Вероятностные характеристики обнаружения СлС

При многоэтапной циклической параллельно последовательной процедуре обнаружения (поиска) и синхронизации

СлС, находящегося в последнем частотно-временном интервале, вероятность его правильного обнаружения на j -ом цикле равна сумме вероятностей законченных циклов поиска, то есть

$$P_{\text{обн}} = \sum_{j=1}^{\infty} p_{\text{обн}}^j, \quad (15)$$

где j – номер законченного цикла поиска, $p_{\text{обн}}^j = (1 - p_{\text{ц}}^{j-1}) p_{\text{обн.2}N_{z_1 \dots z_Z}}$ – вероятность окончания поиска на j -ом цикле правильным обнаружением СлС. Аналогично (15) получим выражение для вероятности завершения j -го законченного цикла поиска ложной тревогой:

$$P_{\text{лт}} = \sum_{j=1}^{\infty} p_{\text{лт}}^j, \quad (16)$$

где

$$p_{\text{лт}}^j = (1 - p_{\text{ц}}^{j-1}) \sum_{x_{1t}=1}^{2N-1} \sum_{x_{1f}=1}^{z_1} \dots \sum_{x_{Zf}=1}^{z_Z} p_{\text{лт}x_{1t} x_{1f} x_{2f} \dots x_{Zf}}.$$

Выбор значений $p_{\text{обн.}i}$ и $p_{\text{лт.}i}$

Мы рассмотрели основные характеристики многоэтапной параллельно-последовательной процедуры поиска параметров СлС, которыми являются $\overline{T_{\text{max}}}$, $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{лт}}$. Но для их расчета по формулам (7), (15) и (16) необходимо выбрать значения $p_{\text{обн.}i}$ и $p_{\text{лт.}i}$, $i = 1, \dots, Z$, учитывая их взаимосвязь с $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{лт}}$.

Выбирая типичное значение N порядка нескольких тысяч, а также пять этапов цикла поиска, число процедур последовательного анализа на каждом этапе порядка трех-четырех, начиная со второго этапа, из анализа (15), (16) получим, что $P_{\text{обн}} \approx 0.95$ при выборе $p_{\text{лт.}i} = 10^{-6}$. В этом случае вероятность ложной тревоги $P_{\text{лт}} \approx 10^{-6}$, а $p_{\text{обн.}i} \approx 0.99$. При этом длительность времени накопления энергии СлС на любом частотно-временном интервале должна быть такой, чтобы выполнялось неравенство $p_{\text{лт.}i} \leq 10^{-6}$, поскольку в противном случае $p_{\text{обн}}$ будет меньше 0.7.

Важный вывод, который следует из анализа формул (12), (13): при увеличении Z с одновременным увеличением от этапа к этапу порогового уровня в СхП удастся стабилизировать $P_{\text{лт}}$, и даже возможно обеспечить ее уменьшение, но при этом возрастает вероятность пропуска СлС. Для стабилизации последнего необходимо уменьшать $p_{\text{лт.}i}$, $i = 1, \dots, Z$ при увеличении длительности накопления энергии СлС при анализе каждого частотно-временного интервала при соответствующем увеличении порогового уровня в СхП.

С учетом вышесказанного запишем приближенную формулу для расчета $\overline{T_{\text{max}}}$. Из (7) и (9),(10) следует, что в случае $p_{\text{обн.}i} = 0.99$, $p_{\text{лт.}i} = 10^{-6}$, $i = 1, \dots, Z$, $\overline{N_{\text{ц}}} = 1$ искомое приближенное значение $\overline{T_{\text{max}}}$ составит:

$$\overline{T_{\text{max}}} = \overline{T_{\text{ц}}} = T_1 + T_{\text{ц}2N_{z_1 \dots z_Z}}, \quad (17)$$

где

$$T_{\text{ц}2N_{z_1 \dots z_Z}} = \sum_{i=2}^Z T_i z_i. \quad (18)$$

Длительность времени поиска и синхронизации параметров СлС

Для варианта СлС с перескоками по частоте и построения УОСлС на основе СФ на ПАВ найдем T_i , $i = 1, \dots, Z$ при действии совокупности шумовых, взаимных и внешних помех от других радиосистем. Взаимные помехи возникают в случае, когда некоторое количество абонентов $N_{\text{аб}}$ работает в общей полосе частот со СлС, параметры частоты и задержки по времени которого необходимо определить. Сумму этих помех будем считать аддитивным белым гауссовским шумом на входе УОСлС. В этом случае

$$T_1 = T_s N_{\text{п}} S_{\text{ц}}, \quad (19)$$

где $N_{\text{п}} = NN_f$ – общее число элементарных символов СлС на длительности периода его повторения T_s с учетом перескоков по частоте, N – число этих импульсов в одночастотном сегменте, N_f – число используемых частот, $S_{\text{ц}}$ – число импульсов длительностью T_s , энергия которых накапливается в НЦ для обеспечения необходимых значений $p_{\text{обн.}i}$ и $p_{\text{лт.}i}$. Очевидно, что

$$S_{\text{ц}} = g_{\text{вх.ру}} / (g_{\text{вых.СФ}} / \xi_{\text{ад+нц}}), \quad (20)$$

где $g_{\text{вх.ру}}$ – отношение сигнал/помеха по мощности на входе РУ в УОСлС, необходимое для обнаружения СлС с заданными $p_{\text{обн.}i}$ и $p_{\text{лт.}i}$; $g_{\text{вых.СФ}}$ – отношение сигнала/помеха по мощности на выходе СФ, $\xi_{\text{ад+нц}}$ – потери мощности в амплитудном детекторе (АД) и при цифровом накоплении энергии СлС. Вопрос о расчете выигрыша в отношении сигнал/шум при обработке СлС с помощью устройства свертки или СФ довольно подробно обсуждался в литературе [3,21,23]. В данном случае необходимо учитывать потери, возникающие из-за рассогласования полос частот, занимаемых принимаемым ДСЧ-ФМн СлС и СФ с учетом числа этих фильтров, перекрывающих область неопределенности СлС по частоте, потери из-за технологических неточностей изготовления СФ, потери при суммировании сигналов с выходов разных СФ. Тогда определив $g_{\text{вых.СФ}}$ при известных N , $N_{\text{п}}$, $N_{\text{ч}}$, $p_{\text{обн.}i}$, $p_{\text{лт.}i}$ по графикам зависимостей $S_{\text{ц}}$ от отношения сигнал/шум по мощности при последетекторном цифровом накоплении [26], найдем собственно $S_{\text{ц}}$.

Очевидно, что

$$T_i = T_{\text{ФАПЧ.}i} + T_{\text{СХП.}i}, i = 1, \dots, Z, \quad (21)$$

где

$$T_{\text{ФАПЧ},i} = 3,5 / (0,5 \Delta f_{\text{ФАПЧ},i}) - \quad (22)$$

длительность переходного процесса в кольце ФАПЧ при условии, что несущая частота СлС попала в полосу ее захвата [12] (предполагается, что ширина полосы пропускания системы ФАПЧ равна ширине полосы частот анализируемого интервала области неопределенности СлС по частоте, а ширина полосы частот петлевого фильтра меньше полосы удержания системы ФАПЧ),

$$T_{\text{СхП},i} = T_S g_{\text{вх.СхП.ПВ},i} / g_{\text{вх.СхП},i} - \quad (23)$$

– длительность времени квазикогерентного накопления энергии СлС в ФНЧ перед РУ_{СхП} (см. рис. 9) на *i*-ом этапе цикла поиска, $g_{\text{вх.СхП.ПВ},i}$ – отношение сигнал/шум по мощности на входе РУ_{СхП}, необходимое для обнаружения СлС с заданными $p_{\text{обн},i}$ и $p_{\text{лт},i}$, $i = 1, \dots, Z$, $g_{\text{вх.СхП},i}$ – отношение сигнал/шум по мощности на входе СхП.

При анализе значения $g_{\text{вх.СхП},i}$ необходимо учитывать рассогласование опорного и принимаемого СлС по частоте и временной задержке в пределах основного пика ФН. В [11,23] для него получено выражение для случая работы УОСлС по ИНФ и выделения на СИНХ 10% мощности радиопередатчика:

$$\sqrt{g_{\text{вх.СхП},i}} = \sqrt{1,8N / (N_{\text{аб}} + 2 / \kappa_{\text{ш}})} \text{sinc} \Delta \varphi_i - 1 / \sqrt{\mu_{\tau,i}}, \quad (24)$$

где

$$\Delta \varphi_i = \frac{1}{\sqrt{g_{\text{ФАПЧ.ВЫХ},i}}} = \sqrt{\Delta f_{\text{ФАПЧ.ВЫХ},i} / g_{\text{вх.УОСлС}} N F_{\text{инф}}} - \quad (25)$$

– среднеквадратическое отклонение фазы опорного СлС от принимаемого СлС, возникающее из-за влияния помех в кольце ФАПЧ; $g_{\text{ФАПЧ.ВЫХ},i}$ – отношение сигнал/шум по мощности на выходе кольца ФАПЧ на *i*-м этапе цикла поиска, $g_{\text{вх.УОСлС}}$ – отношение сигнал/шум по мощности на входе УОСлС, $F_{\text{инф}} = 1 / T_{\text{нак}}$ – ширина спектра «сжатого» СлС,

$$\mu_{\tau,i} = F_{\text{инф}} / \Delta f_{\text{АПВ},i}, \quad (26)$$

$\Delta f_{\text{АПВ},i}$ – ширина полосы пропускания выходного фильтра схемы АПВ (см. рис. 9) на *i*-м этапе цикла поиска.

Пример приближенного расчета характеристик поиска и синхронизации СлС в спутниковой радиосистеме

Рассмотрим вариант использования двоичного ФМн СлС с тактовой частотой $f_T = 1 / T_s = 10 \text{ МГц}$ и перескоками по четырем частотам ($N_q = 4$), так что общая ширина занимаемой полосы частот составляет примерно 40 МГц. Предположим, что каждая пара СФ, предназначенная для обнаружения сегмента СлС на одной из четырех частот, согласована с этим сегментом, сформированным на основе ПСП длиной $N = 2048$, то есть для каждого из двух СФ длина ПСП составляет $N_{\text{сф}} = 1024$.

При этом каждый СФ на ПАВ состоит из двух последовательно соединенных подложек, каждая из которых предназначена для обработки сегмента СлС, сформированного на основе ПСП длиной 512. Таким образом, длина сегмента ПСП, использовавшегося для формирования СлС, излученного на одной частоте составит 2048. Как указывалось выше, с целью упрощения устройства обнаружения можно использовать одну и ту же двоичную ПСП для формирования каждого сегмента СИНХ, излучаемого на одной частоте.

Таким образом, длина ПСП на периоде ее повторения с учетом четверичной Е-последовательности Велти составит $N_{\text{ПСП}} = 512 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 = 8192$.

Используя значения параметров СлС, перечисленные выше, достаточно просто оценить выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе идеального приемника, по сравнению с его входом. Но неизбежны дополнительные потери, вызванные воздействием ряда факторов – ситуативных, вызванных условиями использования аппаратуры обнаружения и синхронизации СлС, и технологических. Так, если спутник находится на геостационарной орбите, то для рассмотрения частотных рассогласований необходимо учитывать, прежде всего, нестабильности задающих генераторов и доплеровский сдвиг частоты, вызванный нестабильностью положения спутника на орбите.

В этом случае ширина области неопределенности СлС по частоте составит примерно 10 кГц [1]. Учитывая, что в рассматриваемом случае $z_1 = 3$, получим, что максимальное частотное рассогласование для каждого СФ составит приблизительно 3,3 кГц. Тогда при учете формы сечения по частоте основного пика ФН СлС получим, что максимальное снижение уровня его мощности на выходе СФ составит примерно 1,4 раза (1,5 дБ), по сравнению с идеальным случаем отсутствия частотного рассогласования между ним и центральной частотой амплитудно-частотной характеристики СФ. Другой источник потерь в отношении сигнал/шум возникают из-за додетекторного суммирования разночастотных откликов СФ, хотя на вход УОСлС с выхода преобразователя частоты приемника эти сегменты СлС, излученные на разных частотах, поступают без разрыва фазы высокочастотного колебания, поскольку используется один гетеродин для всех несущих частот. В частности, в результате компьютерного моделирования было показано, что в случае, если среднеарифметическое значение частот сигналов на выходе СФ не менее чем в 4...5 раз больше ширины спектра многочастотного СлС, что выполняется в данном случае, то потери в отношении сигнал/шум по мощности составляют не более (2,5...3) дБ, по сравнению со случаем одночастотного СлС с базой 8192.

Потери, вызванные технологическими погрешностями изготовления СФ на ПАВ, обычно не превышают 0,7 дБ [34], а последовательное включение двух таких фильтров из-за ограничения полосы пропускания ЛЗ приводит к дополнительным потерям порядка 2 дБ [34].

Таким образом, суммируя потери в отношении сигнал/шум по мощности, вызванные совокупностью вышеперечисленных факторов, получим их значение, составляющее приблизительно 7 дБ, то есть отношение сигнал/шум по мощности на входе НЦ будет приблизительно на $\xi_{\text{снц}} = 7$ дБ меньше, по сравнению со случаем идеального когерентного накопления

энергии СлС и, в частности, при числе одновременно действующих абонентов в общей полосе частот $N_{аб} = 200$ и отношении сигнал/шум на входе приемника $\kappa_{ш} = 0.01$ составит

$$g_{\text{вых.СФ}} = \frac{1.8N_{\text{ПСП}}}{\left[\left(N_{аб} + \frac{2}{\kappa_{ш}} \right) \xi_{\text{ШНЦ}} \right]} = \frac{0,004 \cdot 8192}{5} = 6.5 \text{ раз.}$$

Необходимое число периодов СлС, которые необходимо накопить в НЦ после амплитудного детектора при заданной достоверности обнаружения ($p_{обн.1} = 0.99$, $p_{ит.1} = 10^{-6}$), согласно [26] составит $S_{ц} \approx 30$, а суммарные потери из-за детектирования и цифрового накопления будут порядка 6 дБ.

Тогда $T_1 = N_{\text{ПСП}} \left(\frac{1}{f_T} \right) S_{ц} \approx 12.2 \text{ мс.}$

Размеры сечения ФН по частоте на выходе УОСлС составят $1/N_{\text{сег}} T_3 = (1/1024) \cdot 10 \text{ МГц} \approx 10 \text{ кГц}$. Учитывая форму основного пика ФН, будем считать, что использование трех СФ с разном частот на 3.3кГц позволит уменьшить ширину области неопределенности по частоте до этого значения. Далее, полагая, что $F_2 = 3.3 \text{ кГц}$ и динамика изменения частоты СлС такова, что $\Delta f_{\text{ФАПЧ.}i}$ не может быть меньше 250 кГц, а ширина полосы пропускания петлевого фильтра не может изменяться произвольно, ограничимся в данном случае рассмотрением двух этапов обнаружения и синхронизации СлС с поисковой системой ФАПЧ, включающей петлевой фильтр с шириной полосы пропускания $\Delta f_{\text{ФАПЧ.}2} = 250 \text{ кГц}$.

Тогда $z_2 = \frac{F_2}{\Delta f_{\text{ФАПЧ.}2}} - 1 = 12$, а длительность времени, необходимого для устранения частотного рассогласования в ФАПЧ составит $T_{\text{ФАПЧ.}2} = \frac{3,5}{0,5 \Delta f_{\text{ФАПЧ.}2}} = 30 \text{ мс.}$

В случае, если схема ФАПЧ вошла в режим удержания, среднеквадратическое отклонение начальной фазы принимаемого СлС от начальной фазы сигнала с выхода управляемого генератора (УГ) ФАПЧ (см. рис. 9) определяется в соответствии с (25), то есть

$$\Delta \varphi_2 = \sqrt{\Delta f_{\text{ФАПЧ.}2} / g_{\text{вых.УОСлС}} N F_{\text{инф}}} = \left(\frac{250}{0,01 \cdot 20 \cdot 10^6} \right)^{1/2} = 0,05 \text{ рад.}$$

В этом случае на входе СхП при $\mu_{\tau,2} = 200$, отношение сигнал-шум по мощности

$$g_{\text{вых.СхП.2}} = \left[\sqrt{1,8N / (N_{аб} + 2 / \kappa_{ш})} \text{sinc} \Delta \varphi_2 - 1 / \sqrt{\mu_{\tau,2}} \right]^2 = \left[\sqrt{1,8 \cdot 2040 / (200 + 2 / 0,01)} \text{sinc} 0,05 - 1 / \sqrt{200} \right]^2 = 11,6.$$

Тогда согласно (23) получим: $T_{\text{СхП.2}} \approx 5 \text{ мс.}$

Таким образом, оценка приближенного результирующего значения $\overline{T_{max}}$ в соответствии с (17) определяется формулой:

$$\overline{T_{max}} = \overline{T_{ц}} = T_1 + \sum_{i=2}^Z T_i z_i = 12.2 + (30 + 5) \cdot 12 \approx 0.43 \text{ (с).}$$

Практический интерес представляет исследование зависимости приближенной оценки максимальной длительности времени обнаружения и синхронизации СлС при многоэтапной параллельно-последовательной процедуре поиска параметров его частоты и задержке по времени с изменяющейся от этапа к этапу шириной полосы пропускания петлевого фильтра кольца ФАПЧ. Результаты такого исследования представлены на рисунке 11. При расчете графиков предполагалось, что по-прежнему $z_1 = 3$, а при остальных значениях i на всех этапах цикла поиска значения z_i будут одинаковыми, кроме последнего этапа, на котором значение z_Z определяется минимально допустимой шириной полосы пропускания петлевого фильтра, которая предположительно равна 250 Гц. Например, если $z_2 = 3$, то ширина полосы пропускания петлевого фильтра на втором этапе цикла поиска по уровню 0,7 составит 1100 Гц, на третьем при $z_3 = 3$ эта ширина будет равна 367 Гц, а на последнем этапе цикла поиска $z_4 = 2$, и последняя анализируемая полоса частот будет равна $(367-250) \text{ Гц} = 117 \text{ Гц}$.

На рисунке 11 имеется нижняя дополнительная шкала оси абсцисс, на которой указано общее число этапов цикла поиска при выборе числа частотных интервалов, анализируемых в ФАПЧ на каждом этапе. Подчеркнем, что $\Delta f_{\text{ФАПЧ.}Z}$ в любом случае не превышает 250 Гц. В итоге, если z_i меняется от 3 до 11, то значение Z не меняется, и равно 3. Значения $\overline{T_{max}}$, выделенные на рисунке 11 звездочками, соответствуют $Z = 3$, $z_1 = 3$, $z_2 = 4$, $z_3 = 5$, то есть разным значениям z_i , и они никак не связаны с кривыми, приведенными на этом рисунке. Прямая горизонтальная линия со звездочками на рисунке 11 соответствует случаю последовательного корреляционного поиска данного СлС при последовательном анализе частотно-временных интервалов с длительностью $T_3 / 2$ и шириной по частоте 250 Гц. Отметим, что в этом случае потери мощности СлС на входе РУ обусловлены лишь доплеровским сдвигом частоты. В данном случае, как и при параллельно-последовательном поиске предполагалось, что $N_{аб} = 200$.

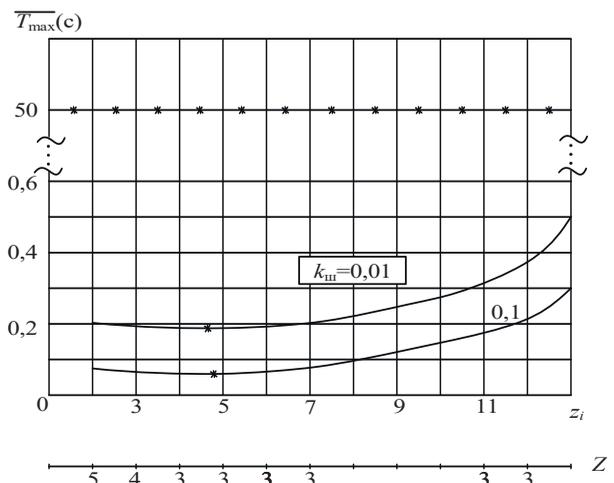


Рис.11. Длительность времени поиска и синхронизации ФМн СлС с перескоками по четырем частотам при многоэтапном параллельно последовательном поиске от числа частотных интервалов, анализируемом на каждом этапе цикла

Таким образом, как следует из анализа рис. 11, оказывается возможным оптимизировать длительность времени обнаружения и синхронизации СлС, подбирая число этапов многоэтапной параллельно-последовательной процедуры его поиска. Эту длительность можно сократить приблизительно до 0,2 с при выборе $z_i = 4$. В случае использования последовательного корреляционного поиска значение $\overline{T_{max}}$ при таких же исходных условиях составляют несколько десятков секунд.

Заключение

Широкий круг вопросов, рассмотренных в данной работе, и связанных с решением проблемы поиска и синхронизации слабых по мощности шумоподобных СлС в спутниковых радиосистемах различных типов, объединяют общие принципы построения алгоритмов и соответствующей им аппаратуры оценки параметров частоты и задержки по времени данных СлС с заранее заданной точностью и достоверностью. Предполагается использование многоэтапной параллельно-последовательной процедуры поиска параметров СлС, реализуемой на основе длительного накопления их энергии с помощью устройств цифровой свертки опорных и принимаемых СлС, либо согласованных фильтров (СФ). Эти устройства обеспечивают требуемую эффективность работы энергетических обнаружителей на фоне мощных помех при последующем уточнении значений параметров СлС с помощью поисковых схем ФАПЧ и АПВ.

При этом рассматриваются два варианта реализации устройств первоначального накопления энергии принимаемых СлС – на основе их ускоренной цифровой свертки и с помощью СФ на ПАВ. Первый вариант позволяет обрабатывать значительные длины ПСП и обеспечивать высокую разрешающую способность устройства первоначального обнаружения СлС, поэтому его целесообразно использовать при обнаружении совокупности копий одного и того же СлС, либо разных по структуре СлС, одновременно присутствующих на входе приемника при рассогласованиях их параметров частоты и задержки по времени. После обнаружения всех СлС необходимо для каждого из них использовать отдельный блок, состоящий из систем ФАПЧ и АПВ с перекрестными связями. Лишь при срыве слежения за параметрами СлС в любом из них необходимо возобновлять процедуру обнаружения СлС.

Второй вариант первоначального накопления энергии СлС предполагает использование СФ на ПАВ с ограниченной длительностью времени ее накопления, поэтому в этом случае важную роль играет использование последующего цифрового последетекторного накопителя. Данные обстоятельства приводят к более низкой разрешающей способности данного устройства, по сравнению с предыдущим вариантом построения блока первичного обнаружения СлС. Поэтому его использование рассмотрено для случая спутниковой системы передачи информации с ДСЧ-ФМн СлС для обнаружения ее единственного слабого по мощности синхросигнала, общего для всех ее абонентов.

На основе проведенных исследований показано, что развитый для спутниковых радиосистем с шумоподобными СлС

многоэтапный параллельно-последовательный метод совместного обнаружения и оценки их параметров позволяет многократно минимизировать (в несколько сотен раз) длительность времени вхождения в синхронизм аппаратуры их обработки, по сравнению с последовательным корреляционным поиском. В частности, предлагаемый метод поиска параметров СлС при оптимальном распределении мощности передатчика между информационным СлС и синхросигналом по критерию минимума вероятности ошибки при приеме информационных символов позволяет обеспечить длительность времени вхождения в синхронизм наземного приемника спутниковой системы передачи информации с ретранслятором на геостационарной орбите порядка 0,2с, но не более 0,5с.

Литература

1. Gerard Maral, Michel Bousquet, Zhili Sun. Satellite Communications Systems / Gerard Maral, Michel Bousquet, Zhili Sun – 6. United Kingdom: Wiley, 2020. 800 с.
2. Волков Р.В., Саяпин В.Н., Севидов В.В. Модель измерения временной и частотного сдвига радиосигнала, принятого от спутника-ретранслятора при определении местоположения земной станции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016. Т. 10. № 9. С. 14-18.
3. Кулакова В. И. Обнаружение слабых сигналов методом взаимной корреляции с компенсацией фазовых нестабильностей при радиоконтроле частотного ресурса спутниковых систем связи // Системы управления, связи и безопасности, 2020. № 1. С. 33-48.
4. Музыченко Н.Ю. Поиск и обнаружение шумоподобных сигналов в условиях частотной нестабильности канала связи // Радиотехника и электроника, 2019. Т. 64. № 1. С. 44-49.
5. Сныткин И.И., Сныткин Т.И. Способ «третьей решающей схемы» повышения эффективности поиска и синхронизации сложных широкополосных шумоподобных сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 6. С. 44-56. doi: 10.18127/j15604128-202106-05.
5. Урковиц Г., Урковиц Г. Обнаружение неизвестных детерминированных сигналов по энергии // ТИИЭР. 1967. № 4. С. 50-59.
6. Горгадзе С.Ф. Синхронизация в инфокоммуникационных системах. М.: Медиа Паблшер, 2022. 44 с.
7. Ву Ши.Д., Горгадзе С.Ф. Устройство ускоренного поиска шумоподобного сигнала // Технологии информационного общества // Сборник трудов XVI Международной отраслевой научно-технической конференции. Москва. 2022. С. 88-90.
8. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
9. Инатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение каналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 487 с.
10. Ву Ши.Д., Горгадзе С.Ф. Эффективность устройства грубой оценки параметров синхронизации шумоподобного сигнала // DPSA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2023. Т. 13. № 1. С. 31-39.
11. Сныткин И.И., Сныткин Т.И. Техническое решение «третьей решающей схемы» повышения эффективности поиска и синхронизации сложных широкополосных шумоподобных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 7. С. 40-50. doi: 10.18127/j20700784-202207-04.
12. Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В., Эффективность технологий IDMA и CDMA при малом коэффициенте расширения спектра // DPSA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2023. Т. 13. № 2. С. 22-29.
13. Ву Ши.Д., Горгадзе С.Ф. Вероятностные характеристики ускоренного поиска шумоподобных сигналов // Телекоммуникации и информационные технологии. 2022. Т. 9. № 2. С. 120-127.

14. Gorgadze S.F., Gut T.M. Accelerated evaluation of spread spectrum signals synchronization parameters // В сборнике 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2020. С. 9078627.
15. Сныткин И.И., Сныткин Т.И. Алгоритм реализации «третьей решающей схемы» повышения эффективности поиска и синхронизации сложных широкополосных шумоподобных сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 3. С. 54-63.
16. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Длительность времени вхождения в синхронизм приемника шумоподобного сложного сигнала в спутниковой асинхронной системе передачи информации // Зарубежная радиоэлектроника, 1997. №5. С. 41-51.
17. Gut T.M., Gorgadze S.F. Характеристики ковариационных функций и оценка параметров шумоподобного сигнала // Телекоммуникации и информационные технологии, 2019. Т. 6. № 2. С. 35-41.
18. Чечин Г.В. Спутниковые системы связи на базе геостационарных ретрансляторов. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 96 с.
19. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Ускоренное обнаружение сверхдлинных синхросигналов и идентификация абонентских станций в спутниковых системах персональной радиосвязи с синхронным кодовым разделением // Радиотехника и электроника. 1998. №12. С. 1495-1504.
20. Чечин Г.В. Спутниковые системы связи на базе негеостационарных ретрансляторов. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 118 с.
21. Горгадзе С.Ф. Обнаружение-различение адресных сложных сигналов при многостанционном доступе с кодовым разделением с использованием быстрых спектральных преобразований // Радиотехника и электроника, 2006. Т.51. №4. С. 428-436.
22. Izz K.A., Laith A.K., Abbas S.H. Synchronization in DSSS system // International Review of Applied Sciences and Engineering, vol. 11, no. 2, pp. 88-94, August 2020, doi: 10.1556/1848.2020.20003.
23. Смирнов Н.И. Караваев Ю.А. Сравнение реализаций вариантов микроволнового блока обнаружения сложных сигналов // Радиоэлектроника, 1982. №7. С. 22-27.
24. Акимов П.С., Евстратов Ф.Ф., Захаров С.И. и др. Обнаружение радиосигналов / Под ред. А.А. Колосова. М.: Радио и связь, 1989. 287 с.
25. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М.: Советское радио, 1963. 320 с.
26. Костылев В.И. Обобщенные энергетические обнаружители первого и второго родов // Вестник ВГУ, 2015. №3. С. 102-111.
27. Горгадзе С.Ф. Асимметричные модификации обобщенного быстрого преобразования Фурье и Фурье-Адамара // Радиотехника и электроника, 2005. Т. 50. № 3. С. 302-308.
28. Горгадзе С.Ф. Бойков В.В. Измерительные сигналы с многопозиционными поднесущими для спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника и электроника, 2014. Т. 59. № 3. С. 264.
29. Горгадзе С.Ф. Сложные композитные сигналы с равномерной амплитудной огибающей для спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника и электроника, 2017. Т. 62. № 4. С. 317-331.
30. Guangyu T., Wenbing C., Hanchen Z., Yiwen C., Yang T., Xuehui Y. Research and Implementation of the Early-late Gate Bit Synchronization Algorithm in the Non-coherent Spread Spectrum System, 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Shenzhen, China, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851724.
31. Немировский М.С., Локиин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 432 с.
32. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
33. Квашина Г. М., Сорокина Б. П., Бурков С. И., Возбуждение поверхностных акустических волн и волн лэмба на СВЧ в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 1. С. 45-54.
34. Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов. М.: Радио и связь, 1988. 224 с.
35. Debdyuti M., Sourav B., Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications // Sensors, vol. 22, no. 3, 2022.
36. Muhammad M.J., Mohd F.M.R.W., Hoang T.N.N., Le T.H., Rahul R., Ashish K.S., Chang F.D., Edward Y.C., Burhanuddin Y.M., Clarence A.T.H.T., Surface Acoustic Wave Propagation of Gan/Sapphire Integrated with a Gold Guiding Layer // Sensor, vol. 23, no. 5, 2023.

DETECTION AND SYNCHRONIZATION OF WEAK POWER SPREAD SPECTRUM SIGNALS IN A SATELLITE RADIO SYSTEM

Svetlana F. Gorgadze, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,

svetlana-gorgadze@yandex.ru

Vu Sy Dao, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia,

vusydaomtusi@gmail.com

Abstract

The problem of joint detection (search) and synchronization of one or several weak complex spread spectrum signals, mismatched on carrier frequency, frequency phase and time delay, in satellite radio system equipment is considered. It is supposed to use a multistage parallel-serial signal detection and synchronization procedure with joint detection and tracking devices for signal parameter changes with formation of their copies in the quasi-coherent receiver. For predetermined values of the characteristics of errors in the estimation of carrier frequencies and time delays of complex spread spectrum signals a method of approximate estimation of the duration of their detection and synchronization in the satellite radio system is developed. It is shown, that at a signal/noise ratio of the order (-10...-40) dB this time duration can make less than 0.5 s at consideration of possibilities of modern methods of processing of signals and the technological decisions used at their realization.

Keywords: complex spread spectrum signals, synchronization channel, signal detection, correlator, matched filter, digital storage device, phase-locked loop, automatic time setting.

References

1. Gerard Maral, Michel Bousquet, Zhili Sun (2020). *Satellite Communications Systems*. United Kingdom: Wiley, 800 p.
2. R.V. Volkov, V.N. Sayapin, V.V. Sevidov (2016). A model for measuring the time and frequency shift of a radio signal received from a repeater satellite when determining the location of an earth station. *T-Comm*, vol. 10, no 9, pp. 14-18.
3. V. I. Kulakova (2020). Detection of weak signals by mutual correlation method with phase instability compensation during radio monitoring of the frequency resource of satellite communication systems. *Control, communication and security systems*, no. 1, pp. 33-48.
4. N.Yu. Muzychenko (2019). Search and detection of noise-like signals in conditions of frequency instability of the communication channel. *Radio Engineering and Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 44-49.
5. I.I. Snytkin, T.I. Snytkin (2021). Method of "third solver circuit" to improve search and synchronization efficiency of complex broadband noise-like signals. *Electromagnetic waves and electronic systems*, vol. 26, no. 6, pp. 44-56, doi: 10.18127/j15604128-202106-05.
6. G. Urkovits (1967). Detection of unknown deterministic signals by energy. *TIIER*, no. 4, pp. 50-59.
7. S.F. Gorgadze (2022). *Synchronization in information and communication systems*. Moscow: Media Publisher, 44 p.
8. S.D. Vu, S.F. Gorgadze (2020). Accelerated search device for noise-like signal. Information Society Technologies. *Proceedings of XVI International Branch Scientific and Technical Conference*. Moscow, pp. 88-90.
9. L.E. Varakin (1985). *Communication systems with noise-like signals*. Moscow: Radio and Communications, 384 p.
10. V.P. Ipatov (2007). *Broadband systems and code division of channels. Principles and applications*. Moscow: Technosphere, 487 p.
11. S.D. Vu, S.F. Gorgadze (2023). Effectiveness of a device for rough estimation of synchronization parameters of a spread-spectrum signal. *DPSA: Questions of Application of Digital Signal Processing*, vol. 13, no. 1, pp. 31-39.
12. I.I. Snytkin, T.I. Snytkin (2022). Technical solution of the "third solver circuit" for increasing the search and synchronization efficiency of complex broadband noise-like signals. *Adv. of Modern Radio-electronics*, vol. 76, no. 7, pp. 40-50, doi: 10.18127/j20700784-202207-04.
13. S.F. Gorgadze, A.V. Ermakova (2023). Efficiency of IDMA and CDMA technologies at small spectrum expansion factor. *DPSA: Questions of digital signal processing application*, vol. 13, no. 2, pp. 22-29.
14. S.D. Vu, S.F. Gorgadze (2022). Probabilistic characteristics of the accelerated search for noise-like signals. *Telecommunications and information technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 120-127.
15. S.F. Gorgadze, T.M. Gut (2020). Accelerated estimation of spread spectrum signals synchronization parameters. *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 9078627.
16. I.I. Snytkin, T.I. Snytkin (2021). Algorithm of the "third solver scheme" realization to increase the search and synchronization efficiency of complex broadband noise-like signals. *Electromagnetic waves and electronic systems*, vol. 26, no. 3, pp. 54-63.
17. N.I. Smirnov, S.F. Gorgadze (1997). Time duration of synchronization of receiver noise-like complex signal in satellite asynchronous information transmission system. *Zarubezhnaya radioelektronika*, no. 5, pp. 41-51.
18. T.M. Gut, S.F. Gorgadze (2019). Characteristics of covariance functions and estimation of noise-like signal parameters. *Telecommunications and information technologies*, vol. 6, no 2, pp. 35-41.
19. G.V. Chechin (2020). *Satellite communication systems based on geostationary repeaters*. Moscow: Hot Line – Telecom, 96 p.
20. N.I. Smirnov, S.F. Gorgadze (1998). Accelerated detection of ultra-long synchro-signals and identification of subscriber stations in satellite personal radiocommunication systems with synchronous code division. *Radio Engineering and Electronics*, no. 12, pp. 1495-1504.
21. G.V. Chechin (2021). *Satellite communication systems based on non-geostationary repeaters*. Moscow: Hot Line – Telecom, 118 p.
22. S.F. Gorgadze (2006). Detection-recognition of addressable complex signals at multi-stage access with code division using fast spectral transformations. *Radiotekhnika and Elektronika*, no. 4, pp. 428-436.
23. K.A. Izz, A.K. Laith, S.H. Abbas (2020). Synchronization in DSSS system // *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 88-94, August 2020, doi: 10.1556/1848.2020.20003.
24. N.I. Smirnov, Yu.A. Karavaev (1982). Comparison of realizations of variants of microelectronic block for the detection of complex signals. *Radio Electronics*, no. 7, pp. 22-27.
25. P.S. Akimov, F.F. Evstratov, S.I. Zakharov, et al. (1989). *Detection of Radio Signals*. Edited by A.A. Kolosov. Moscow: Radio and Communications, 287 p.
26. Y.S. Lezin (1963). *Optimal filters and accumulators for pulse signals*. Moscow: Soviet Radio, 320 p.
27. V.I. Kostylev (2015). Generalized energy detectors of the first and second genera. *Vestnik VSU*, no. 3, pp. 102-111.
28. S.F. Gorgadze (2005). Asymmetrical modifications of the generalized fast Fourier and Fourier-adamar transform. *Radiotekhnika and elektronika*, vol. 50, no. 3, pp. 302-308.
29. S.F. Gorgadze, V.V. Boikov (2014). Measuring signals with multi-position subcarriers for satellite radio navigation systems. *Radiotekhnika and elektronika*, vol. 59, no. 3, pp. 264.
30. S.F. Gorgadze (2017). Complex composite signals with uniform amplitude envelope for satellite radio navigation systems. *Radio Engineering and Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 317-331.
31. T. Guangyu, C. Wenbing, Z. Hanchen, C. Yiwen, T. Yang, Y. Xuehui (2022). Research and Implementation of the Early-late Gate Bit Synchronization Algorithm in the Non-coherent Spread Spectrum System, 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Shenzhen, China, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851724.
32. M.S. Nemirovsky, B.A. Lokshin, D.A. Aronov (2021). *Fundamentals of building satellite communication systems*. Moscow: Hot Line – Telecom, 432 p.
33. V.I. Tikhonov (1983). *Optimal signal reception*. Moscow: Radio and Communications, 320 p.
34. G.M. Kvashnina, B.P. Sorokina, S.I. Burkov (2021). Excitation of Surface Acoustic Waves and Lamb Waves at the Svc in a Piezoelectric Layer Structure Based on Diamond. *Acoustic Journal*, vol. 67, no. 1, pp. 45-54.
35. V.V. Losev, E.B. Brodskaya, V.I. Korzhik (1988). *Search and decoding of complex discrete signals*. Moscow: Radio and Communications, 224 p.
36. Debdyuti Mandal, Sourav Banerjee (2022). Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications. *Sensors*, vol. 22, no. 3.
37. M.J. Muhammad, F.M.R.W. Mohd, T.N.N. Hoang, T.H. Le, R. Rahul, K.S. Ashish, F.D. Chang, Y.C. Edward, Y.M. Burhanuddin, A.TH.T. Clarence (2023). Surface Acoustic Wave Propagation of Gan/Sapphire Integrated with a Gold Guiding Layer. *Sensors*, vol. 23, no. 5.

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХРЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУР И ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-21-29

Аристархов Григорий Маркович,
Московский технический университет связи
и информации, Москва, Россия, g.aristarkhov2010@yandex.ru

Кириллов Игорь Николаевич,
Московский технический университет связи
и информации, Москва, Россия, i.kirillov2009@gmail.com

Кувшинов Вадим Владимирович,
ООО НПП "ФЛИКС", Москва, Россия, info@nppfliks.ru

Марковский Андрей Владимирович,
Московский технический университет связи
и информации, Москва, Россия, meth2health@gmail.com

Manuscript received 20 June 2023;
Accepted 27 July 2023

Ключевые слова: двухрезонаторные структуры, сонаправленные шпилечные резонаторы, нули передаточной характеристики, одно- и двухполосные полосно-пропускающие фильтры, фильтры нижних частот, разрядка спектра паразитных полос пропускания, повышенная частотная избирательность, 3D-моделирование, эксперимент

Повышение частотной избирательности микрополосковых фильтров традиционно достигается формированием в них нулей передаточной характеристики на конечных частотах. При этом заданные требования к избирательности фильтров обеспечиваются при меньшем числе резонаторов, а, следовательно, в более компактных структурах достигаются меньшие потери в полосе пропускания. Таким образом, эффективность этого подхода к синтезу микрополосковых фильтров определяется тем, какое число нулей передаточной характеристики потенциально возможно сформировать в тех или иных структурах. Одним из способов формирования нулей передаточной характеристики является введение дополнительных кросс-связей между несмежными резонаторами. Однако при синтезе высокоизбирательных фильтров на основе таких широко применяемых N -резонаторных структур формируется ограниченное число нулей, равное $N-2$. Вместе с тем известные двухрезонаторные структуры, в которых формируется значительно большее число нулей передаточной характеристики, в несколько раз превышающее количество резонаторов в них. Однако каждая из этих структур обладает своими специфическими частотно-селективными свойствами, что ограничивает области их широкого применения в качестве универсальных звеньев. Целью данной работы является синтез высокоизбирательных двухрезонаторных структур, обладающих разнообразными типами частотных характеристик, что расширяет области их применения. Исследованы частотные свойства микрополосковых двухрезонаторных структур нового типа, которые обладают широкими функциональными возможностями и повышенной частотной избирательностью. Показано, что в многоступенчатых структурах на двух полуволновых шпилечных резонаторах формируется при определенных условиях значительное число нулей передаточной характеристики, в два-три раза превышающее количество резонаторов в фильтре, а также вырождаются паразитные полосы пропускания. В зависимости от соотношения коэффициентов электромагнитного взаимодействия на разных участках длины связанных резонаторов они приобретают свойства как однополосных, так и многополосных полосно-пропускающих фильтров, а также фильтров нижних частот. Отмеченные особенности предопределяют возможность широкого применения этих структур в качестве самостоятельных компактных фильтров и базовых звеньев в составе фильтров более высокого порядка с существенно ограниченным числом резонаторов. Приводятся результаты электродинамического 3D-моделирования и экспериментальных исследований предлагаемых структур, которые находятся в хорошем соответствии.

Информация об авторах:

Аристархов Григорий Маркович, д.т.н., профессор кафедры "Электроника", МТУСИ, Москва, Россия

Кириллов Игорь Николаевич, аспирант кафедры "Электроника", МТУСИ, Москва, Россия

Кувшинов Вадим Владимирович, Генеральный директор, к.т.н., ООО НПП "ФЛИКС", Москва, Россия

Марковский Андрей Владимирович, аспирант кафедры "Электроника", МТУСИ, Москва, Россия

Для цитирования:

Аристархов Г.М., Кириллов И.Н., Кувшинов В.В., Марковский А.В. Селективные свойства двухрезонаторных структур и высокоизбирательные фильтры на их основе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 21-29.

For citation:

Aristarkhov G.M., Kirillov I.N., Kuvshinov V.V., Markovskiy A.V. (2023) Selective properties of two-resonator structures and highly selective filters based on them. *T-Comm*, vol. 17, no.8, pp. 21-29. (in Russian)

Введение

Микрополосковые фильтры (МПФ) находят самое широкое применение в микроволновой технике, что определяется их совместимостью с технологией создания гибридных, монокристаллических и объемных интегральных схем СВЧ. Однако все возрастающие требования, предъявляемые к габаритам, потерям в полосе пропускания и частотной избирательности МПФ, обуславливают необходимость разработки новых принципов их построения, так как традиционные структуры фильтров с такими характеристиками подошли к границам предельных значений физической реализуемости [1].

Важно отметить, что структуры фильтров, содержащие меньшее число резонаторов, обладают при прочих равных условиях более низким уровнем потерь в полосе пропускания и являются более компактными. При этом повышение частотной избирательности фильтров с ограниченным числом резонаторов достигается формированием в них нулей передаточной характеристики за счет введения кросс-связей между несмежными резонаторами [2-6], а также использованием свойств многомодовых структур [7, 8].

Однако возможности этого принципа построения фильтров также ограничены, так как число нулей передаточной характеристики в них не превышает количества резонаторов. Вместе с тем известны двухрезонаторные структуры, в которых формируется значительно большее число нулей передаточной характеристики, в несколько раз превышающее количество резонаторов в них [1, 9, 10]. Структуры, обладающие этим уникальным свойством, могут применяться в качестве как самостоятельных фильтров, так и базовых звеньев в составе фильтров более высокого порядка. Однако каждая из этих структур обладает своими специфическими частотно-селективными свойствами, что ограничивает области их широкого применения в качестве универсальных звеньев. Поэтому практический интерес представляет дальнейший синтез подобных структур, но с другими типами частотных характеристик, что позволит более оптимально решать задачи фильтрации радиосигналов.

В данной работе исследуются механизмы и условия формирования значительного числа нулей передаточной характеристики в двухрезонаторных микрополосковых структурах нового типа, обладающих широкими функциональными возможностями и повышенной частотной избирательностью.

Частотно-селективные свойства полосно-пропускающей четвертьволновой решетчатой секции

Одним из базовых звеньев микрополосковых фильтров с повышенной частотной избирательностью является четвертьволновая решетчатая секция на двух связанных микрополосковых линиях (МПЛ). В этой полосно-пропускающей секции формируется нуль передаточной характеристики вблизи полосы пропускания, который может располагаться (в зависимости от того какая связь между МПЛ является преобладающей) или в области нижних, или в области верхних частот. В случае преобладающей магнитной связи нуль передаточной характеристики формируется в области нижних частот. В [11] показано, что выполнение этой четвертьволновой решетчатой секции на основе свернутых

МПЛ обуславливает формирование еще двух дополнительных, так называемых, вторичных нулей передаточной характеристики в области верхних частот. Это обеспечивает как в двухрезонаторных, так и в многорезонаторных фильтрах с применением этой секции существенно более широкую полосу заграждения и более высокий уровень затухания в ней [11].

Исследуем условия формирования дополнительных вторичных нулей передаточной характеристики в симметричных четвертьволновых решетчатых секциях с преобладающей электрической связью между МПЛ. На рисунке 1 представлены двух- и трехступенчатые структуры таких микрополосковых секций.

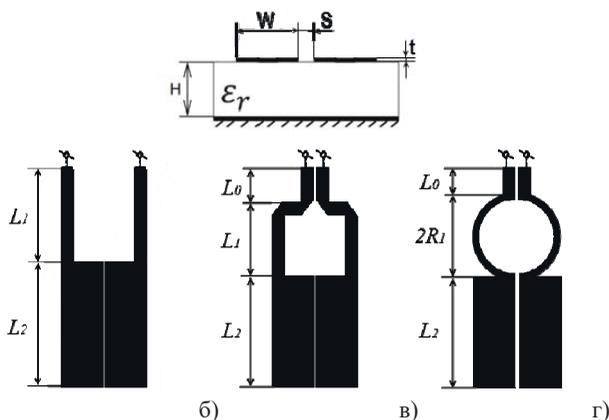


Рис. 1. Варианты исполнения двух- и трехступенчатых решетчатых секций

Механизмы и условия формирования как основных, так и вторичных нулей передаточной характеристики будем исследовать с применением метода зеркальных отображений эквивалентных четырехполюсников. На рисунке 2 приведена уравновешенная мостовая схема замещения симметричного четырехполюсника, в которой парциальные двухполюсники Z_a и Z_b представляют собой входные сопротивления эквивалентного четырехполюсника при его нечетном (θ_o) и четном (θ_e) возбуждении соответственно.

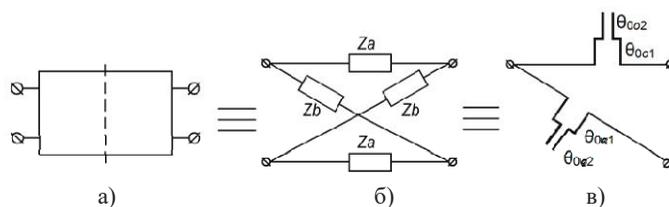


Рис. 2. Уравновешенные мостовые схемы замещения симметричного четырехполюсника и двухступенчатой решетчатой секции (в)

При этом каждой квази-Г волне, распространяющейся в системе двух связанных линий, ставится в соответствие в уравновешенной мостовой схеме замещения решетчатой секции свой резонатор с волновыми параметрами структуры при том или ином ее возбуждении (рис. 2,в). В частности, для двухступенчатой решетчатой секции парциальные двухполюсники представляются в схеме замещения в виде отрезков одиночных линий передачи со скачком волновых сопротивлений на участках длины L_1 и L_2 с электрическими длинами θ_{o1} , θ_{o2} и θ_{e1} , θ_{e2} соответственно и с волновыми сопротивлениями Z_{o1} , Z_{o2} и Z_{e1} , Z_{e2} .

Таким образом, управление частотными свойствами решетчатой секции достигается за счет задания определенных значений волновых параметров структуры по каждой из мод.

Как известно, $[Z]$ -матрица симметричного четырехполюсника определяется следующим образом:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_b + Z_a & Z_b - Z_a \\ Z_b - Z_a & Z_b + Z_a \end{bmatrix}; \quad (1)$$

Как следует из (1), условием формирования нулей передаточной характеристики на частотах $f_{\infty i}$ является условие равенства нулю сопротивления связи эквивалентного четырехполюсника $Z_{12}(f_{\infty i})=0$, которое выполняется при балансе импедансов парциальных двухполюсников $Z_a(f_{\infty i})=Z_b(f_{\infty i})$. Необходимо отметить, что в системе связанных МПЛ проявляется вследствие неоднородности среды (подложка-воздух, рис. 1,а) эффект неравенства фазовых скоростей нормальных волн $v_{0e} \neq v_{0o}$, что эквивалентно условию неуравновешенности электрической K_C и магнитной K_L связей в связанных МПЛ $K_C \neq K_L$:

$$K_L = \frac{z_{0e} - z_{0o} \sqrt{\epsilon_{0o}/\epsilon_{0e}}}{z_{0e} + z_{0o} \sqrt{\epsilon_{0o}/\epsilon_{0e}}} \quad (2)$$

$$K_C = \frac{z_{0e} - z_{0o} \sqrt{\epsilon_{0e}/\epsilon_{0o}}}{z_{0e} + z_{0o} \sqrt{\epsilon_{0e}/\epsilon_{0o}}}, \quad (3)$$

где ϵ_{0e} , ϵ_{0o} – эффективные диэлектрические проницаемости системы двух связанных МПЛ при четном и нечетном ее возбуждении. Это является достаточным условием, при котором решетчатая секция становится полосно-пропускающей. При фазовом синхронизме волн $v_{0e} = v_{0o}$, то есть при условии уравновешенности электромагнитных связей $K_C = K_L$, решетчатая секция проявляет свойства всезаграждающей цепи.

Таким образом, управление шириной полосы пропускания микрополосковой решетчатой секции и расположением основного нуля передаточной характеристики относительно нее определяется соотношением этих электромагнитных связей. Учитывая распределение плотности тока в четвертьволновой секции, можно выделить в ней области с преобладающей электрической и магнитной связями между МПЛ. Следовательно, управление частотными характеристиками секций может быть обеспечено за счет скачка электромагнитного взаимодействия на разных участках ее длины (L_1 и L_2 на рис. 1,б).

На рисунке 3,а представлена частотная зависимость передаточной характеристики (пунктирная кривая) двухступенчатой четвертьволновой решетчатой секции с преобладающей электрической связью между МПЛ. В данной секции условие баланса импедансов парциальных двухполюсников выполняется без учета потерь в МПЛ ($Z_{a,b} = jX_{a,b}$) только на единственной частоте $f_{\infty 1}$ в области верхних частот (рис. 3,б).

Так как в четвертьволновой решетчатой секции характеристическое сопротивление $Z_c = \sqrt{-X_a X_b}$ в первой области $\Delta f_{c1} = |f_{b1} - f_{a1}|$ его вещественных значений является низкоомным, то сопротивление портов (сопротивление генератора и

нагрузки) задавалось при моделировании равным 1,5 Ом. Здесь f_{b1} и f_{a1} – граничные частоты характеристической полосы пропускания Δf_{c1} четвертьволновой решетчатой секции, т. е. первые резонансные частоты парциальных двухполюсников $Z_b(f_{b1})=0$ и $Z_a(f_{a1})=0$ ее схемы замещения.

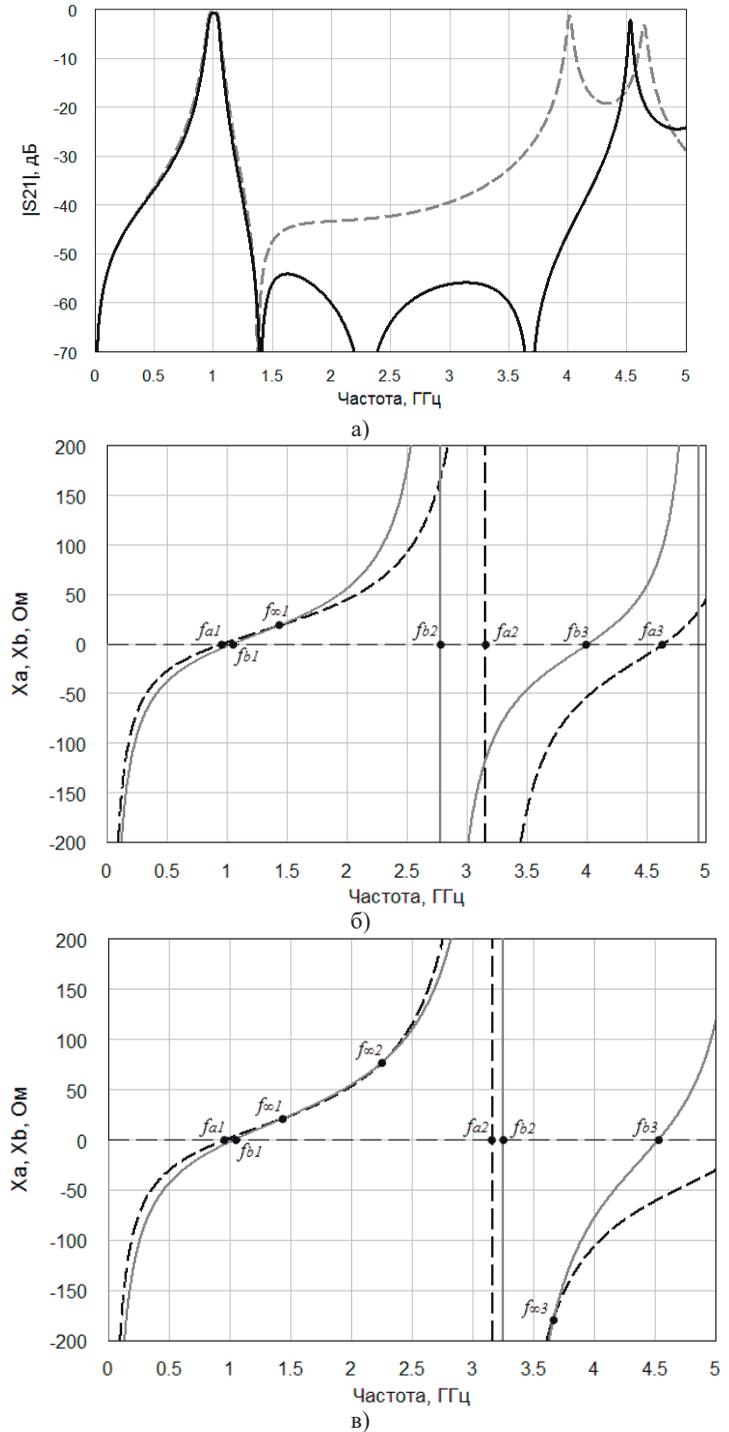


Рис. 3. Частотные зависимости передаточной характеристики и импедансов парциальных двухполюсников решетчатых секций (X_a – пунктир; X_b – сплошная кривая)

Наряду с этой низкоомной областью Z_c в секции формируются и другие низкоомные и высокоомные области вещественных значений Z_c с граничными частотами f_{ai} и f_{bi} (рис. 3,б).

При создании фильтров с применением этой секции в этих областях частот могут сформироваться, если не принять особых мер, паразитные полюсы пропускания.

Очевидно, чтобы выполнить условие формирования дополнительных полюсов рабочего затухания и обеспечить при этом вырождение паразитных областей вещественных значений Z_c , необходимо придать частотным зависимостям парциальных двухполюсников определенное поведение, при котором условие их баланса должно одновременно выполняться на нескольких частотах (рис. 3,в). Для этого усилим в решетчатой секции электромагнитное взаимодействие между МПЛ в локальной области L_0 , топологически образуя "горлышко" (рис. 1,в).

В полученной таким образом трехступенчатой решетчатой структуре возможно формирование двух дополнительных нулей передаточной характеристики, обеспечивающих повышенный уровень затухания в полосе заграждения и разрядку спектра паразитных полос пропускания. Следует отметить, что этот эффект достигается при условии минимального электромагнитного взаимодействия между МПЛ на среднем участке их длины L_1 . Это условие легко реализуется при выполнении отрезков МПЛ на этом участке, например, в виде двух полуколец (рис. 1,г).

На рисунке 3, а представлена для этой структуры частотная зависимость ее передаточной характеристики (сплошная кривая) при тех же условиях согласования. Решетчатая секция выполнена на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$. Расстояния между МПЛ S_0 в области "горлышка" и в области (L_2) с преобладающей электрической связью $S_0=S_2=0,1$ мм. Минимальная и максимальная ширины МПЛ, а также геометрические длины отрезков связанных МПЛ и радиус полуколец равны соответственно: $W_{\min}=0,4$ мм; $W_{\max}=3,9$ мм; $L_0=1,0$ мм; $L_2=10,23$ мм; $R_1=2,34$ мм. Заметим, что выбирая отмеченные выше геометрические параметры структуры, которая обладает повышенной односторонней частотной избирательностью, можно в широких пределах управлять положением полюсов рабочего затухания на частотной оси, а также выполнить условие вырождения паразитной области вещественных значений Z_c . На рисунке 4 представлены результаты синтеза такой секции, в которой $f_{a2}=f_{b2}=f_{c3}$. Это достигается за счет ослабления электромагнитного взаимодействия в решетчатой секции в области "горлышка" ($S_0=0,17$ мм).

Перераспределим на частотной оси нули передаточной характеристики так, чтобы один из них формировался в области нижних частот. Это достигается усилением магнитного взаимодействия между МПЛ решетчатой секции в области "горлышка" за счет увеличения его длины ($L_0=5,45$ мм), а также увеличением радиуса полуколец ($R_1=2,9$ мм). При этом электрическое взаимодействие уменьшается, что обеспечивает требуемый баланс электрического и магнитного взаимодействия между МПЛ.

На рисунке 5 представлена структура и результаты моделирования решетчатой секции, обеспечивающей повышенную крутизну передаточной характеристики в области нижних частот.

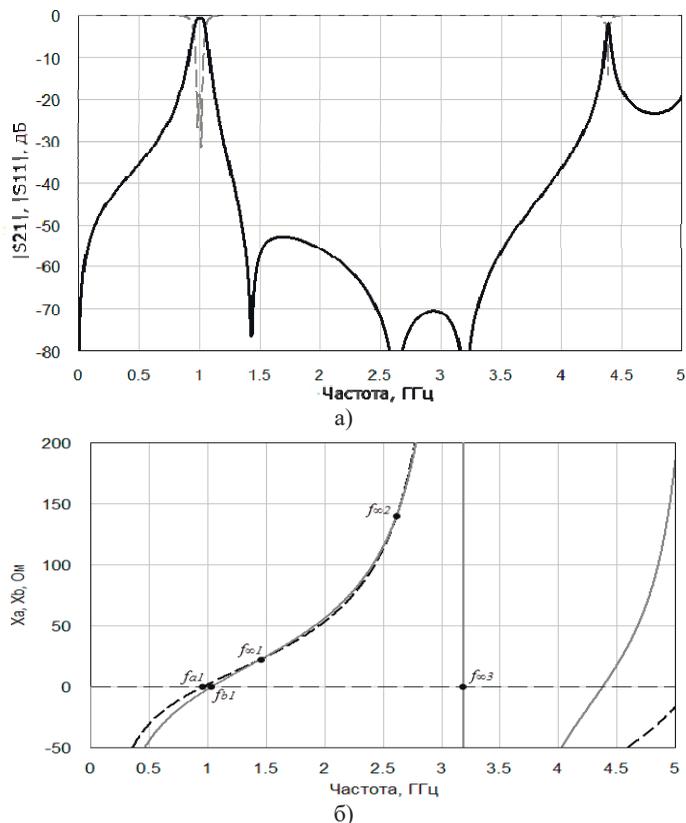
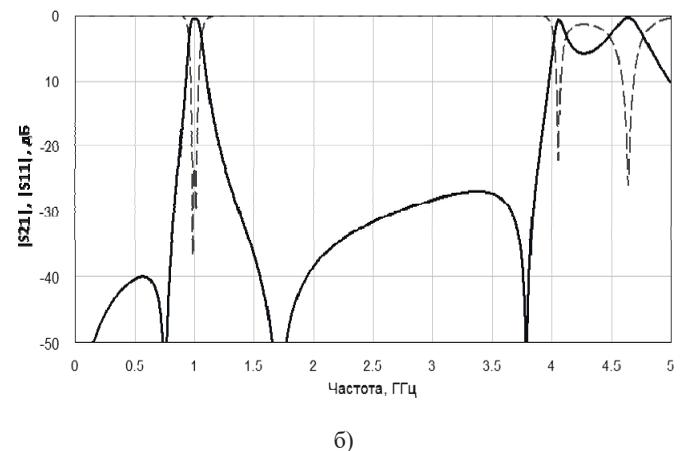


Рис. 4. Частотные зависимости передаточной характеристики и импедансов парциальных двухполюсников решетчатой секции с вырожденной паразитной полосой пропускания



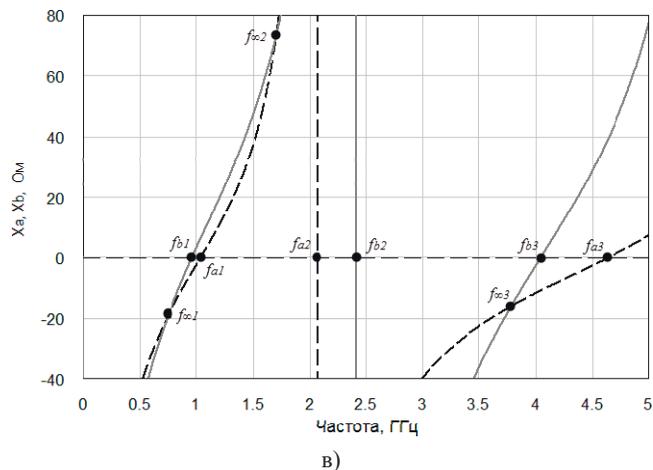


Рис. 5. Частотные зависимости передаточной характеристики и импедансов парциальных двухполюсников решетчатой секции с повышенной частотной избирательностью в области нижних частот

При этом электрическая длина секции при ее четном возбуждении больше, чем при нечетном ($f_{b1} < f_{a1}$), то есть в структуре в частотной области полосы пропускания, преобладающей является магнитная связь между МПЛ.

Отличительная особенность этой структуры состоит в том, что в ней возможно более близкое расположение нулей передаточной характеристики к полосе пропускания. Структура физически реализуема, так как $S_{min}=0,2$ мм. Выбор того или иного режима работы четвертьволновой решетчатой секции, применяемой в составе фильтров более высокого порядка, будет определяться требованиями, предъявляемыми к их частотной избирательности.

Двухрезонаторные полосно-пропускающие МПФ

Обеспечим условие согласования трехступенчатой четвертьволновой решетчатой секции с нагрузкой ($R_n=50$ Ом) с помощью К-инверторов, выполненных в виде Т-сочленения. В результате формируется микрополосковая структура на двух полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторах, которая представлена на рисунке 6,а.

Отличительной особенностью этой структуры от ранее известных является выполнение центральной решетчатой секции с усиленной локальной магнитной связью между МПЛ в области “горлышка”. Каждый из уединенных шлейфов согласующих Т-сочленений формирует свой нуль передаточной характеристики, расщепление которых в общей структуре МПФ достигается электромагнитным взаимодействием между плечами в каждом из резонаторов, которое имеет преобладающую электрическую связь.

На рисунке 6, б-в представлены результаты электродинамического 3D-моделирования двухрезонаторного МПФ. Механизмы формирования нулей передаточной характеристики и вырождения паразитных полос пропускания удобно исследовать на основе анализа сопротивления связи $Z_{12}(f) = jX_{12}(f) = j0.5(X_b(f) - X_a(f))$ эквивалентного симметричного четырехполюсника без учета потерь в МПЛ.

На частотах $f_{\infty i}$, на которых выполняется условие баланса импедансов парциальных двухполюсников схемы замещения, формируются нули передаточной характеристики. При этом на частотах $f_{\infty 1}$, $f_{\infty 2}$ и $f_{\infty 5}$ нули формируются в основном решетчатой секцией.

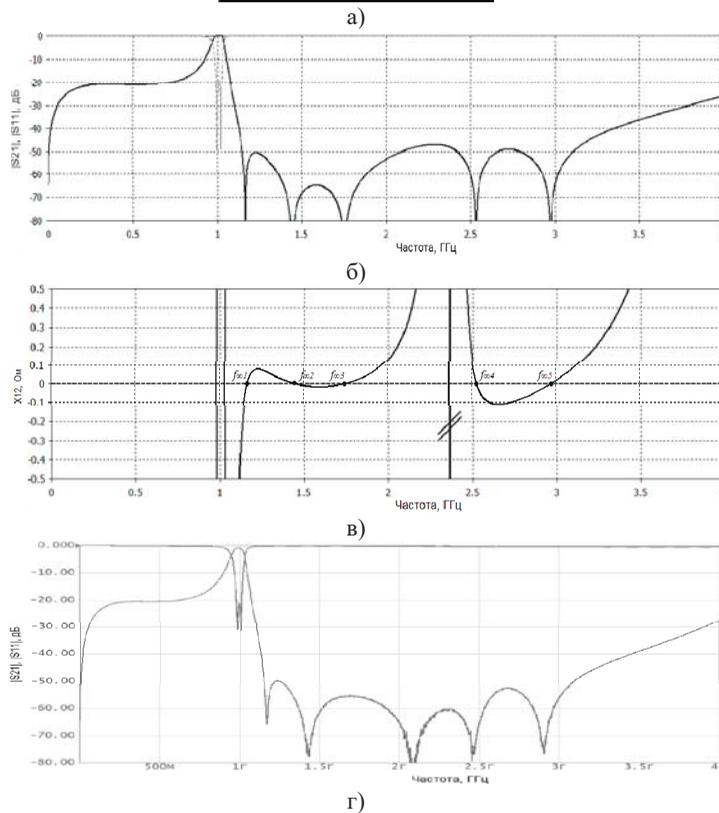
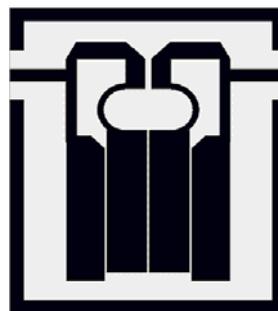


Рис. 6. Двухрезонаторный МПФ и частотные зависимости его рабочего затухания (б – теория, г – эксперимент), возвратных потерь (пунктирные кривые), и сопротивления связи

Расщепленные нули передаточной характеристики $f_{\infty 3}$ и $f_{\infty 4}$ формируются Т-сочленениями. Паразитная полоса пропускания МПФ вырождена, что отмечено двумя косыми чертами на рисунке 6,в. Это достигается тем, что в этой области частот электромагнитные связи между МПЛ уравновешены и ширина паразитной характеристической полосы пропускания равна нулю.

Необходимо отметить, что эффективные нули передаточной характеристики в многопроводных многомодовых структурах формируются только при условии выполнения определенного баланса электромагнитных связей между всеми МПЛ. Неправильное распределение нулей передаточной характеристики на частотной оси за счет их смещения и тем более перемерзения обуславливает их частичное или

полное вырождение. Таким образом, в рассматриваемой двухрезонаторной структуре формируется $2N+1$ нулей передаточной характеристики, что обеспечивает повышенную одностороннюю частотную избирательность и разрядку спектра паразитных полос пропускания.

На рисунке 6,г представлены результаты экспериментальных исследований рассматриваемого двухрезонаторного МПФ, выполненного в виде закрытой структуры. Расстояние от подложки до крышки составляет $h=3$ мм. Боковые стенки крышки припаиваются к металлизированному контуру, выполненному по периметру подложки, который, в свою очередь, соединен по торцам подложки с металлизацией ее обратной стороны. МПФ изготовлен по толстопленочной технологии на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9.8$. Минимальное расстояние между связанными МПЛ $S_{\min}=0.2$ мм.

Минимальная и максимальная ширины отрезков МПЛ равны $W_{\min}=0.4$ мм и $W_{\max}=2.9$ мм соответственно. Площадь подложки, занимаемая топологией структуры МПФ, составляет 12×19 мм, т. е. $0.016\lambda^2$, где λ – длина квази-Т волны на центральной частоте полосы пропускания МПФ. Отметим, что результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами 3D-моделирования (рис. 6,б и 6,г). Относительная ширина полосы пропускания фильтра, определяемая по уровню возвратных потерь минус 23 дБ, равна 5%. Вносимые потери на центральной частоте полосы пропускания совместно с потерями в разьемах составили 0.95 дБ.

Покажем, что перераспределение полюсов рабочего затухания в решетчатой секции (см. рис. 5) обеспечивает возможность повышения частотной избирательности двухрезонаторного МПФ и в области нижних частот.

На рисунке 7 представлены результаты электродинамического 3D-моделирования такой двухрезонаторной структуры при минимальном расстоянии между МПЛ $S_{\min}/H=0.48$. Расстояние от подложки до крышки составляет 3 мм. При этом расщепление вторичных нулей передаточной характеристики, формируемых решетчатой секцией, и нулей, формируемых шлейфами согласующих Т-сочленений, достигается при условии электрического взаимодействия между шлейфами.

В результате этого топология структуры двухрезонаторного МПФ принимает вид, показанный на рисунке 7,а. Четвертьволновая решетчатая секция формирует нули передаточной характеристики на частотах $f_{\infty 1}$, $f_{\infty 4}$ и $f_{\infty 5}$, а шлейфы Т-сочленений – на частотах $f_{\infty 2}$, $f_{\infty 3}$.

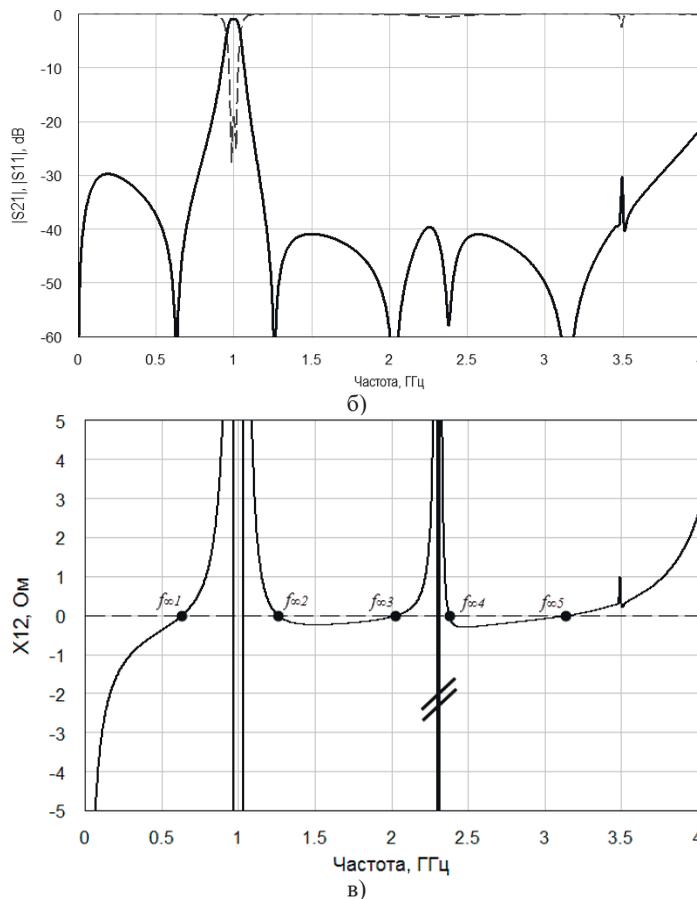
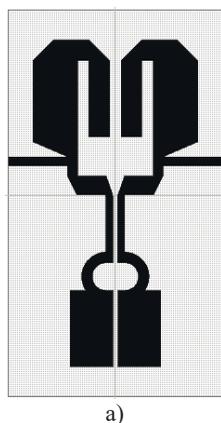


Рис. 7. Двухрезонаторный МПФ с повышенной частотной избирательностью в области нижних частот

Двухполосные МПФ

Расширим функциональные возможности двухрезонаторной структуры, перераспределив нули передаточной характеристики на частотной оси, формируемых шлейфами, располагая их в области нижних частот, применив прием "рокировки [6]. При этом основной нуль передаточной характеристики, формируемый трехступенчатой решетчатой секцией, располагается посередине полосы пропускания, образуя двухполосную амплитудно-частотную характеристику. Вторичные нули передаточной характеристики решетчатой секции обеспечивают широкую полосу заграждения в области верхних частот.

На рисунке 8 представлены результаты синтеза такого фильтра в виде структуры на двух полуволновых сонаправленных шпилечных резонаторах, выполненных на подложке толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=20$.

Отличительной особенностью рассматриваемой структуры является формирование в ней значительного числа нулей передаточной характеристики, что обеспечивает по сравнению с известными схемами [4, 12] при тех же полосах пропускания повышенную частотную избирательность фильтра при минимальном числе полуволновых резонаторов. Ширина полосы пропускания в каждом из каналов составляет не менее 70 МГц.

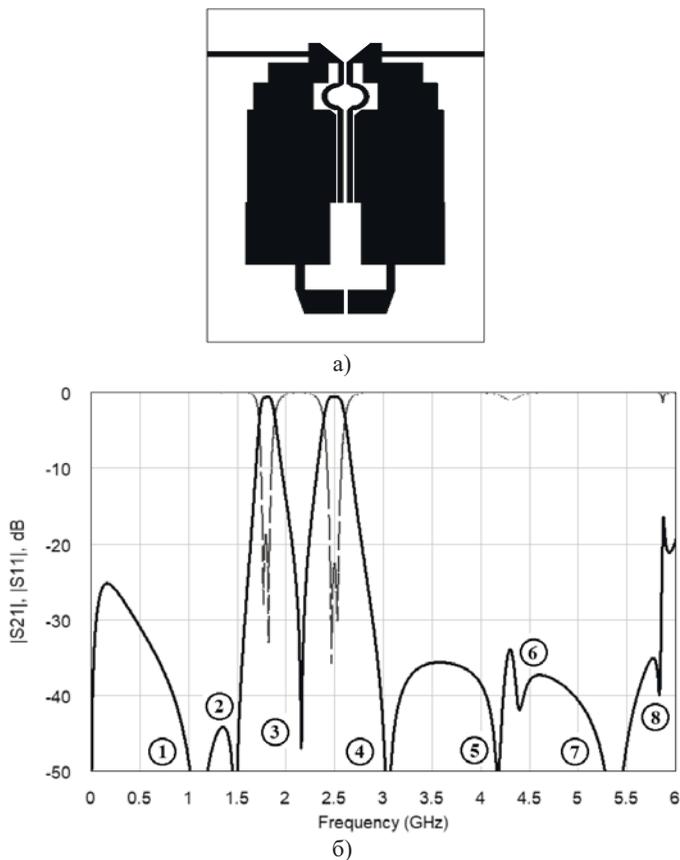


Рис. 8. Двухрезонаторный двухполосный МПФ и его частотные характеристики

Двухрезонаторные фильтры нижних частот

Преобразуем двухрезонаторную полосно-пропускающую структуру в структуру фильтра нижних частот (ФНЧ). Для этого введем между смежными плечами сонаправленных полуволновых шпилечных резонаторов перемычку, в результате чего центральная решетчатая секция преобразуется в Y-звено (рис. 9,а), что обеспечивает передачу в фильтре постоянной составляющей входного сигнала. Результирующая двухрезонаторная многоступенчатая микрополосковая структура ФНЧ приобретает вид, который представлен на рисунке 9,б. Все элементы четырехпроводной структуры электромагнитно взаимосвязаны между собой. Выявим условия формирования в структуре множества нулей передаточной характеристики.

На рисунке 9,в представлена частотная зависимость передаточной характеристики одного из вариантов реализации рассматриваемой структуры ФНЧ. При существенно ограниченном числе резонаторов многоступенчатая структура обеспечивает высокий уровень затухания в широкой полосе заграждения, а также высокую крутизну рабочего затухания в его переходной области.

Микрополосковая структура реализуется на подложке толщиной $H=1$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$. Минимальная ширина микрополосковых линий в структуре $W_{\min}=0,3$ мм, а минимальное расстояние между связанными МПЛ $S_{\min}=0,3$ мм. Площадь подложки, которую занимает топология ФНЧ, составляет 10×24 мм, т.е. $0,017\lambda^2$, где λ – длина квази-Т волны на частоте среза ФНЧ.

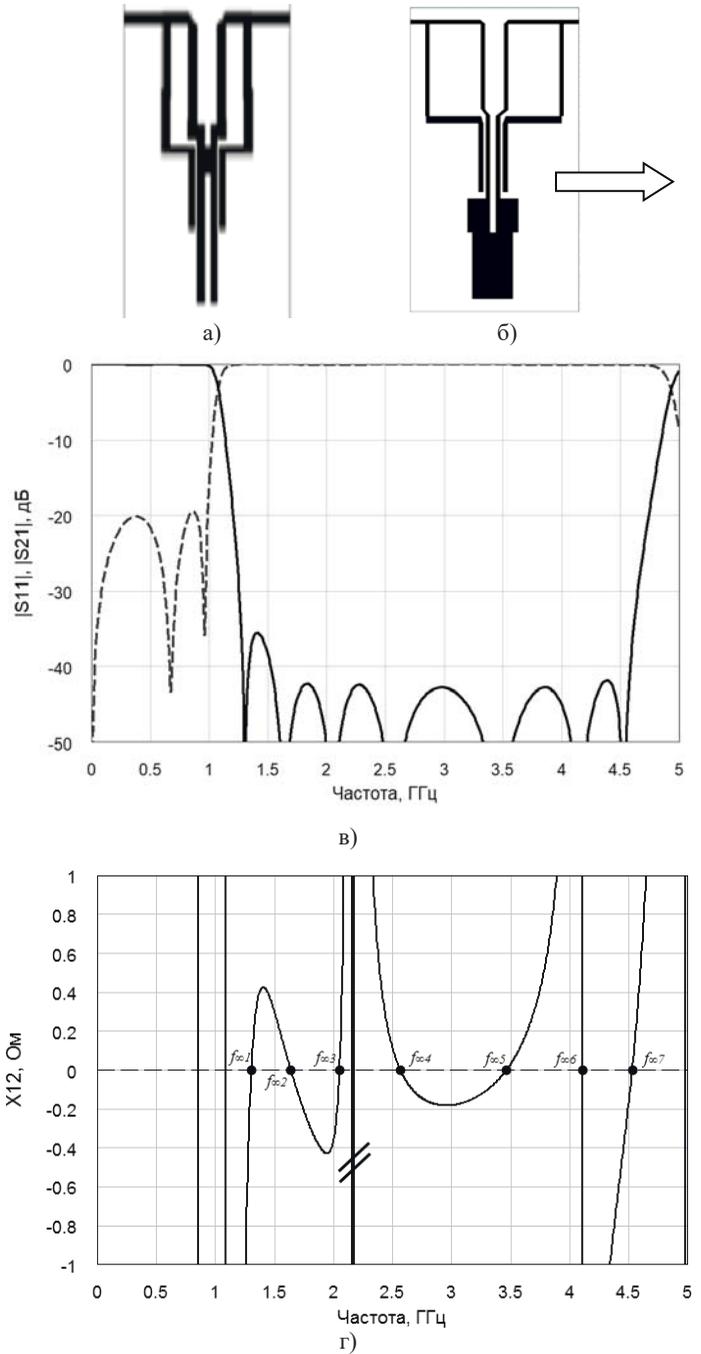


Рис. 9. Топология многоступенчатого двухрезонаторного микрополоскового ФНЧ и ее частотные зависимости

Механизм формирования значительного числа нулей передаточной характеристики в многоступенчатой двухрезонаторной структуре иллюстрирует частотная зависимость сопротивления связи эквивалентного реактивного четырехполосника $Z_{12}(f)$, которая представлена на рисунке 9,г. Паразитные полосы пропускания на второй, третьей и четвертой гармониках вырождены, так как электромагнитные связи на этих частотах уравновешены и области вещественных значений Z_c не формируются. Как видим, условие баланса импедансов $X_a(f_{zci})=X_b(f_{zci})$ выполняется на семи частотах f_{zci} .

В целом в полосе заграждения сопротивление связи $|X_{12}|$ эквивалентного четырехполосника имеет низкое значение (≤ 0.4 Ом), что свидетельствует о том, что связь между пор-

тами ФНЧ в этом диапазоне частот очень слабая и это обеспечивает рабочее заглушение порядка 40 дБ в широкой полосе заграждения.

Заключение

Двухрезонаторные многоступенчатые структуры на сонаправленных шпилечных резонаторах обладают широкими функциональными возможностями, так как на их основе реализуются при определенных условиях одно- и двухполосные полосно-пропускающие фильтры с различными типами частотных характеристик, а также фильтры нижних частот. Определены условия, при которых эти структуры обладают повышенной частотной избирательностью за счет формирования значительного числа нулей передаточной характеристики, в несколько раз превышающего количество резонаторов в фильтре, а также разрядки спектра паразитных полос пропускания. Отмеченные селективные свойства двухрезонаторных структур определяют возможность их широкого применения как в качестве самостоятельных фильтров, так и базовых звеньев в составе МПФ более высокого порядка.

Литература

1. *Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев И.Н., Зайченко К.В., Комаров В.В.* и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. Монография / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника. 2020. 504 с.
2. *Роудз Дж.Д.* Теория электрических фильтров: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
3. *Hong J. G. and Lancaster M. J.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications // *Microwave Applications*. N. Y.: Wiley, 2001.
4. *Brand T.G., Crnojevic-Bengin V., Cseleyuszka N.* et al. Advances in Multi-Band Microstrip Filters. Edited by Vesna Crnojevic-Bengin // Cambridge University Press, 2015, 318 с.
5. *Захаров А.В., Розенко С.А.* Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры с паразитными связями, содержащие четвертьволновые и П-образные резонаторы // *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64, №4. С. 409-418.
6. *Захаров А.В., Розенко С.А., Литвинцев С.Н.* Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр четвертого порядка со смешанной перекрестной связью // *Радиотехника и электроника*. 2021. Т.66, №2. С. 190-198.
7. *Ходенков С.А., Беляев Б.А., Бальва Я.Ф., Аплеснин С.С., Бандурина О.Н.* // Микрополосковый широкополосный фильтр // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т.1. С. 414-416.
8. *Беляев Б.А., Ходенков С.А., Говорун И.В., Сержантов А.М.* Широкополосный высокоселективный микрополосковый фильтр на двухмодовых резонаторах // Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503, №1. С. 57-62.
9. *Аристархов Г.М., Зvezdinov Н.В.* // Высокоизбирательные одно- и двухрезонаторные микрополосковые фильтры. // *Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62, №8. С. 819-824.
10. *Aristarkhov G.M., Grebennikov A. and Zvezdinov N.V.* High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators // *IEEE Microwave Magazine*, Nov. 2019, vol. 20, no.11, pp. 22-31, doi:10/1109/MMM.2019.2935362.
11. *Аристархов Г.М., Кириллов И.Н., Корчагин А.И., Кувшинов В.В.* Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на свернутых сонаправленных шпилечных резонаторах // *Радиотехника и электроника*. 2021. Т.85. №4. С. 126-137. doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202104-14>.
12. *Wang X., Wang J., Zhu L., Choi W.-W., Wu W.* "Compact Stripline Dual-Band Bandpass Filters With Controllable Frequency Ratio and High Selectivity Based on Self-Coupled Resonator" // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, vol. 68, no.1, pp. 102-110, doi:10/1109/TMTT.2019.2945768.

SELECTIVE PROPERTIES OF TWO-RESONATOR STRUCTURES AND HIGHLY SELECTIVE FILTERS BASED ON THEM

Grigory M. Aristarkhov, MTUCI, Moscow, Russia, g.aristarkhov2010@yandex.ru

Igor N. Kirillov, MTUCI, Moscow, Russia, i.kirillov2009@gmail.com

Vadim V. Kuvshinov, LLC SPE "FLIX", Moscow, Russia, info@nppfliks.ru

Andrey V. Markovskiy, South West State University, Kursk, Russia, meth2health@gmail.com

Abstract

An increase in the frequency selectivity of microstrip filters is traditionally achieved by forming transient response zeros at final frequencies. In this case, the specified requirements for the selectivity of filters are provided with a smaller number of resonators, and, consequently, lower losses in the passband are achieved in more compact structures. Thus, the effectiveness of this approach to the synthesis of microstrip filters is determined by the number of transient response zeros that can potentially be formed in various structures. One way to form damping transient response zeros is to introduce additional cross-couplings between non-adjacent resonators. However, when synthesizing highly selective filters based on such widely used N-resonator structures, a limited number of transient response zeros equal to N-2 is formed. At the same time, two-resonator structures are known in which a much larger number of transient response zeros is formed, which is several times greater than the number of resonators in them. However, each of these structures has its own specific frequency-selective properties, which limits the scope of their wide application as universal links. The aim of this work is the synthesis of highly selective two-cavity structures with various types of frequency characteristics, which expands the scope of such structures. The frequency properties of microstrip two-resonator structures of a new type, which have broad functionality and increased frequency selectivity, are studied. It is shown that in multistage structures on two half-wave hairpin resonators, under certain conditions, a signif-

icant number of transient response zeros is formed, which is two to three times greater than the number of resonators in the filter, and parasitic transmission bands also degenerate. Depending on the ratio of the coefficients of electromagnetic interaction in different sections of the length of the coupled resonators, they acquire the properties of both single-band and multi-band bandpass filters, as well as low-pass filters. The noted features predetermine the possibility of wide application of these structures as both independent compact filters and basic units as part of higher-order filters with a significantly limited number of resonators. The results of electrodynamic 3D modeling and experimental studies of the proposed structures are presented, which are in good agreement.

Keywords: dual resonator structures, co-directional hairpin resonators, transient response zeros, one- and two-band bandpass filters, low-pass filters, discharge of the spectrum of spurious bands, increased frequency selectivity, 3D modeling, experiment

References

1. G.M. Aristarkhov, Yu.V. Gulayev, I.N. Dmitriev, K.V. Zaichenko, V.V. Komarov and etc. (2020). Filtering and spectral analysis of radio signals. Algorithms. Structures. Devices. Ed. Yu.V. Gulyaev. Moscow: Radio engineering.
2. J. D. Rhodes (1980). Theory of Electrical Filters. USA: John Wiley and Sons.
3. J. G. Hong (2011). Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. *Microwave Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons.
4. T.G. Brand, V. Crnojevic-Bengin, N. Cselyuszka, et al. (2015). Advances in Multi-Band Microstrip Filters. Edited by Vesna Crnojevic-Bengin. Cambridge University Press.
5. A.V. Zakharov, S.A. Rozenko (2019). Microstrip spurious-coupling band-pass filters with quarter-wavelength and Π -shaped resonators. *Journal of Communications Technology and Electronics*, no. 64 (4), pp. 430-438.
6. A.V. Zakharov, S.A. Rozenko, S.N. Litvintsev (2021). Fourth-order microstrip band-pass filter with mixed cross-coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*, no. 66 (2), pp. 211-219.
7. S.A. Khodenkov, B.A. Belyaev, Ya. F. Balva, S.S. Aplesnin, O.N. Bandurina (2016). The microstrip wideband filter. *Actual problems of aviation and astronautics*, no. 1, pp. 414-416.
8. B.A. Belyaev, S.A. Khodenkov, I.V. Govorun, A.M. Serzhantov (2022). Highly selective wideband bandpass microstrip dual-mode filter. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, technical sciences*, no. 503 (1), pp. 57-62.
9. G.M. Aristarkhov, N.V. Zvezdinov (2017). High-selectivity single- and dual-resonator microstrip filters. *Journal of Communications Technology and Electronics*, no. 62 (8), pp. 916-920.
10. G.M. Aristarkhov, A. Grebennikov, N.V. Zvezdinov (2019). High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators. *IEEE Microwave Magazine*, no. 20 (11), p. 22. doi:10.1109/MMM.2019.2935362.
11. G.M. Aristarkhov, I.N. Kirillov, A.I. Korchagin, V.V. Kuvshinov (2021). Compact highly selective microstrip filters based on coiled codirectional hairpin resonators. *Radio engineering*, no. 85 (4), pp. 126-137. doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202104-14>.
12. X. Wang, J. Wang, L. Zhu, W.-W. Choi, W. Wu. (2020). Compact Stripline Dual-Band Bandpass Filters With Controllable Frequency Ratio and High Selectivity Based on Self-Coupled Resonator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, no. 68 (1), pp. 102-110. doi:10.1109/TMTT.2019.2945768.

Information about authors:

Grigory M. Aristarkhov, d. t. s., Professor of the Department of Electronics, MTUCI, Moscow, Russia

Igor N. Kirillov, postgraduate student of the Department of Electronics, MTUCI, Moscow, Russia

Vadim V. Kuvshinov, CEO, c. t. s., LLC SPE "FLIX", Moscow, Russia

Andrey V. Markovskiy, postgraduate student of the Department of Electronics, MTUCI, Moscow, Russia

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-30-37

Manuscript received 08 June 2023;
Accepted 20 July 2023

Лихтциндер Борис Яковлевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
lixt@psuti.ru

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровое моделирование, компьютерное моделирование, цифровая модель, среда моделирования, моделируемая сеть, система управления, прогнозирование

Аналитические методы состоят в преобразовании символьной информации, записанной на языке математического анализа. При использовании аналитических методов строится математическая модель объекта, например, в виде дифференциальных или интегральных уравнений. При аналитическом подходе требуемые зависимости выводятся применением математических правил. Однако, мы часто встречаемся с неразрешимостью аналитических уравнений и невозможностью получения окончательного результата в замкнутой форме. В данной статье рассматриваются различные виды моделирования и понятие "цифровой двойник", а также концепции и примеры их реализации. Отмечено, что компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования. Также проводится анализ взаимодействия цифровой модели с объектом моделирования, представляющим реальный процесс. Показано, что взаимодействие происходит через средства сопряжения, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования. Рассмотрена кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций. В качестве примера цифровых двойников, использующих модели временных рядов, рассмотрена модель временного запаздывания в телекоммуникационной сети. В качестве примера цифровых двойников, использующих модели предметной области, рассмотрена система замены аккумуляторных батарей узлов беспроводных сенсорных сетей.

Информация об авторе:

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

Для цитирования:

Лихтциндер Б.Я. Связь и цифровые двойники // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 30-37.

For citation:

Likhttsinder B. Ya. (2023) Communications and digital twins. T-Comm, vol. 17, no.8, pp. 30-37. (in Russian)

Введение

Не секрет, что, производя вычисления по различным формулам мы все чаще обращаемся к обычному калькулятору. Действительно, различные алгебраические действия в калькуляторе хорошо алгоритмизированы и реализованы в виде микропрограмм, что позволяет быстро произвести требуемые вычисления.

Аналитические методы состоят в преобразовании символической информации, записанной на языке математического анализа. При использовании аналитических методов строится математическая модель объекта, например, в виде дифференциальных или интегральных уравнений. При аналитическом подходе требуемые зависимости выводятся применением математических правил. Однако, мы часто встречаемся с неразрешимостью аналитических уравнений и невозможностью получения окончательного результата в замкнутой форме. Несомненно, аналитическая формула более наглядно представляет анализируемый объект или процесс, но для получения конечных цифровых результатов все равно необходимо алгоритмизировать процесс вычисления по ней. Все равно, указанные алгоритмы должны быть программно реализованы.

Развитие современной вычислительной техники позволяет производить алгоритмизацию вычислений на все более ранних стадиях процесса анализа, заменяя аналитические соотношения программно реализуемыми алгоритмическими конструкциями. Многие анализируемые объекты часто бывают настолько сложны, что получение аналитических моделей, адекватно отражающих их поведение, становится не реальным, и для таких объектов создаются программно реализуемые «цифровые двойники» [5]. Концепция «Цифровых двойников» (ЦД) широко развивается и занимает все большее место в производственных процессах. Эта концепция является частью четвертой промышленной революции, которая призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты.

Появилось множество различных противоречивых определений этого понятия. [1, 2, 3, 10-15].

С понятием «цифровой двойник» начинает происходить то же, что произошло с понятием «Интернет вещей», когда словосочетание «Интернет вещей» начинают применять ко многим технологическим телекоммуникационным сетям, в которых отсутствует «Интернет», и к офисным сетям, в которых «вещи» отсутствуют, и непосредственно взаимодействуют между собой не предметы, а операторы. Однако, все определения согласны в одном: «цифровой двойник», это – цифровая модель некоторого объекта или процесса.

Модели в цифровых двойниках

ЦД отображают некоторые *сущности*, которые являются объектами или процессами реального мира. Несмотря на многообразие сущностей (это могут быть отдельные элементы или целые производства) ЦД представляет собою некоторый программный продукт, отображающий определенные свойства указанных сущностей. Такие программные продукты могут быть разделены на *классы*. Класс в программировании является мощным средством, позволяющим структурировать

сложную систему. Класс определяет шаблон, в соответствии с которым строятся отдельные экземпляры класса. Каждый экземпляр данного класса рассматривается как самостоятельный объект. Все экземпляры одного класса имеют одинаковые перечни их свойств, однако, значения одноименных свойств для каждого экземпляра могут быть различны. Каждый экземпляр данного класса рассматривается как самостоятельный *активный объект*.

Каждый активный объект имеет структуру (совокупность включенных в него активных объектов и их связи), а также состояние, определяемые его параметрами. Каждый экземпляр активного объекта имеет свое собственное поведение, он может иметь свои значения параметров и функционирует независимо от других объектов, взаимодействуя с ними и с внешней средой.

При создании ЦД используют объектно-ориентированный подход к представлению сложных систем. Этот подход позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы с помощью иерархии абстракций. Например, на некотором уровне абстракции каждую телекоммуникационную сеть можно считать единым объектом и рассматривать взаимодействие отдельных сетей. Но, более детально сеть можно представить как совокупность взаимодействующих между собой коммутаторов. Каждый из этих коммутаторов может быть представлен, своей структурой взаимодействующих узлов, а каждый из узлов - представлен структурой взаимодействующих элементов. Экземпляры одного класса рассматриваются как одинаковые ЦД, которые могут находиться в различных состояниях. Состояния различных экземпляров описывается значениями его переменных. Взаимосвязь переменных характеризуется различными функциональными зависимостями, а изменение переменных во времени определяются значениями соответствующих таймеров (функции времени).

Любая сложная логика поведения ЦД может быть выражена с помощью комбинации дифференциальных и алгебраических уравнений, переменных, таймеров и программного кода. Алгебраические и дифференциальные уравнения, как и логические выражения, записываются обычно аналитически. Интерпретация любого числа параллельно протекающих процессов в ЦД должна быть скрыта от пользователя. Отслеживание событий во всех процессах, определенных в ЦД, должно выполняться автоматически.

Модельное и реальное время.

Поскольку ЦД представляет собой модель, понятие модельного времени является базовым в системах. Модельное время – это условное логическое время, в единицах которого определено поведение всех объектов ЦД. Модельное время может изменяться либо непрерывно, если поведение объектов описывается дифференциальными уравнениями, либо дискретно, переключаясь от момента наступления одного события к моменту наступления следующего события, если присутствуют только дискретные события. Моменты наступления всех планируемых событий хранятся в так называемом календаре событий, откуда выбирается наиболее раннее событие для выполнения связанных с ним действий.

Ускоренная работа компьютера, по сравнению с реальными процессами, позволяет осуществить прогнозирование и, на основе прогноза, повысить качества управления объектом.

Цифровые двойники в инфокоммуникациях

В отрасли связи ЦД также нашли свое отражение. В [5] указаны направления в эксплуатационной поддержке инфокоммуникационных сетей с использованием ЦД:

Развитию концепции ЦД в связи несомненно будет способствовать представленная на рисунке 1 [5] кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций (КДМ), состоящая из горизонтальных и вертикальных доменов.

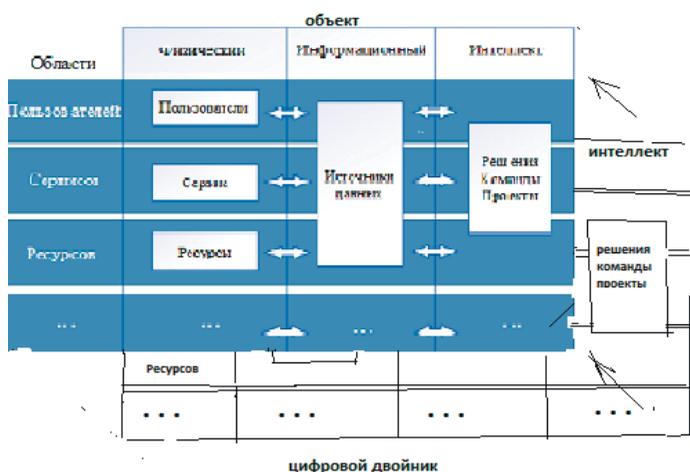


Рис. 1. Кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций (КДМ)

Вертикальный Физический домен (ФД) включает в себя физические «сущности», отражающие работу оператора в реальности: физическую инфраструктуру, услуги, клиентов другие физические объекты. Вертикальный Информационный домен включает информацию о физическом домене, получаемую от различных источников. Интеллектуальный домен включает человеческий фактор.

Именно Информационный домен служит основой при разработке ЦД управления сетью связи. Горизонтальные стрелки отражают интерфейсы связей, с помощью которых происходит обмен между вертикальными доменами. В рассматриваемой КДМ предполагается, что в ЦД отсутствуют домены физический и интеллектуальный, а весь ЦД размещается в информационном домене. С этим трудно согласиться, поскольку ЦД имеет также свое физическое воплощение и свою интеллектуальную (когнитивную) часть (он проектируется и управляется). Возможно, было бы целесообразно размещать ЦД на отдельной параллельной плоскости, содержащей все три домена (физический, информационный и интеллектуальный). В этом случае средства сопряжения между ЦД и объектом отображались бы как связи между указанными плоскостями, как это показано на рисунке 1.

Способы моделирования

Существует два различных способа моделирования [16, 17]:

Первая разновидность отвечает на вопрос: «Что будет, если объект подвергнется данному воздействию (или, в частном случае, воздействия будут отсутствовать)? Такое моделирование называют «прямым» (рис. 2а).



Рис. 2. Способы моделирования

Вторая разновидность отвечает на вопрос: «Какие воздействия необходимо сделать, чтобы объект моделирования пришел в требуемое состояние»? Такое моделирование называют «обратным», и оно требует гораздо больших временных затрат (рис. 2б). И только появление высоко производительных вычислительных средств позволило во многих случаях осуществлять «обратное» моделирование в реальном масштабе времени,

Часто считают одним из требований, предъявляемых к моделям, составляющим цифровые двойники то, что моделируемые процессы должны протекать в модели не медленнее, чем они протекают в реальном масштабе времени. Однако, это не вполне так. Разве цифровой файл, на котором записано изменение некоторого процесса во времени, нельзя считать цифровым двойником этого процесса.

Изменение быстро протекающего процесса может быть воспроизведено и визуализировано в замедленном масштабе времени. Если же, наоборот, моделирование происходит быстрее, чем в реальном масштабе времени, модели могут быть синхронизированы с моделируемым объектом или использованы для получения прогнозирующей информации о состоянии объекта [7-9]. Прогнозирование позволяет компенсировать запаздывания в цепях управления и тем самым, повысить качество регулирования в системах с обратной связью. Оно позволяет повысить скорость реагирования управляющей системы на изменения состояния объекта.

Структура цифровых двойников

ЦД отличаются от обычных моделей наличием связей, аналогичных тем, с помощью которых моделируемый объект общается с внешним миром, и называемых средствами сопряжения. Указанные связи представлены на рисунке 3 (на рис. 1 средства сопряжения показаны стрелками между плоскостями).

Если поведение таких объектов носит непрерывный характер, то информация об объекте, вводимая в модель, должна быть преобразована в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а результаты цифрового моделирования могут быть преобразованы в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Цифровая информация, находящаяся в базах объекта моделирования, обменивается с моделью через цифровые преобразователи (ЦП). В различных случаях отдельные средства сопряжения могут отсутствовать.

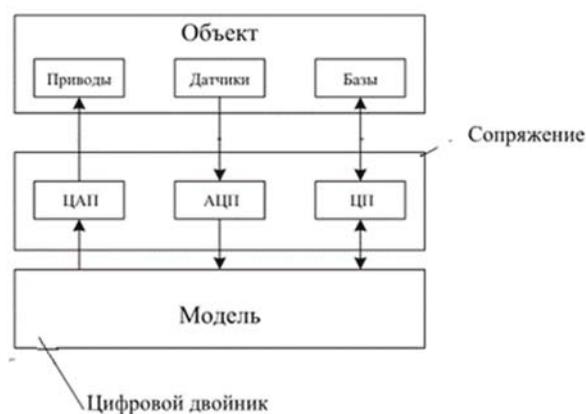


Рис. 3. Структура цифрового двойника

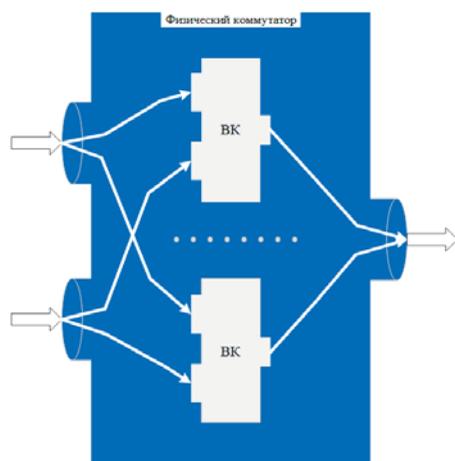


Рис. 4. Виртуальные коммутаторы

Примером цифровых двойников в телекоммуникациях, могут служить «виртуальные коммутаторы» (рис. 4). Реальные физические коммутаторы часто выполняются как объединение в одном устройстве нескольких (порядка сорока) независимых программных моделей, имеющих единую память и общие с физическим коммутатором порты ввода и вывода информации. Все такие виртуальные коммутаторы одинаковые и являются цифровыми двойниками, имеющими общие средства сопряжения.

Аналогично, в качестве цифровых двойников обычных телефонных аналоговых каналов можно считать цифровые «виртуальные каналы».

Модель на основе предметной области

Различают два вида моделей, применяемых при создании ЦД. Это – модели предметной области и модели временных рядов. В качестве примеров ЦД с моделями предметной области, следует отнести рассмотренные выше виртуальные коммутаторы, а также модели, применяемые при осуществлении подзарядки или замены аккумуляторных батарей элементов беспроводных сенсорных сетей (БСС), с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [6]. Рассмотрим алгоритм работы такой системы:

Имеется сеть сенсорных узлов I с перезаряжаемыми аккумуляторными батареями.

Аккумуляторы заменяются путем доставки и замены на стационарной станции сенсорных узлов с помощью дрона D . Требуется определить последовательность замены аккумуляторов с тем, чтобы в процессе замены ни один из аккумуляторов не успевал полностью разрядиться, при этом, время, затраченное дроном в работе (коэффициент загрузки дрона) было бы минимальным.

На центральной базе всегда имеются готовые для замены узлы с заряженными аккумуляторами. На центральную базу поступает по сети информация о степени зарядки аккумуляторов всех сенсорных элементов.

Атрибуты сенсорного устройства:

T – время от начала полного цикла облета и зарядки всех сенсорных элементов дроном D .

N – Число сенсорных устройств.

I – Идентификатор сенсорного устройства.

$Z(I; T)$ – Уровень заряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$\{Z(I; T)\}$ – Массив уровней заряда аккумуляторов устройств I в момент времени T .

$ZMAX(I)$ – Максимальный уровень заряда аккумулятора устройства I .

$ZMIN(I)$ – Минимальный уровень заряда аккумулятора устройства I .

$TR(T; I)$ – время, необходимое для полной разрядки, аккумулятора устройства I , с момента T .

$T(I)$ – Множество остаточных времен работы аккумуляторов в цикле.

$TMIN$ – Остаточное время работы минимально заряженного аккумулятора в течение полного цикла.

$Cort TR(T; I)$ – Кортж значений $TR(T; I)$ – в порядке их возрастания.

$VZ(I; T)$ – Скорость заряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$VR(I; T)$ – Скорость разряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$VRmax(I)$ – Максимальная скорость разряда аккумулятора устройства I .

$X(I, I)$ – Координаты сенсорного устройства I .

$L(I)$ – Расстояния от базы до сенсорного устройства I .

Атрибуты дрона:

D – Идентификатор дрона.

$X(DT), Y(DT)$ – Координаты дрона D в момент времени T .

$L(DIT)$ – Расстояние от дрона D до сенсорного элемента I в момент времени T .

$V(D)$ – Скорость перемещения дрона в направлении сенсорных устройств.

$TC(D)$ – Время цикла полного облета дроном D всех сенсорных устройств.

$TC(D; I)$ – Время цикла подзарядки дроном D сенсорного устройства I .

$T(D; I)$ – Время, необходимое для прилета дрона от станции до сенсорного устройства I .

TO – Время, необходимое для обслуживания сенсорного устройства.

$T(O; I)$ – Время, необходимое для прилета и обслуживания дроном сенсорного устройства I .

Известны координаты $X(I), Y(I)$ – сенсорного устройства I , а также координаты центральной базы XB и YB . Следовательно, известны LI – расстояния от базы до сенсорного устройства I .

$Z(I; 0)$ – Уровень заряда аккумулятора сенсорного устройства I в момент начала цикла, при $T=0$.

Степень заряженности аккумулятора будем характеризовать временем, необходимым для его

Полной разрядки, начиная с момента T .

$$TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}$$

Время, необходимое для прилета дрона от станции до сенсорного устройства I , определяется:

$$T(D; I) = \frac{L(D; I; T)}{VD}$$

Время, необходимое для обслуживания дроном сенсорного устройства $TO(D; I)$.

Время, полного полета дрона и обслуживания сенсорного устройства I .

$$TPO(D; I) = TP(D; I) + TO(D; I).$$

Алгоритм

1. Начало полного цикла $T = 0$.
2. Ввести данные массива $\{Z(I; T)\}$, ввести N . $K=0$.
3. Определить минимальные времена до полной разрядки сенсорных устройств I .
4. $TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}$; $I =: 1 \dots N$
5. Отнести $TR(T; I)$ к множеству $\{TR(T; I)\}$.
6. Выбрать минимальный элемент. $TR(T; I) \min$ множества $\{TR(T; I)\}$ и определить значение I .
7. Выбранный элемент $TR(T; I) \min$ отнести в множество $\{TR(T; I) \min\}$
8. Моделируется время. $TPO(D; I) = TP(D; I) + TO(D; I)$.
9. Определяется время окончания обслуживания $T = T + TPO(D; I)$.
10. Определяется остаточный заряд для каждого сенсорного устройства $J \neq I$, в момент окончания обслуживания текущего сенсорного устройства I
 $Z(J; T) =: Z(J; T) - T(D; I) \cdot VR \max(J)$.
11. Определяется остаточный заряд сенсорного устройства I на момент окончания обслуживания текущего сенсорного устройства I . $Z(I; T) =: Z \max(I)$.
12. Определяется минимальный остаточный заряд для каждого сенсорного устройства I , в момент возвращения на базу дрона после окончания обслуживания текущего сенсорного

устройства I . $Z(I; T) =: Z(I; T) - TP(D; I) \cdot VR \max(I)$. Создается массив $\{Z(I; T)\}$.

13. Определяются $TR(T; I)$ – модельные времена, для полной разрядки, аккумуляторов устройств I ,
14. $TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}$; $I =: 1 \dots N$
15. Отнести $TR(T; I)$ к множеству $\{TR(T; I)\}$.
16. Выбрать минимальный элемент. $TR(T; I) \min$ множества $\{TR(T; I)\}$ и определить значение I .
17. Выбранный элемент $TR(T; I) \min$ отнести в множество $\{TR(T; I) \min\}$
18. $k =: k + 1$,
19. Если $k < N$, перейти к пункту 7.
20. Выбрать и вывести минимальный элемент $TMIN$ множества $\{TR(T; I) \min\}$.
21. Если $TMIN < 0$, вывести «подзарядка не выполнима».
22. Если $TMIN > \Delta T$ перейти к пункту 2.
23. Включить таймер ожидания начала полетов на время $TMIN > 0$.
24. Конец

Элемент $TMIN$ – Остаточное время работы минимально заряженного аккумулятора в течение полного цикла, т.е. допустимое время ожидания очередного вылета, с момента окончания полного цикла моделирования.

Приведенный нами алгоритм подзарядки или замены элементов питания сенсорных узлов БСС с использованием БПЛА позволяет создать ЦД процесса обслуживания БСС и существенно увеличить время работы как элементов БСС, так и сети в целом.

Модель на основе временных рядов

В качестве примера ЦД, на основе временных рядов рассмотрим модель временного запаздывания в телекоммуникационной сети.

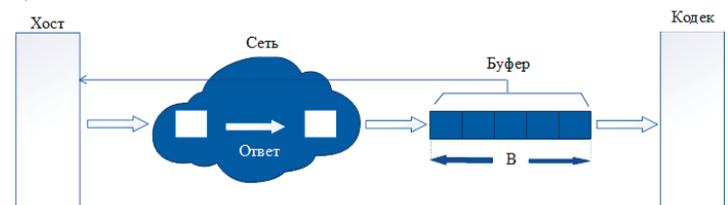


Рис. 5. Система буферизации видеотрафика

Указанная модель применяется для управления системой буферизации в сетях передачи потокового видеотрафика, представленной на рисунке 5 [4]. Информация запрашивается от хоста видеокodeком и передается ему в виде отдельных элементов, между которыми следуют паузы.

В процессе передачи трафика происходят его задержки в сети. Задержки зависят от текущей загрузки различных участков сети, которая непрерывно изменяется во времени. Для уменьшения влияния задержек пакеты трафика буферизируются на приемной стороне.

Из буфера в кодек поступает равномерный поток со скоростью воспроизведения. Размер буфера B контролируется и через определенные промежутки времени, по мере уменьшения числа пакетов в буфере, производятся запросы, которые через сеть поступают к хосту. Хост направляет в качестве ответов очередные порции трафика, которые вновь проходят через сеть и пополняют буфер. Размер буфера стараются поддерживать постоянным. В процессе управления, видеотрафик периодически запрашивается. Качество регулирования размеров буфера может быть повышено, если в системе постоянно учитывать указанные задержки и осуществлять их прогнозирование.

Реализация процесса введения сигнала опережения поясняется на рисунке 6. Для определения задержек трафика в сети в нее периодически поступают тестирующие пакеты от тестера (в качестве тестирующих, могут быть использованы сигналы запроса пакетов). Пакеты, пройдя по сети до сервера и возвратившись обратно, обеспечивают определение круговых задержек сети.

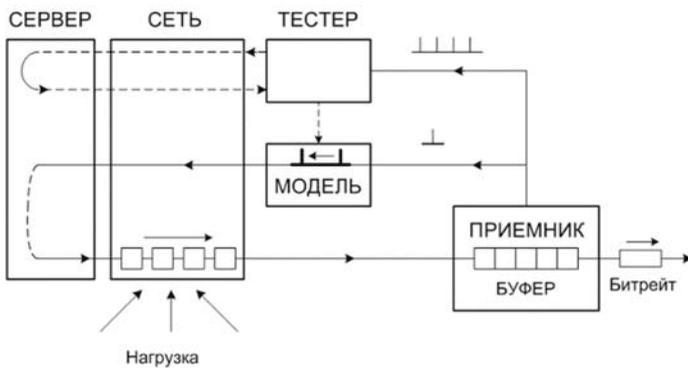


Рис. 6. Введение прогноза в цепь обратной связи

Получаемая информация обрабатывается, и в результате обработки формируется модель процесса запаздывания. На основании полученной модели производится прогнозирование запаздывания на расчетный момент подачи команды запроса очередного блока видеотрафика. Команда запроса подается с опережением, (по отношению к расчетной) на величину спрогнозированного запаздывания.

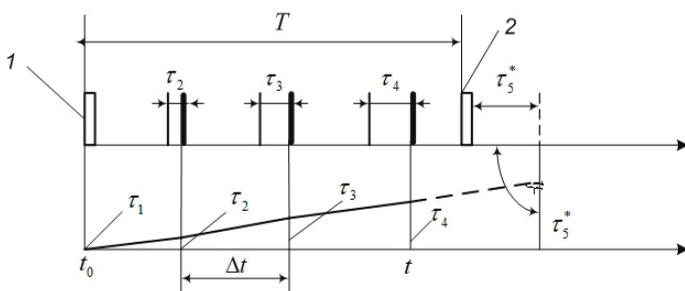


Рис. 7. Прогнозирование задержки τ^*

На рисунке 7. Показан процесс прогнозирования и учета задержки в сети. Команды запроса, поступающие циклично от приемника к передатчику обозначены цифрами 1. Цифрой -2 обозначена команда, поданная в данном цикле с опережением во времени на величину τ_5^* . T -обозначает время цикла,

без учета коррекции. В процессе функционирования приемник циклически посылает тестовые сигналы. Передатчик после получения сигнала, задержанного сетью, посылает приемнику ответный сигнал. Ответный сигнал также задерживается сетью и поступает в приемник. Таким образом, приемник определяет круговые задержки прохождения тестового сигнала по сети.

Значения задержек в моменты опроса обозначены буквами $\tau_1 \dots \tau_5$. В соответствии с указанными задержками, формируется математическая модель, а на основании выбранной модели, производится прогнозирование значения требуемой задержки очередной команды запроса трафика.

На рисунке 7, на основании обработки результатов тестов $\tau_1 \dots \tau_5$ получается прогнозируемое значение времени задержки τ^* . Очередной запрос -1 передается с опережением на время τ^* (обозначен цифрой 2), в результате чего происходит компенсация сетевых задержек и повышается качество процесса регулирования.

Если же требуемое время компенсации задержки τ^* окажется настолько большим, что запрос -2 должен поступить раньше, чем закончатся расчеты, то указанный запрос поступит непосредственно сразу же, после завершения расчетов.

В качестве модели процесса изменения задержек в сети может быть выбраны вейвлеты или разностные интерполяционные формулы, (например, формула Ньютона).

$$\tau^* = \tau_0 + u \Delta^{(1)} \tau_0 + \frac{u(u-1)}{2} \Delta^{(2)} \tau_0 + \dots,$$

где $u = \frac{t - t_0}{\Delta t}$ – число шагов, начиная от t_0 до t , – величина шага во времени, а $\Delta^{(i)} \tau_0$ – разности i -го порядка. Практика показала, что вполне можно ограничиться разностями третьего порядка.

Заключение

Несмотря на различие определений, цифровой двойник представляет собою цифровую модель некоторого объекта. Однако для того, чтобы считаться цифровым двойником, модель должна быть снабжена средствами сопряжения с объектом и должна иметь возможность постоянного обмена информацией с объектом. Для получения возможности прогнозирования моделируемого процесса, модель ЦД должна иметь достаточное быстродействие, обеспечивающее моделирование в реальном масштабе времени. Весьма полезной для понимания, следует считать Кросс-доменную модель управления функциями телекоммуникаций. Однако, ЦД имеет также свое физическое воплощение и свою интеллектуальную (когнитивную) часть (он проектируется и управляется). Возможно, было бы целесообразно размещать ЦД на отдельной параллельной плоскости, содержащей все три домена (физический, информационный и интеллектуальный). В этом случае, средства сопряжения между ЦД и объектом отображались бы как связи между указанными плоскостями. Приведенные примеры свидетельствуют о возможности широкого использования концепции ЦД в сфере телекоммуникаций.

Литература

1. Potcharov A. S., Saklakov V. M. Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. eLibrary.ru (2018). Article in the collection of works of the All-Russian scientific and practical conference.

2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)

3. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>

4. Лихтциндер Б. Я. Патент №2746716. Способ управления буферной памятью потокового видео. 01.12.2022.

5. Гольдштейн А. Б., Кисляков С. В. Цифровой двойник для управления сетью связи // Вестник связи. 2021. №7. С. 27-32.

6. Лихтциндер Б. Я., Маслов О. Н. Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети. Патент 2730468 от 24.08.2020.

7. Тиханьчев О. В. Прогнозирование при управлении динамическими системами // Программные продукты и системы. Т.30. №17. 2017. С. 40-44.

8. Тиханьчев О. В., Саятин О. В. Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. 2015. № 4. С. 3-7.

9. Новиков Д. А., Чхартушвили А.Г. Активный прогноз. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. 101 с

10. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровой_двойник.

11. Гончаров А. С., Саклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. 2018.

12. Jack Reid and Donna Rhodes. Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs // Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.

13. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.

14. Jack Reid and Donna Rhodes. Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs // Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.

15. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.

16. Боев В. Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.

17. Коровин А. М. Моделирование систем: учебное пособие к лабораторным работам. Челябинск: Издательский центр Юргу, 2010. 47 с.

COMMUNICATIONS AND DIGITAL TWINS

Boris Ya. Likhtsinder, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, lixt@psuti.ru

Abstract

This article discusses various types of modeling and the concept of "digital twin", as well as concepts and examples of their implementation. It is noted that computer modeling allows not only to obtain a forecast, but also to determine which control actions on the system will lead to a favorable development of events between the components of the model, which are a reflection of real relationships. Modern production processes are very complex and distributed in space and time. Therefore, models of such processes should take into account the distributed nature of the modeling objects. An analysis of the interaction of the digital model with the simulation object representing the real process is also carried out. It is shown that the interaction occurs through interfaces that provide interface between the model and the simulation object. A cross-domain model for managing telecommunications functions is considered. As an example of digital twins using time series models, a model of time delay in a telecommunications network is considered. This model is used to control the buffering system in networks for the transmission of streaming video traffic.

Keywords: digital twin, digital simulation, computer simulation, digital model, simulation environment, simulated network, control system, forecasting

References

1. A.S. Potcharov, V.M. Saklakov (2018). Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. eLibrary.ru. All-Russian scientific and practical conference.

2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)

3. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>

4. B.Ya. Lichtzinder. Patent No. 2746716. A method for managing the buffer memory of streaming video. 01.12.2022

5. A.B. Goldshtein, S.V. Kislyakov (2021). Digital twin for communication network management. *Communication Bulletin*, no. 7, pp. 27-32.

6. B.Ya. Likhtzinder, O.N. Maslov. A method for recharging batteries in a wireless sensor network. Patent 2730468 dated 08/24/2020.

7. O.V. Tikhanychev (2017). Forecasting in the management of dynamic systems. *Software products and systems*, vol. 30, no. 17, p. 40-44.

8. O.V. Tikhanychev, O.V. Sayapin (2015). Operational forecasting of the development of the situation as the basis for successful management of the use of troops (forces). *Military Thought*, no. 4, pp. 3–7.
9. D.A. Novikov, A.G. Chkhartishvili (2002). *Active forecast*. Moscow: Publishing house IPU RAS, 101 p.
10. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Digital twin](https://ru.wikipedia.org/wiki/Digital_twin).
11. A.S. Goncharov, V.M. Saklakov (2018). Digital twin: review of existing solutions and prospects for technology development. *library.ru. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*.
12. Jack Reid and Donna Rhodes (2016). Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, *Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology*.
13. M. Grieves (2016). Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
14. Jack Reid and Donna Rhodes (2016). Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, *Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology*.
15. M. Grieves (2016). Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
16. V. D. Boev (2014). *Computer modeling: A manual for practical classes, coursework and diploma design in AnyLogic7*. St. Petersburg: VAS, 432 p.
17. A.M. Korovin (2010). *Modeling of systems: textbook for laboratory work*. Chelyabinsk: Yurgu Publishing Center, 47 p.

Information about author:

Boris Ya. Likhttsinder, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Povolzhskiy State University of Telecommunication and informatics, Samara, Russia

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ РЕЕСТР ИСТОРИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙН- ПЛАТФОРМЫ HYPERLEDGER FABRIC

Беззатеев Сергей Валентинович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, bsv@aanet.ru

Елина Татьяна Николаевна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, elinatn@yandex.ru

Ходырев Егор Сергеевич,
Центральный Банк Российской Федерации, г. Санкт-
Петербург, Россия, khodyrev.es@gmail.com

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-38-44

Manuscript received 10 June 2023;
Accepted 14 July 2023

Ключевые слова: технология блокчейн, смарт
контракты, эксплуатация транспортных средств,
распределенный реестр данных, телекоммуникационные
технологии

В связи с быстрым развитием различных транспортных платформ, в том числе использующих беспилотные технологии, системы, обеспечивающие хранение истории эксплуатации транспортного средства на протяжении всего его жизненного цикла приобретают все большую актуальность. Определены назначение и функционал разрабатываемой системы хранения такой информации. Основная задача системы заключается в поддержании единого источника достоверных и неизменяемых сведений об истории эксплуатации транспортного средства. Такая система способна повысить уровень прозрачности бизнес-процессов, которые возникают между участниками автомобильной индустрии: производителями и владельцами транспортных средств, автосервисами, страховыми компаниями и другими участниками индустрии. Использованы технология блокчейна, смарт-контрактов, различные способы обработки транзакций. Результаты: система спроектирована на базе распределенной платформы, в качестве которой, на основании определенных в работе критериев, была выбрана Hyperledger Fabric. Коммуникационная сеть и архитектура информационной системы были спроектированы и разработаны на базе технологии распределенного реестра. В работе описан процесс создания сети Hyperledger Fabric, которая поддерживается организациями-участниками автомобильной индустрии. Представлено описание базовых элементов системы, а также механизмов, осуществляющих поддержание и согласованность распределенного реестра, обработку транзакций, исполнение смарт-контрактов и взаимодействие подключенных участников системы. Спроектировано аппаратное обеспечение в виде подключаемого блока, который реализует функции сбора и предварительной подготовки данных, собранных с узлов, агрегатов, датчиков ТС, а также дополнительных датчиков, встроенных в аппаратный блок. Собранные данные передаются из блока в хранилища, поддержание которых осуществляется заинтересованными в таких данных участниками системы. Факт передачи данных и идентификатор источника данных фиксируется в распределенном реестре в виде транзакции, помещенной в блок. На основе технологии смарт-контракта рассмотрены вопросы формирования отчетов по истории эксплуатации транспортного средства. Система является масштабируемой и позволяет разворачивать новые смарт-контракты, что предоставляет возможность создавать новые сценарии её использования. Рассмотрены возможные варианты дальнейшего развития и использования системы: предложено решение масштабирования системы по локальным зонам и представлен краткий обзор подхода динамического определения каналов Hyperledger Fabric при использовании выделенной связи передачи данных ближнего действия.

Информация об авторах:

Беззатеев Сергей Валентинович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Елина Татьяна Николаевна, к.э.н., доцент, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Ходырев Егор Сергеевич, специалист по защите информации, ведущий инженер Центрального Банка Российской Федерации, Россия

Для цитирования:

Беззатеев С.В., Елина Т.Н., Ходырев Е.С. Распределенный реестр истории эксплуатации транспортного средства на основе блокчейн-платформы Hyperledger Fabric // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 38-44.

For citation:

Bezzateev S.V., Yelina T.N., Khodyrev E.S. Distributed registry of vehicle operating history based on the blockchain platform Hyperledger Fabric. T-Comm, vol. 17, no.8, pp. 38-44. (in Russian)

В автомобильной индустрии широко развита проблема отсутствия доверия между её участниками. Причинами такой проблемы являются: во-первых, асимметричность информации [1], вызванная тем, что продавец (владелец или автодилер) транспортного средства (далее – ТС) обладает заведомо большей информацией о ТС, чем покупатель; во-вторых, мошенничество с ТС (продажа автомобилей-двойников, ТС признанных неподлежащими восстановлению, находящихся в угоне или в залоге, скручивание пробега и т.д.). Указанная проблема влияет не только на взаимоотношения продавца и покупателя, она также негативно действует на экономику [2] и на безопасность дорожного движения [3].

Развитие автомобильной индустрии привело к тому, что ТС становятся генераторами больших объемов информации. Аналитики в данной сфере прогнозируют, что в скором будущем автомобиль станет формировать более четырех гигабайтов данных каждый день [4]. Учитывая тот факт, что программное обеспечение ТС уже сегодня осуществляет управление важными узлами, вплоть до управления тормозной системой, необходимо обеспечить надежное, неизменное и безопасное хранение наиболее важной для автомобильной сферы информации.

В настоящее время не существует единой базы данных, в которой бы хранились сведения об использовании ТС на протяжении всего жизненного цикла ТС. Достаточно популярны коммерческие сервисы предоставляющие отчеты, но информация в эти сервисы поступает несистематично и не всегда источник информации можно однозначно идентифицировать. Сведения о конкретном ТС, полученные из разных сервисов, очень часто не совпадают.

Предлагаемое в данной работе решение основано на технологии распределенного реестра (далее – РР), копии которого хранятся у каждого участника, подключенного к сети. РР основан на технологии блокчейн и представляет собой базу данных, структура которой состоит из цепочки связанных блоков, содержащих информацию в виде транзакций (операций сохранения данных в блокчейне) [5]. РР синхронизируется с помощью протокола консенсуса, благодаря которому участники приходят к общему соглашению в отношении добавляемой информации.

Выбор блокчейн-платформы

Существует большое множество блокчейн-платформ, каждая из которых обладает своей спецификой [6]: используемый протокол консенсуса, доступ к сети, скорость обработки транзакций, масштабируемость и др. Чтобы определиться с выбором платформы, наиболее подходящей под задачи создания РР истории эксплуатации ТС (далее – РРИЭТС), был сформирован набор наиболее значимых критериев платформы и проведена оценка основных претендентов (табл. 1). Среди платформ рассматривались только те, доступ к сети которых является приватным, так как сведения, которые предполагается хранить в РР, могут относиться к различным категориям информации ограниченного доступа. Решающим фактором при выборе блокчейн-платформы выступила возможность использования платформы для учета сведений о материальных активах и их изменениях.

Результаты анализа корпоративных блокчейн-платформ

Критерий	Corda	Quorum	Hyperledger Fabric
Вендор, осуществлявший поддержку	R3 Company	Ethereum developers	Linux Foundation
Использование	Управление юридическими контрактами между организациями	Финансовая сфера	На предприятиях для организации бизнес-процессов
Контроль доступа	Управление доступом к транзакциям с использованием возможностей СУБД	Управление пользовательским доступом на основе атрибутов и ролей с помощью смарт-контрактов	Управление доступом на уровне подключения организаций к каналу сети, а также пользовательским доступом на основе атрибутов и ролей с помощью смарт-контрактов
Протокол консенсуса	Подключаемый: Solo Raft	Подключаемый: PBFT Raft	Подключаемый: Solo Raft Kafka
Конфиденциальные сделки	Все транзакции строго конфиденциальны, однако нотариальный сервис уполномочен просматривать транзакции	Через публичную транзакцию с хэш значением от конфиденциальных данных	Через публичную транзакцию с хэш значением от конфиденциальных данных
Язык программирования для смарт-контрактов	Java, Kotlin	Solidity	Golang, Java, NodeJS
Механизм выполнения смарт-контракта	Виртуальная машина Java	Виртуальная машина Ethereum	Docker контейнер
Жизненный цикл смарт-контракта	Для развертывания выполняются административные операции на узле. Хранится вне реестра	Легко развернуть. Невозможно изменить. Хранится в реестре	Довольно сложный процесс разворачивания и изменения. Хранится вне реестра, в реестре находится только его определение.
Активы обрабатываемые в реестре	Цифровые активы	Токены и цифровые активы	Материальные и цифровые активы
Политика одобрения транзакций участниками сети	Есть	Нет	Нет

Как итог, было принято решение использовать платформу Hyperledger Fabric, так как она лучше всего подходит для решения задачи, определенной в данной работе. Hyperledger fabric позволяет создавать свои собственные активы (в том числе и материальные) и изменять их текущее состояние с помощью смарт-контракта. Платформа Hyperledger fabric учитывает особенности экономической сферы и обладает механизмами, которые поддерживают конкуренцию, предоставляя возможность проведения конфиденциальных операций

между организациями-участниками сети посредством выделения отдельных каналов и использования скрытого обмена данными. По завершении такого обмена в транзакцию помещается только хэш от передаваемых данных, а сами данные передаются между сторонами по выделенным, зашифрованным каналам.

Назначение и функции системы

Предполагается реализация следующих функций системы РРИЭТС:

1. Объединение участников автомобильной индустрии, заинтересованных в хранении и обмене данными о ТС.
2. Систематичная запись данных с различных верифицированных источников.
3. Хранение данных о транспортном средстве в доступной для пользователей форме.
4. Согласование и синхронизация данных в РР с помощью протокола децентрализованного консенсуса Raft.
5. Контроль доступа: предоставление доступа к данным только разрешенным и идентифицированным, с помощью децентрализованного механизма, пользователям.
6. Предоставление достоверной информации о ТС конечному пользователю в любой момент времени.
7. Поддержка расширения функционала системы за счет предоставления возможности размещения в ней смарт-контрактов.
8. Взаимодействие конечного пользователя с системой РРИЭТС через пользовательский интерфейс.

Конфигурация системы РРИЭТС

Сетевая архитектура РРИЭТС включает в себя консорциум из пяти типовых организаций, каждая из которых может рассматриваться как объединение участников, которые имеют отношение к конкретному типу организации и являются субъектами, использующими систему. Типовыми организациями являются: производитель ТС, автодилер, автосервис, страховая компания и орган Госавтоинспекции.

Каждая организация имеет свой собственный одноранговый узел (рис. 1), который должен быть подключен к каналу, в рамках которого осуществляется взаимодействие между участниками. Сеть обслуживается пятью узлами заказа (далее - УЗ), которые формируют службу заказа и осуществляют обработку транзакций и создание новых блоков, а также распространение блоков по сети. УЗ согласуют свою деятельность с помощью протокола Raft [7]. Raft – это протокол, который используется в Hyperledger Fabric для достижения консенсуса в службе заказов. Raft использует модель «лидер и ведомый», в которой лидер динамически избирается среди узлов заказа в канале, а затем реплицирует полученные сообщения на узлы-последователи [8].

В создании сети на основе Hyperledger Fabric можно выделить три этапа. На первом этапе определяется консорциум участников, которые поддерживают сеть. Участникам выдается корневой сертификат, на основе которого они генерируют сертификаты для своих узлов. Генерируются блок, содержащий базовые настройки сети, и конфигурационная транзакция, содержащая настройки выделяемого канала.

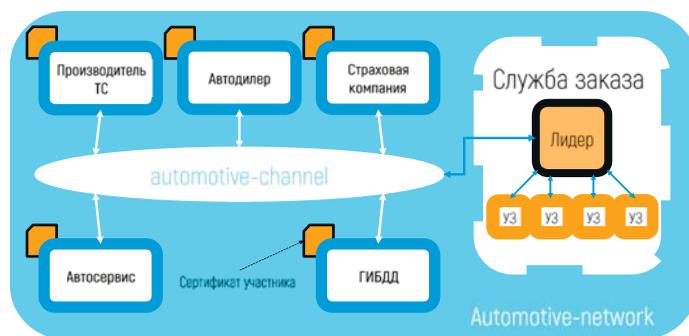


Рис. 1. Топология информационной системы

На втором этапе производится настройка конфигурации и запуск docker-контейнеров, которые имитируют работу реальных одноранговых узлов и моделируют распределенную структуру реальной сети. На третьем этапе создается канал, к которому участники присоединяют свои узлы и определяют якорные узлы. Якорные узлы позволяют одноранговым узлам разных участников иметь представление друг о друге.

Процесс обработки транзакций в информационной системе представлен на рисунке 2. Существует два вида запросов, поступающих от конечных пользователей: запросы на чтение и запросы на обновление данных в РР. Запросы пользователей формируются в приложениях, определенных в сети.

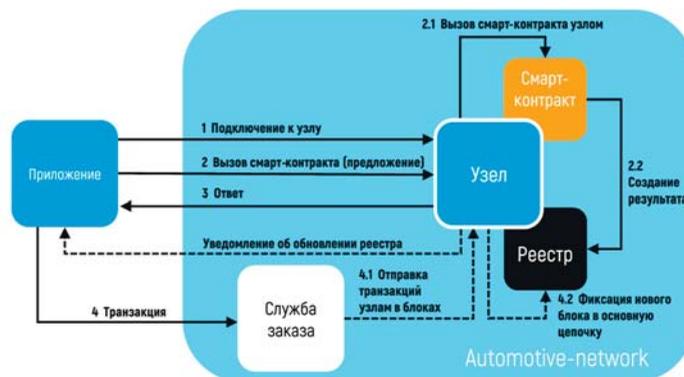


Рис. 2. Механизм обработки транзакций

Приложения представляют собой инструмент для создания безопасных, прозрачных и эффективных решений для бизнес-среды. Приложение подключается к одноранговому узлу и отправляет ему предложение транзакции для вызова смарт-контракта. После этого приложение получает результат выполнения предложения транзакции и на этом процесс для запросов чтения информации из распределенного реестра завершается.

При запросе на обновление реестра приложение собирает в транзакцию ответы от одноранговых узлов, определенных в политике одобрения смарт-контракта, и отправляет сформированную транзакцию в службу заказа, где она заключается в блок, который отправляется на одноранговые узлы сети и фиксируется в основную цепочку. После этого генерируется уведомление для приложения о завершении обновления реестра [9].

Аппаратное обеспечение распределенного реестра

Сбор информации и телеметрии для РРИЭТС должны выполнять технические средства. Требования к проектируемому для этих целей аппаратному блоку приведены ниже:

1. Аппаратный блок (далее – АБ) должен представлять собой легко встраиваемое решение, он должен иметь минимальное количество точек взаимодействия с ТС.

2. В состав АБ должны входить датчики угловой скорости, линейного ускорения, курса ТС, а также индивидуальные датчики оценки состояния различных узлов ТС.

3. Точность датчиков должна обеспечивать возможность оценки дорожного покрытия, по которому передвигается ТС.

4. Система должна отслеживать местонахождение ТС и, при осуществлении некоторых сценариев использования системы, передавать такие сведения в РРИЭТС, например, в случае ограниченной зоны перемещения ТС.

5. АБ должен обеспечивать захват и автономный анализ поведения водителя: по какому маршруту и в какое время водитель осуществлял управление ТС, расстояние и время движения ТС, средняя скорость движения на маршруте и на определенных участках маршрута, с какими ускорениями.

6. Возможность реагирования на заданные сценарии инцидентов и отправка соответствующего сигнала в РРИЭТС. В РР должна выгружаться определенная временная выборка данных о транспортном средстве только в случае наступления инцидента.

7. Передача данных о техническом состоянии узлов ТС в РРИЭТС с определенной периодичностью.

8. Обеспечение связи АБ, с РРИЭТС при помощи модуля связи и, в случае временного отсутствия связи, обеспечение временного хранения данных в встроенной памяти АБ.

9. АБ должен иметь центральный процессор, с достаточной частотой дискретизации, обеспечивающей считывание данных датчиков на большой частоте, их интегрирование, оперативное переключение диапазонов измерения, и сравнения с пороговыми значениями инцидентов.

10. Для обеспечения гарантии достоверности источника в прошивке АБ необходимо предусмотреть контроль серийных номеров встроенных датчиков, а также идентификаторов бортовой системы ТС.

11. В АБ должны быть реализованы инструменты самодиагностики, а сам АБ помещается в герметичный и ударопрочный корпус и печатывается.

12. Питание АБ осуществляется от бортовой системы ТС.

В качестве платформы реализации АБ использовался 32 битный микроконтроллер на архитектуре ARM, производства STM. Экосистема STM32 включает в себя большой выбор библиотек и средств разработки, наиболее подходящими из них оказались библиотека HAL, среда вывода инициализирующего кода CubeMX и среда разработки Keil uVision.

Составными компонентами АБ являются следующие узлы:

- датчик угловой скорости ВГ 1703
- датчик ускорений MPU-6050
- датчик измерения углового положения относительно вектора гравитации CXHTA02-T
- GPS модуль ZED-F9P, с отладочной платой SparkFun
- датчик измерения температуры HRTS-5760-B-U-1-12
- плата сотового модема BG96

Для организации информационного обмена был выбран протокол I2C. Самодиагностика блока проводится каждый час, в случае если проверка узла не пройдена три раза, информация об этом передается в РРИЭТС. Модель аппаратного блока приведена на рисунке 3.

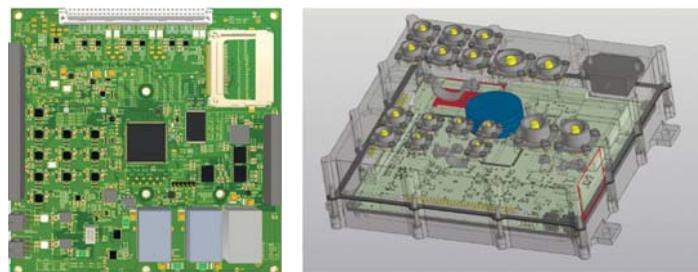


Рис. 3. Модель аппаратного блока

Собранные данные о вибрациях ТС используются для оценки дорожного покрытия, и обозначения «нежелательных» участков маршрута. Задача решается с помощью оценки качества дорожного покрытия при помощи датчиков измерения вибраций во время езды, с привязкой данных к конкретной точке на карте. Для решения данной задачи, происходит работа с двумя потоками данных. Первый – набор измерений в реальном времени с акселерометра в трех направлениях. Второй – местонахождение ТС на карте. Работа узла определения качества дорожного покрытия разбита на следующие этапы:

1. Опрос датчиков.

а. Запрос и получение данных с трех осевого датчика ускорений.

б. Запрос и получения данных с модуля GPS

2. Обработка полученных данных.

а. Применение пороговых фильтров, для первичной оценки полученных данных.

б. Сравнение данных с записанными пороговыми значениями.

с. В случае превышения порога, оценка и сохранение данных об участке маршрута для дальнейшего анализа и внесения корректировок в будущие маршруты.

3. Игнорирование и получение новых данных, в случае несовпадения с заданными пороговыми значениями. Сохранение собранных данных об участке маршрута, в случае превышения пороговых значений. Для этого в блоке предусмотрены скоростной фильтр, фильтр высоких частот и классификатор, использующий алгоритм Z-THRESH.

Формирование отчёта о ТС с применением технологии смарт-контрактов

Взаимодействие между различными видами субъектов РРИЭТС реализуется благодаря технологии смарт-контрактов, которые в Hyperledger Fabric представляют собой код, написанный на языке программирования и исполняются при достижении определенных в коде контракта условий.

Использование смарт-контрактов в РРИЭТС позволяет автоматизировать процессы и управление соглашениями между участниками сети, а также упрощает и повышает прозрачность и защищенность бизнес-процессов, таких как: продажа

и покупка ТС, выполнение технического осмотра и ремонт ТС, страхование ТС и др.

Функционал смарт-контракта реализован в рамках решения Hyperledger Fabric с использованием языка программирования Golang и СУБД CouchDB. Концепция реализации смарт-контракта в РРИЭТС приведена на рисунке 4.

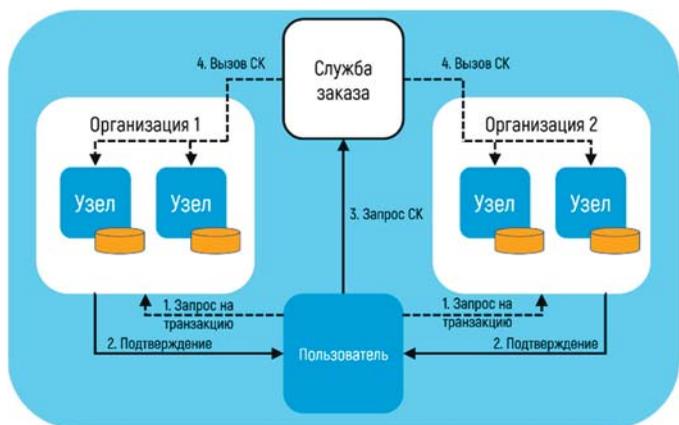


Рис. 4. Реализация смарт-контракта

На рисунке 5 приведен результат вызова смарт-контракта и структура данных таблицы сведений о транспортной средстве.

```
chaincodeInvokeInit() {
    setGlobalsForPeer0Org1
    peer chaincode invoke -o localhost:7050 \
        --ordererTLSHostnameOverride orderer.example.com \
        --tls SCORE_PEER_TLS_ENABLED --cafile $ORDERER_CA \
        -C $CHANNEL_NAME -n ${CC_NAME} \
        --peerAddresses localhost:7051 --tlsRootCertFiles $PEER0_ORG1_CA \
        --peerAddresses localhost:9051 --tlsRootCertFiles $PEER0_ORG2_CA \
        --isInit -c '{"Args":[]}'
}

func (s *SmartContract) InitLedger(APIStub shim.ChaincodeStubInterface) sc.Response {
    cars := []Car{
        Car{
            VIN: "1HGBH41JXMN109186",
            Model: "Prius",
            Reg-Num: "121a",
            Typ: "light",
            Year: "1993",
            Eng-Mod: "4124 S312",
            Col: "black",
            Man: "BMW AG",
            Own: "L.F. JERO",
            TPAS: "77 HE 033241",
        }
    }

    i := 0
    for i < len(cars) {
        carAsBytes, _ := json.Marshal(cars[i])
        APIStub.PutState("CAR"+strconv.Itoa(i), carAsBytes)
        i = i + 1
    }

    return shim.Success(nil)
}
```

Рис. 5. Вызов смарт-контракта

Развитие системы

Имеется множество нерешенных задач, в числе которых проблема передачи, агрегации и хранения данных, балансировка нагрузки сервисов, осуществляющих обработку данных и многие другие. В топологии сети РРИЭТС должна быть заложена возможность масштабирования, т.к. она должна оставаться работоспособной и доступной, учитывая большой рост объема данных, числа производителей и потребителей таких данных. В качестве основы модели сети РРИЭТС предлагается рассмотреть топологию, предложенную в работе [10]. Такая топология сети позволит РРИЭТС обрабатывать

данные в определенных локальных зонах: на уровне районов, областей, регионов, а также стран, в целях разгрузки каналов передачи данных по распределенной сети, между узлами различных уровней. Архитектура Hyperledger Fabric позволяет это сделать путем создания каналов для взаимодействия участников на различных уровнях локальных зон (район, область и т.д.).

РРИЭТС может стать единым источником достоверной информации о ТС для всех участников автомобильной индустрии. Именно достоверность сведений о ТС становится наиболее важным фактором, в особенности, когда речь заходит о безопасности дорожного движения. Развитие технологий, таких как: беспилотные автомобили, Vehicle-to-infrastructure (V2I), Vehicle-to-everything (V2X), электронный ассистент водителя и др., порождает множество различных сценариев эксплуатации ТС.

Возникает множество вопросов, например, насколько безопасна будет вычисленная траектория движения ТС, если при её расчете были использованы сведения, сильно отличающиеся от действительных показателей? Сможет ли ТС успешно совершить самостоятельно или с привлечением водителя экстренный маневр для избежания аварийной ситуации, если сведения об узлах были несанкционированно изменены в ТС недобросовестным автовладельцем с целью сэкономить на замене расходных материалов или бывшим владельцем ТС для сокрытия реальных сведений об износе ТС при продаже (скручивание пробега [11]). Поэтому создание источника достоверной информации о ТС – это весьма актуальная задача на сегодняшний день.

В автомобильной индустрии прорабатывается большое количество инициатив в направлении обмена данными ТС друг с другом и с окружающей инфраструктурой, в том числе предлагается переход от использования мобильной сети к специально выделенной связи ближнего действия Dedicated Short-Range Communications (DSRC) [12]. Но здесь возникает задача динамического определения канала, в рамках которого должны обрабатываться транзакции, так как количество узлов, подключенных к каналу, должно быть достаточным для поддержания РР.

Задача усложняется тем, что повышается требование к мобильности системы: транзакция должна быть выполнена и помещена в блок до того, как ТС покинет сеть. Для определения канала в динамическом режиме в работе [13] предлагается использовать подход, в основе которого лежит машинное обучение с подкреплением. Предложенный в работе алгоритм, по результатам работы, показал устойчивость и пропускную способность близкие к оптимальным. Можно сделать вывод о том, что дальнейшее развитие системы, построенной на платформе Hyperledger Fabric, позволит обеспечить управление взаимодействием ТС с другими ТС и инфраструктурой даже во время движения.

Заключение

В работе представлено описание архитектуры спроектированной системы РРИЭТС на базе блокчейн-платформы Hyperledger Fabric.

С помощью средств контейнеризации были созданы узлы, моделирующие распределенную сеть, поддерживаемую консорциумом из пяти организаций. Развернут смарт-контракт,

регулирующий запись данных о ТС и обеспечивающий контроль доступа к этим данным. Разработано аппаратное обеспечение для реализации функций сбора информации и телеметрии для РРИЭТС.

Предложенные решения помогут сделать более удобными, надежными и прозрачными отношения в сфере эксплуатации транспортных средств, решают задачи обеспечения информационной безопасности процессов сопровождения сделок с ними, а также повышают достоверность и полноту отчетов.

Литература

1. *Akerlof George*. The Market for Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism // *The Quarterly Journal of Economics*, v. 84, 1970.
2. *Комбаров М.А.* Проявления рынка «лимонов» в современной России и способы борьбы с ним // *Human Progress*. 2020. Том 6, Вып. 3. С. 5. URL: http://progresshuman.com/images/2020/Том6_3/Комбаров.pdf, свободный. DOI 10.34709/IM.163.5
3. *Бараковский В.В.* О проблеме аварийности по причине эксплуатации транспортных средств с техническими неисправностями и некоторых путях ее решения // *Современная наука*, 2021, №3. С. 25-30.
4. *Singh Madhusudan, Kim Shiho*. Blockchain Based Intelligent Vehicle Data Sharing Framework. 2017.
5. *Ходырев Е.С., Елина Т.Н.* Распределенный реестр истории эксплуатации транспортного средства // *Завалишенские чтения: молодежная секция: сб. докл. СПб, ГУАП 2020*.
6. *Tasca Paolo, Tessone Claudio*. A Taxonomy of Blockchain Technologies: Principles of Identification and Classification. *Ledger*. 4. 10.5195/ledger.2019.140.
7. *Hands-on blockchain with Hyperledger: Building decentralized applications with Hyperledger Fabric and Composer / Nitin Gaur Luc Desrosiers Venkatraman Ramakrishna Petr Novotny Dr. Salman A. Baset Anthony O'Dowd*. 2018.
8. *Ongaro D., And Ousterhout J.* In search of an understandable consensus algorithm (extended version). Stanford University.
9. Веб-сайт проекта Hyperledger Fabric [Электронный ресурс], Проект Hyperledger. URL: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/>, 2023
10. *Ходырев Е.С., Елина Т.Н.* Концептуальная модель распределенной платформы данных для автомобильной индустрии // *Завалишенские чтения: молодежная секция: сб. докл. СПб, ГУАП 2020*.
11. *Chanson Mathieu, Bogner Andreas, Wortmann Felix, Fleisch Elgar*. Blockchain as a privacy enabler: an odometer fraud prevention system. 13-16. 10.1145/3123024.3123078. 2017.
12. *Khattak Asad, Harris Austin, Sartipi Mina, Mahdina Iman, Moradloo Nastaran, SafariTaherkhani Mohammad*. Connected and Automated Vehicles Investment and Smart Infrastructure in Tennessee Part 3: Infrastructure and Vehicular communications: From Dedicated Short-Range Communications to Cellular Vehicle-to-Everything. 2023.
13. *Kim Seungmo, Ibrahim Ahmed*. Byzantine-Fault-Tolerant Consensus via Reinforcement Learning for Permissioned Blockchain Implemented in a V2X Network. 2020.

DISTRIBUTED REGISTRY OF VEHICLE OPERATING HISTORY BASED ON THE BLOCKCHAIN PLATFORM HYPERLEDGER FABRIC

Sergey V. Bezzateev, Petersburg University of Aerospace Instrumentations, Saint Petersburg, Russia, bsv@aanet.ru

Tatyana N. Yelina, Petersburg University of Aerospace Instrumentations, Saint-Petersburg, Russia, elinatn@yandex.ru

Egor S. Khodyrev, Saint-Petersburg, Russia, khodyrev.es@gmail.com

Abstract

Due to the rapid development of various transport platforms, including those using unmanned technologies, systems that provide storage of vehicle operating history throughout its lifecycle are becoming increasingly relevant. Purpose: the purpose and functionality of the developed system for storing such information are defined. The main purpose of the system is to maintain a single source of reliable and unchangeable information about the operating history of the vehicle. Such a system can increase the transparency of business processes that arise between participants in the automotive industry: manufacturers and owners of vehicles, service stations, insurance companies and other industry participants. Methods: Blockchain technology, smart contracts and various methods of transaction processing were used. Results: the system was designed based on a distributed platform, based on the criteria defined in the work, Hyperledger Fabric was chosen as the platform. Communication network and information system architecture were designed and developed based on the distributed registry technology. The paper describes the process of creating the Hyperledger Fabric network, which is supported by the member organizations of the automotive industry. A description of the basic elements of the system is presented, as well as the mechanisms that maintain and harmonize the distributed registry, transaction processing, execution of smart contracts and interaction of the connected system participants. The hardware was designed in the form of a plug-in unit, which implements the functions of collection and pre-preparation of data collected from the nodes, units, sensors of the vehicle, as well as additional sensors built into the hardware unit. The collected data are transmitted from the block to the storages, the maintenance of which is carried

out by the system participants interested in such data. The fact of data transfer and data source identifier is recorded in a distributed registry in the form of a transaction, placed in the block. Practical relevance: On the basis of smart contract technology the issues of forming reports on the history of vehicle operation are considered. The system is scalable and allows the deployment of new smart contracts, which provides the ability to create new scenarios for its use. Discussion Possible variants of further development and use of the system are considered: the solution of scaling the system by local zones is proposed, and a brief overview of the approach of dynamic channel definition Hyperledger Fabric using dedicated near-field data communication is presented.

Keywords: *blockchain technology, smart contracts, vehicle operation, distributed data registry, telecommunications technology.*

References

1. George Akerlof (1970). The Market For Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 84.
2. M.A. Kombarov (2020). Manifestations of the Market for Lemons in Modern Russia and Ways to Combat It. *Human Progress*. Vol. 6, Issue. 3. C. 5. URL: http://progresshuman.com/images/2020/Tom6_3/Kombarov.pdf, free. DOI 10.34709/IM.163.5
3. V.V. Barakovskiy (2021). On the problem of accident rate due to the operation of vehicles with technical defects and some ways to solve it. *Modern science*. no. 3, pp. 25-30.
4. MadhusudanSingh, Shiho Kim (2017). Blockchain Based Intelligent Vehicle Data Sharing Framework.
5. E.S. Khodyrev, T.N. Yelina (2020). Distributed registry of vehicle operation history. *Zavalishenskie readings: youth section: collection of papers SPB, GUAP 2020*.
6. Tasca Paolo, Tessone Claudio (2019). A Taxonomy of Blockchain Technologies: Principles of Identification and Classification. *Ledger*. 4. 10.5195/ledger.2019.140.
7. Hands-on blockchain with Hyperledger: Building decentralized applications with Hyperledger Fabric and Composer / Nitin Gaur Luc Desrosiers Venkatraman Ramakrishna Petr Novotny Dr. Salman A. Baset Anthony O'Dowd - 2018.
8. D. Ongaro, J. Ousterhout. In search of an understandable consensus algorithm (extended version). Stanford University.
9. Hyperledger Fabric website [Electronic resource], Hyperledger Project. URL: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/>, 2023
10. E. Khodyrev, T. Yelina (2020). Conceptual model of distributed data platform for automotive industry. *Zavalishenskie readings: youth section: collected papers SPB, GUAP 2020*.
11. Mathieu Chanson, Andreas Bogner, Felix Wortmann, Elgar Fleisch (2017). Blockchain as a privacy enabler: an odometer fraud prevention system, pp. 13-16. 10.1145/3123024.3123078.
12. Asad Khattak, Austin Harris, Mina Sartipi, Iman Mahdinia, Nastaran Moradloo, Safari Taherkhani Mohammad (2023). Connected and Automated Vehicles Investment and Smart Infrastructure in Tennessee Part 3: Infrastructure and Vehicular Communications: From Dedicated Short-Range Communications to Cellular Vehicle-to-Everything.
13. Kim Seungmo, Ibrahim Ahmed (2020). Byzantine-Fault-Tolerant Consensus via Reinforcement Learning for Permissioned Blockchain Implemented in a V2X Network.

ВЛИЯНИЕ РАНЖИРОВАНИЯ ИНДИКАТОРОВ АТАК НА КАЧЕСТВО МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ НЕПРЕРЫВНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-45-55

Manuscript received 30 May 2023;
Accepted 02 July 2023

Фомичева Светлана Григорьевна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, levikha@mail.ru

Ключевые слова: индикатор компрометации,
индикатор атаки, ранжирование индикаторов,
методы объясняемого машинного обучения,
деревья решений

Агенты безопасности систем аутентификации функционируют в автоматическом режиме и контролируют поведение субъектов, анализируя их динамику с помощью как традиционных (статистических) методов, так и методов на базе машинного обучения. Расширение парадигмы тканей кибербезопасности актуализирует совершенствование адаптивных объясняемых методов и моделей машинного обучения для систем непрерывной аутентификации. Целью исследования является оценка влияния методов ранжирования индикаторов компрометации, индикаторов атак и иных признаков на точность выявления аномалий сетевого трафика, как части ткани безопасности при непрерывной аутентификации пользователей и сущностей. Использовались вероятностные и объясняемые методы бинарной классификации, а также нелинейные регрессоры на базе деревьев решений. Результаты исследования показали, что методы предварительного ранжирования повышают точность и скорость функционирования у контролируемых ML-моделей в среднем на 7%. У неконтролируемых моделей предварительное ранжирование существенно не влияет на время обучения, но повышает F1-Score на 2-10 %, что обосновывает их целесообразность в агентных системах непрерывной аутентификации. Разработанные в работе модели обосновывают целесообразность механизмов предварительного ранжирования индикаторов компрометации и атак, позволяя создавать прототипы паттернов индикаторов атак в автоматическом режиме. В целом неконтролируемые модели не столь точны, как контролируемые, что актуализирует совершенствование либо объясняемых неконтролируемых подходов к выявлению аномалий, либо подходов на базе методов с подкреплением.

Информация об авторе:

Фомичева Светлана Григорьевна, к.т.н., профессор, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Фомичева С.Г. Влияние ранжирования индикаторов атак на качество моделей машинного обучения в агентных системах непрерывной аутентификации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 45-55.

For citation:

Fomicheva S.G. (2023) Influence of attack indicator ranking on the quality of machine learning models in agent-based continuous authentication systems. *T-Comm*, vol. 17, no. 8, pp. 45-55. (in Russian)

Введение

Смена традиционной парадигмы обеспечения безопасности, базирующейся на защите периметра организации, на парадигму нулевого доверия (Zero Trust) привела к кардинальным изменениям в осуществлении процессов аутентификации и верификации пользователей, устройств и программных сущностей. Архитектура нулевого доверия основана на принципе «никогда не доверять, непрерывно проверять и оценивать риски». По данным <https://owasp.org/www-project-top-ten/> OWASP (Open Worldwide Application Security Project) угрозы, связанные с нарушением контроля доступа (Broken Access Control) и нарушением идентификации и аутентификации (Broken Authentication) продолжают возглавлять список наиболее опасных нарушений в сфере информационной безопасности (табл. 1).

Таблица 1

**Рейтинг угроз безопасности для веб-приложений
(динамика с 2017 по 2021 год)**

№	Рейтинг атак на 2017 год	Динамика	Рейтинг атак на 2021 год
1	A02:2017 – Injection (Иньекции)	↓ (-2)	A01:2021 – Broken Access Control (Нарушение контроля доступа)
2	A02:2017 – Broken Authentication (Нарушение идентификации и аутентификации)	↓ (-6)	A02:2021 – Cryptographic Failures (Криптографические сбои)
3	A03:2017 – Sensitive Data Exposure (Раскрытие конфиденциальных данных)	↑ (+1)	A03:2021 – Injection (Иньекции)
4	A04:2017 – XML External Entities (Внешние объекты)	new	A04:2021 – Insecure Design (Небезопасный дизайн)
5	A05:2017 – Broken Access Control (Нарушение контроля доступа)	↑ (+4)	A05:2021 – Secure Misconfiguration (Неверная конфигурация безопасности)
6	A06:2017 – Secure Misconfiguration (Неверная конфигурация безопасности)	↑ (+1)	A06:2021 – Vulnerable and Outdated Components (Уязвимые и устаревшие компоненты)
7	A07:2017 – Cross-site scripting (XSS) (Межсайтовый скриптинг)	↑ (+3)	A07:2021 – Broken Authentication (Нарушение идентификации и аутентификации)
8	A08:2017 – Insecure Deserialization (Небезопасная десериализация)	new	A08:2021 – Soft and Data Integrity Failures (Ошибки целостности программного обеспечения и данных)
9	A09:2017 – Using Components with Known Vulnerabilities (Использование компонентов с известными уязвимостями)	↑ (+3)	A08:2021 – Secure Logging & Monitoring Failures (Сбои регистрации и мониторинга безопасности)
10	A10:2017 – Insufficient Logging & Monitoring (Некачественность регистрации и мониторинга)	new	A10:2021 – Server-Site Request Forgery (Подделка запросов на стороне сервера)

Ключевым аспектом архитектуры нулевого доверия является то, что вся деятельность должна регистрироваться и отслеживаться, а любые аномалии, включая подозрительное боковое движение, немедленно отмечаться. Для этих целей инфраструктура безопасности все чаще использует агентный подход организации межкомпонентного взаимодействия, где функционал по обеспечению безопасности реализуется с помощью специализированных программных решений, называемых агентами безопасности. Агенты безопасности функционируют в автоматическом режиме и контролируют поведение субъектов, анализируя их динамику с помощью как традиционных (статистических) методов, так и методов на базе машинного обучения (ML-методов) [1]. Специфика ML-методов для агентов безопасности заключается в обязательном использовании методов объясняемого искусственного интеллекта (XAI), а также необходимостью их самоадаптации к изменению внешнего окружения при сохранении способности выполнять свою основную целевую задачу [2].

В данной работе приведены результаты авторских экспериментов по оценке влияния методов ранжирования индикаторов компрометации (*IoC* – Indicators of Compromise), индикаторов атак (*IoA* – Indicators of Attack) [3] и иных признаков на точность выявления аномалий сетевого трафика, как части ткани безопасности при непрерывной аутентификации пользователей и сущностей.

С этой целью исследовались методы на базе деревьев решений и вероятностные ML-модели при выявлении аномалий, связанных с тремя типами атак: FTP – Patator, SSH – Patator, XSS (Cross-Site Scripting) [<https://kali.tools/?p=269>]. Эксперименты проводились при использовании открытых наборов данных (датасетов) в их исторической ретроспективе – NSL – KDD 2009, ISCX 2012, CICIDS2017, Loghub2021 [4], на основе которых после очистки и дополнительной предобработки и разметки был создан авторский композитный датасет для выявления аномалий в системах аутентификации.

**Индикаторы угроз безопасности
и методы их ранжирования**

Персонализированные характеристики поведения субъектов систем безопасности подразумевают регистрацию и последующий динамический анализ последовательностей многомерного наблюдения, которые генерируются окружением субъекта. В частности, среди активно исследуемых подходов в Zero Trust системах рассматривается непрерывная аутентификация (CA – continuous authentication), в ходе которой проводится потоковый майнинг данных (DSM – data stream mining) с целью выявления индикаторов компрометации (*IoC* – Indicators of Compromise), индикаторов атак (*IoA* – Indicators of Attack) и иных признаков аномального поведения субъектов при получении доступа к доверительным средам. Обычно индикаторы компрометации поставляются в виде так называемых потоков или фидов угроз (threat feed) – структурированного списка данных об угрозах. Фиды, как правило, интегрируются в средства мониторинга, анализа и реагирования, например, такие как SIEM (Security Information and Event Management), UEBA (User and Entity Behavioral Analytics) и SOAR (System of Orchestration, Automation and Response). Зачастую индикатор компрометации состоит из типа источника, значения и контекста.

Типом источника может быть IP-адрес, e-mail-адрес, DNS-адрес, URL-адрес, хэши вредоносных файлов по стандартам MD5 или SHA256, процессы, ключи реестра и т.д.

В свою очередь, *IoA* – это набор векторов данных, который дает релевантную информацию для соответствующей атаки. Структуры взаимосвязанных *IoC* через последовательности событий, которые атакующий должен совершить, чтобы добиться успеха при атаке, формируют *IoA* и интерпретируются, как правила баз знаний системы реагирования на инциденты безопасности.

Сравнение особенностей использования *IoC*и *IoA* отражено в таблице 2.

Таблица 2

Особенности использования *IoC*и *IoA*

№	<i>IoA</i>	<i>C</i> :
1	Обнаруживают известные и неизвестные атаки, для которых могут отсутствовать индикаторы компрометации	Фиксируют случившийся факт нарушения безопасности
2	Постоянное обнаружение в режиме реального времени	Точечное обнаружение, во времени. <i>IoC</i> устаревают
3	Абстрагированы от конкретных наблюдаемых случаев и отдельных конкретных инцидентов	Представляют информацию о конкретной угрозе

На рисунке 1 структурно представлена схема формирования *IoA*. В качестве примера можно привести один из наиболее распространенных индикаторов атаки *IoA* – связь между внутренними и внешними хостами с использованием необычных портов (отличных от обычных 80 и 443, которые используются для внешнего трафика) может указывать на злоумышленников, использующих эти порты для связи с вредоносными программами.

Поставщики фидов угроз не выставляют приоритет *IoC* и *IoA*, а могут лишь добавить степень уверенности во вредоносности той или иной сущности, Выставление приоритета событий выявления индикаторов –это задача потребителя услуг безопасности, решение которой является сложным и должно учитывать специфику бизнес-процессов организации. Агрегация, обогащение, очистка и ранжирование подобных индикаторов невозможна без средств автоматизации на базе методов машинного обучения.

Это объясняется:

- Колоссальным объемом регистрируемых уникальных *IoC* (за год, регистрируется более семи миллионов уникальных *IoC*)

- Ограниченном временем жизни *IoC* [<https://www.pvsm.ru/informatsionnaya-bezopasnost/324071>]
- Отсутствием фиксированной структуры фидов (например, для описания атомарных сетевых и хостовых индикаторов целесообразны плоские структуры в формате txt-или csv-фид, без каких-либо иерархических вложений, а для *IoA* уже требуется фиксировать связки *IoC*-индикаторов, поведенческие паттерны вредоносных программ, техники и тактики (TTP - (Tactics, Techniques and Procedures)) хакерских группировок или схема атаки (Attack pattern)). Для их описания используют форматы json, yaml, xml и такие композитные форматы как STIX 2 [<http://docs.oasis-open.org/cti/stix/v2.1/stix-v2.1.html>] и MISP [<https://tools.ietf.org/html/draft-dulaunoy-misp-core-format-13>].

Поскольку в данной работе рассматривается влияние методов ранжирования на точность выявления аномалий в системах аутентификации, рассмотрим существующие методы. Среди основных современных методов ранжирования (приоритизация) индикаторов компрометации выделяют:

- 1) Методы «взвешенных» метрик [3], среди них такие, как «Амстердамская» модель», адаптации амстердамской модели (Jet CSIRT), Decaying Indicators of Compromise Центра реагирования на компьютерные инциденты Люксембурга (CIRCL) <https://news.myseldon.com/ru/news/index/213462261>.
- 2) Методы машинного обучения [5-17].
- 3) Байесовские сети [18].

Амстердамская модель [3] ранжирования *IoC* оперирует четкими коэффициентами, опираясь на «пирамиду боли» (Pyramid Of Pain), которые используются при расчете:

- Экстенсивности – меры количества взаимосвязей между индикаторами компрометации и другими индикаторами, и контекстами.
- Своевременности – меры скорости, с которой источник предоставляет данные по сравнению с другими источниками.
- Полноты – меры полноты данных в источнике относительно общего набора данных всех источников.

К этим мерам добавлены коэффициент для учета включения *IoC* в списки известных неопасных ресурсов, коэффициент затухания для корректировки скорости устаревания рейтинга и веса коэффициентов. Ядром данной модели ранжирования являются метрики:

- динамика поступления индикаторов компрометации;
- среднее время жизни индикаторов компрометации;

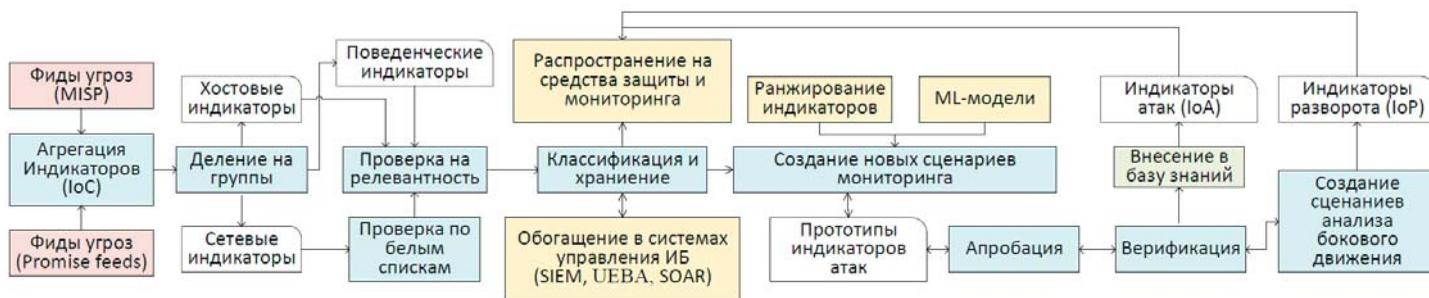


Рис. 1. Жизненный цикл индикаторов атак

- распределение данных по типам объектов, которые предоставляют фиды;
- распределение типов индикаторов компрометации по фидам;
- среднее время обновления индикатора;
- возраст индикаторов компрометации в фиде;
- уникальность данных в различных источниках.

Принцип адаптации амстердамской модели заключается в том, что все индикаторы компрометации, рассматриваются в привязке к принадлежности доменам систем и доменам данных контролируемой IT-инфраструктуры.

Авторы из компании Jet CSIRT исходят из предположения, что домены данных находятся в категориях [https://habr.com/ru/companies/jetinfosystems/articles/459674/]:

- *Real-Time Activity* - активность на источнике (то, что обнаруживается средствами анализа событий безопасности в реальном времени). Например, запускаемые процессы, изменение ключей реестра, создание файлов; сетевая активность, активные подключения и т.п. При обнаружении индикатора данной категории время на реакцию со стороны служб ИБ – минимально, следовательно, весовой коэффициент индикатора большой.

- *Historical Activity* - историческая активность (то, что обнаруживается при ретроспективных проверках): исторические логи; телеметрия; сработавшие алерты. При обнаружении индикатора данной категории время на реакцию со стороны служб ИБ – допустимо ограничено, следовательно, весовой коэффициент индикатора средний.

- *Data at Rest* - данные, находящиеся в покое (то, что обнаруживается в рамках ретроспективных проверок давно неиспользуемых источников): файлы, которые давно хранятся на источнике; ключи реестра; другие не используемые объекты. При обнаружении индикатора данной категории время на реакцию со сторон служб ИБ ограничивается длительностью проведения полного расследования инцидента, следовательно, весовой коэффициент индикатора низкий.

Домены систем определяют принадлежность источника индикатора компрометации к одной из подсистем инфраструктуры:

- *Рабочие станции.* Источники, используемые непосредственно пользователем для выполнения повседневной работы: АРМ, ноутбуки, планшеты, смартфоны, терминалы (VoIP, ВКС, IM), прикладные программы (CRM, ERP, etc.).

- *Серверы.* Здесь имеются в виду остальные устройства, обслуживающие (serve) инфраструктуру, т.е. устройства, обеспечивающие работу ИТ-комплекса: СЗИ (FW, IDS/IPS, AV, EDR, DLP), сетевые устройства, файловые/веб/прокси-серверы, системы СХД, СКУД, контроль окр. среды и т.д.

Комбинируя принадлежность источников доменам данных и систем с составом признаков индикатора компрометации (атомарный *IoC* или композитный), в зависимости от допустимого времени реакции, формируется приоритет инцидента при его детектировании.

CIRCL-подход предполагает [https://news.myseldon.com/ru/news/index/21346226], что приоритет и время жизни некоторых индикаторов не является гомогенным и могут меняться. Время жизни индикаторов задается функцией, характеризующей скорость снижения веса индикатора со временем [3].

Ключевым недостатком вышеперечисленных моделей является необходимость знания особенностей архитектуры анализируемой IT-инфраструктуры. При ее изменении приходится переконфигурировать и систему ранжирования индикаторов. Эту проблему пытаются решить с использованием методов машинного обучения (ML-методов).

В качестве ML-методов при обнаружении вторжений на основе индикаторов компрометации исследователи оценивали эффективность деревьев решений [9], машины опорных векторов [10], метода *k*-ближайших соседей [11], ансамбли данных методов [12] и методы глубокого обучения [13 -15,19]. При этом итоговое дерево решений или обученная модель интерпретируются как прототип паттерна *IoA* (после верификации экспертом- аналитиком паттерн фиксируется в базе знаний как *IoA* (рис.1)).

В данной работе акцент при ранжировании индикаторов сделан на исследовании ML-методов на основе ХАИ (объясняемого искусственного интеллекта) с целью повысить точность выявления аномалий в агентных системах аутентификации. В исследовании, в силу ограниченности объема статьи, не отражены перспективные ML-методы на базе иерархических нейро-нечетких сущностей, предложенные автором данной работы. Однако, теоретическое обоснование возможностей применения иерархических нейро-нечетких сущностей автором представлено в работах [1, 2, 18, 20], а структура и принципы построения таких интеллектуальных классификаторов для систем аутентификации описано в [21].

Фиды угроз безопасности и датасеты для систем аутентификации

Качество ML-моделей напрямую зависит от полноты и непротиворечивости используемых для обучения и тестирования наборов данных. Данное исследование проводилось, исходя из следующей эвристики.

Пусть *Features* - множество признаков некоторого датасета, а *Feeds* – множество признаков фиды. Тогда исходим из предположения, что:

$$\begin{cases} Features \cap Feeds = \emptyset \\ Features_j^A \cap Feeds_j \approx Feeds_j = \bigcup_i IoC_i^j, \\ Ranking(Features_j^A) \cap Feeds_j \rightarrow IoA_j \end{cases} \quad (1)$$

где $Features_j^A$ - подмножество признаков датасета, свойственных аномалии при зафиксированной атаке *j*-того типа, а IoA_j - индикатор атаки *j*-того типа, IoC_i^j – совокупность индикаторов компрометации, релевантных атаке *j*-того типа.

Предположение (1) требует наличия датасетов, содержащих признаки, релевантные индикаторам компрометации и атак соответствующего типа. Кроме того, поскольку индикаторы компрометации имеют ограниченный жизненный цикл, было принято решение учесть возможность деградации индикаторов за счет использования нескольких открытых датасетов (табл.3), применяемых при выявлении аномалий, в их исторической ретроспективе с шагом создания 3-4 года – NSL-KDD 2009, ISCX 2012. CICIDS 2017, Loghub 2021.

Таблица 3

Характеристики используемых датасетов

Характеристики датасета	NSL-KDD 2009	ISCX 2012	CICIDS 2017	Loghub 2021
Объем данных	~5 Гб	~5 Гб	~12 Гб	>75 Гб
Разделение на обучающую и тестовую выборку	Да	Да	Нет	Нет
Маркировка сетевых атак	Да	Да	Да	Частично
Используемые протоколы HTTP, HTTPS, FTP, SSH	Да	Да	Да	Да
Способ создания трафика	Реальный	Реальный	Реальный	Реальный
Потребность в очистке и предобработке	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая

Набор данных NSL-KDD 2009 [<https://www.kaggle.com/datasets/hassan06/nslkdd>] в оригинальном виде содержит большое количество ошибок разметки классов атак, устаревшие типы атак и уязвимостей, ограниченное число типов атак. Это потребовало существенной работы по верификации меток и пополнению датасета контекстом фидов соответствующего года, взятом с платформы MISP. Устаревшие типы атак не удалялись.

Датасет ISCX 2012 [https://gitlab.com/santhisenan/ids_iscx_2012_dataset] создан с использованием реальных устройств, реальных вредоносных и нормальных потоков, включая FTP, HTTP, IMAP, POP3, SMTP и SSH протоколы. Все данные корректно промаркированы. Однако, набор данных ISCX 2012 не включает в себя SSL/TLS, которые сегодня составляют большую часть интернет-трафика

Набор данных CICIDS2017 [<https://www.kaggle.com/datasets/cicdataset/cicids2017>] подготовлен по результатам анализа сетевого трафика в изолированной среде, в которой моделировались действия 25 легальных пользователей, а также вредоносные действия нарушителей. Набор объединяет более 50 Гб «сырых» данных в формате PCAP и включает 8 предобработанных файлов в формате .csv, содержащих размеченные сессии с выделенными признаками в разные дни наблюдения. Он состоит из пятидневного потока данных сети, использующей с операционными системами, Windows Vista / 7 / 8.1 / 10, Mac, Ubuntu 12/16 и Kali. В наборе данных имеется 15 различных типов меток и 85 признаков. Одна метка (Benign) соответствует штатному режиму без атаки, другие 14 представляют собой режим атаки. Из этих 14 видов атак, лишь пять направлены непосредственно на аутентификацию. Запись без использования атаки, формируемая с использованием почтовых сервисов, протоколов SSH, FTP, HTTP и HTTPS, представляет собой безопасный/обычный поток данных в сети, созданный путем имитации реальных пользовательских данных.

Loghub [https://zenodo.org/record/3227177#.ZFQ2_nZByx0] – большая коллекция наборов данных log-журналов, включая распределенные системы, суперкомпьютеры, операционные системы, мобильные системы, серверные приложения и автономное программное обеспечение.

Общий объем всех этих журналов составляет 77 Гб. В составе Loghub две категории наборов данных журналов: пять размеченных и 12 неразмеченных.

В частности, два размеченных набора журналов созданы для распределенной файловой системы HDFS: HDFS-1 и HDFS-2. HDFS-1 генерируется в 203-узловой HDFS с использованием эталонных рабочих нагрузок и размечен вручную с помощью также разработанных вручную правил для выявления аномалий. Кроме того, HDFS-1 также предоставляет информацию о конкретном типе аномалии и позволяет проводить исследования по выявлению повторяющихся проблем. HDFS-2 собран путем агрегирования журналов из кластера HDFS в лаборатории создателей датасета CUNK, который включает в себя один *namenode* и 32 узла данных.

Журналы агрегируются на уровне узла и имеют огромный размер (более 16 Гб) и предоставляются как есть без дальнейших изменений. Кроме этого, в датасете есть данные журналов операционных систем Windows, Linux, Mac, мобильных систем и серверных приложений. Основные характеристики использованных в данной работе датасетов из коллекции Loghub приведены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики использованных датасетов из коллекции Loghub 2021

Система	Описание log-журнала	Период наблюдения	Количество записей	Объем датасета	Наличие разметки
Распределенные системы					
HDFS	Hadoop distributed file system log	38,7 часов	11175629	1,47 Гб	Да
HDFS	Hadoop distributed file system log	Не фиксирован	71118073	16,06 Гб	Нет
Операционные и мобильные системы					
Windows	Windows event log	226,7 дней	114608388	26,09 Гб	Нет
Linux	Linux system log	263,9 дней	25567	2,25 Мб	Нет
Mac	Mac OS log	7 дней	117283	16,09 Мб	Нет
Android	Android framework log	Не фиксирован	1555005	183,37 Мб	Нет
Серверы					
Apache	Apache web-server error log	263,9 дней	56481	4,90 Мб	Нет
OpenSSH	OpenSSH server log	28,4 дней	655146	70,02 Мб	Нет

Поскольку все рассмотренные выше датасеты содержат записи различных типов атак, с целью сокращения анализируемых экземпляров дни, в которых использовались атаки: DoS, PortScan, Infiltration, Bot, DDoS были исключены в силу того, что они напрямую не влияют на процесс аутентификации. В качестве магистральной была выбрана структура признаков датасета CICIDS2017, а в качестве магистрального метода ранжирования признаков (включая IoC), выбрана регрессия случайного леса (Random Forest Regression). Данный выбор обоснован тем, что он способен обрабатывать большие объемы данных и выявлять нелинейные зависимости между переменными. Random Forest позволяет работать с данными разных типов (например, числовыми, категориальными, бинарными) и обнаруживать скрытые взаимосвязи между ними.

Кроме того, деревья решений относят к объясняемым методам ХАИ. В качестве инструмента использован Scikit-learn – библиотека машинного обучения на Python.

Очищенный композитный набор данных, из которого исключены данные на прямую не относящиеся к аутентификации, содержит 1 146 193 записей с 85 признаками, которые определяют свойства потока, такие как идентификатор потока, IP-адрес источника, порт источника и другие. Записей с FTP-Patator атаками – 47938, SSH-Patator атаками – 35897, Web Attack – Brute Force атаками – 21507, Web Attack – XSS атаками – 6652, Web Attack – Sql Injection атаками – 921. Проблема несбалансированности набора данных решалась сокращением числа штатных записей при формировании обучающей, так и тестовых выборок.

Задача обнаружения аномалий моделировалась как проблема бинарной классификации. В качестве основной оценочной метрики использована *F1-Score* в силу типичной для алгоритмов классификации при оценке показателя точности. Метрика *F1-Score* оценивает баланс между *Precision* и *Recall*, вычисляя их среднее гармоническое. Если *F1 Score* = 1, это указывает на идеальную точность и полноту:

$$F1_Score = 2 \cdot \frac{Recall \times Precision}{Recall + Precision} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (2)$$

где *Precision* — основная оценочная метрика при работе с несбалансированными данными, определяемая выражением:

$$Precision = \frac{\text{количество истинно положительных прогнозов}}{\text{количество правильных прогнозов}} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (3)$$

Recall определяется выражением (4) и указывает на пропущенные положительные прогнозы, в отличие от метрики *Precision* (3):

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (4)$$

Чем ближе *Recall* к 1, тем лучше модель, поскольку она не пропускает истинно положительные результаты. Гораздо хуже, если модель верифицирует, например, некоторых авторизованных пользователей как неавторизованных и откажет им в доступе к системе. Метрика *Recall* в этом случае работает лучше, чем *Precision*.

Метрика *Accuracy* интуитивно понятна и проста в реализации: (5), варьируется от 0 до 1 и используется для простых моделей и сбалансированных датасетов:

$$Accuracy = \frac{\text{количество правильных прогнозов}}{\text{общее количество прогнозов}} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}. \quad (5)$$

Типы анализируемых атак

Во всех используемых датасетах запись без использования атаки, формируемая с использованием почтовых сервисов, протоколов SSH, FTP, HTTP и HTTPS, представляет собой безопасный/обычный поток данных в сети, созданный путем реальных пользовательских данных.

Атака FTP-Patator – это атака грубой силы, направленная на захват действительного имени пользователя и пароля при

использовании сетевого протокола FTP, который обеспечивает передачу файлов между клиентом и сервером в сети. Большое количество неудачных попыток входа за короткий промежуток времени является характерной особенностью для атак грубой силы. Поэтому можно наблюдать плотный поток пакетов во время атаки. Кроме того, неудачные попытки входа не содержат файлов большого размера, поэтому потребление полосы пропускания и количество байтов низкие.

Атака SSH-Patator. SSH (Secure Shell) – это криптографический протокол, который позволяет безопасно работать с различными сетевыми сервисами по сети в незащищенной среде. Наиболее распространенным использованием SSH – удаленный доступ к системе. Соответственно, цель данной атаки получить удаленный доступ. Атака SSH-Patator включает три шага:

1) Этап сканирования. Целью этого этапа является попытка узнать сведения о целевой системе. Атакующий пытается найти узел, использующий SSH, путем выполнения сканирования определенного номера порта для IP-блоков в сети или подсети.

2) Этап грубой силы: на этом этапе атакующий пытается войти в систему, которую он обнаружил на этапе сканирования, используя большое количество комбинаций имени пользователя и пароля.

3) Этап вымирания: Атакующий получает полномочия легитимного пользователя, успешно войдя в систему.

Если на первом этапе этой атаки наблюдается большое количество незавершенных TCP-пакетов с SYN флагами, на втором этапе (перебор) наблюдается небольшое количество завершенных TCP-пакетов небольшого размера. Количество пакетов в потоке велико, но размеры пакетов малы.

Атаки SSH-Patator и FTP-Patator часто входят в состав более сложных атак, и, в частности, перед или в процессе реализации web-атак.

Атака XSS (Cross-Site Scripting) – тип веб-атаки, которая реализуется путем внедрения кода в скрипты веб-страниц. При просмотре скомпрометированной веб-страницы, внедренный фрагмент вредоносного кода может привести к нежелательным результатам, таким как кража данных, захват сессии, выполнение специального кода и т.п.

Атака SQL-инъекций реализуется при попытке доступа к базе данных, используя соединения между веб-приложением и базой данных, что грозит возможностью кражи, удаления или изменения данных, отправив вредоносные sql-запросы на сервер базы данных.

В процессе обучения применялось два сценария – обучение ML-моделей на конкретном типе атак и со всеми вышеперечисленными совместно. Для первого подхода создавался отдельный csv-файл для каждого типа атаки. Этот файл содержит все записи, маркированные конкретным типом атаки, и записи, выбранные из штатного потока с учетом интервала атаки (до и после атаки).

Обнаружение аномалий

Поскольку основу объясняемых ML-методов составляет класс моделей на базе деревьев решений, представим процесс построения дерева решений в формальном виде.

Пусть датасет задан в виде векторов обучения, $x_i \in X^m$, $i=1, \dots, l$ и векторов соответствующих меток $y_i \in X^l$. Дерево решений рекурсивно разбивает пространство признаков таким образом, что образцы с одинаковыми метками или сходными целевыми значениями группируются вместе.

Пусть данные в узле n дерева решений представлены множеством Q_n с m_n образцами (samples). Кандидат на точку разбиения обозначим через $\theta(j, t_n)$ где j – некоторая функция, а t_n пороговое значение для разбиения данных на $Q_n^{left}(\theta)$ и $Q_n^{right}(\theta)$ подмножества.

Тогда правило разбиения описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} Q_n^{left}(\theta) = \{(x, y) | x_i < t_n\} \\ Q_n^{right}(\theta) = Q_n \setminus Q_n^{left}(\theta) \end{cases}, \quad (6)$$

Качество возможного разбиения $G(Q_n, \theta)$ узла n вычисляется с использованием H -функции потерь (Loss-функция), выбор которой зависит от решаемой задачи (классификация или регрессия):

$$G(Q_n, \theta) = \frac{m_n^{left}}{m_n} H(Q_n^{left}(\theta)) + \frac{m_n^{right}}{m_n} H(Q_n^{right}(\theta)). \quad (7)$$

В итоге выбирается параметр θ^* , который минимизирует функцию потерь:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} (G(Q_n, \theta)). \quad (8)$$

Рекурсия указанных выше разбиений (6) – (8) выполняется для подмножеств $Q_n^{left}(\theta)$ и $Q_n^{right}(\theta)$ до тех пор, пока не будет достигнута максимально допустимая глубина $m_n < \min$ или же $m_n = 1$.

Функция потерь $H(Q_n)$ для задачи классификации задается выражением (9), а для задачи регрессии – выражением (10):

$$H(Q_n) = -\sum_k p_{nk} \log(p_{nk}), \quad (9)$$

где k – количество классов классификации, а p_{nk} – пропорция наблюдений класса k в узле n .

Если целью является непрерывное значение (решается задача регрессии), то для узла n общими критериями для минимизации при определении местоположений для будущих разбиений являются среднеквадратическая ошибка (MSE или ошибка L_2), отклонение Пуассона, а также средняя абсолютная ошибка (MAE или ошибка L_1):

$$H(Q_n) = \frac{1}{m_n} \sum_{y \in Q_n} (y - \bar{y}_n)^2, \quad (10)$$

где $\bar{y}_n = \frac{1}{m_n} \sum_{y \in Q_n} y$ – среднеквадратическая ошибка, y – численное значение метки.

Среди основных современных алгоритмов обнаружения аномалий (типичная задача бинарной классификации) выделяют [14] «случайный лес» (Random Forest), «сокращение измерений» (Dimension Reduction, например, алгоритм PCA), «изолированный лес» (Isolation Forest). PCA является неконтролируемым методом, а Random Forest – контролируемым, Isolation Forest применим как к контролируемым, так и неконтролируемым подходам к обучению.

Класс Random Forest Regressor из Sklearn использован при вычислении весов важности признаков (включая IoC). Гиперпараметры Random Forest Regressor были установлены в следующие значения $n_estimators=100$, $max_depth=90$, $min_samples_split=10$, $min_samples_leaf=3$. В результирующем лесу решений каждому признаку присвоен вес в зависимости от того, насколько он полезен при построении дерева решений. По завершении процесса эти веса важности признаков отсортированы (рис. 2, 4-6). Сумма весов важности всех свойств дает общий вес дерева решений. Доля в процентах любого признака от веса всего дерева, взятого за 100%, дает информацию о важности этого признака в дереве решений. На рисунке 4 продемонстрирована динамика доминирующих признаков при FTP-Patator атаке.

Анализатор на базе Isolation Forest предварительно обрабатывает все файлы лог-журналов и сохраняет журналы действий пользователей. Для каждого пользователя система извлекает набор характеризующих их признаков (features – фичей) и строит базовую модель пользователя (base line tree), создавая набор расширенных функций – лес деревьев изоляции (Isolated Forest). Когда в лог-журнале появляется новая запись о действиях пользователя, она сопоставляется с каждым из этих деревьев изолированного леса и вычисляется оценка аномалий. Если полученная оценка аномалии ниже априорно заданного порогового значения, она считается нормальной, в противном случае регистрируется аномальное поведение, и этот пользователь/сущность помечается как аномалия. Изолированный лес обладает рядом преимуществ в качестве алгоритма обнаружения аномалий в агентных системах аутентификации:

- Для получения функции обнаружения аномалий требуются относительно небольшие выборки из больших наборов данных. Это делает его быстрым и масштабируемым.
- Не требуются примеры аномалий в наборе обучающих данных.
- Его пороговое значение расстояния для определения аномалий основано на глубине дерева, которая не зависит от масштабирования размеров набора данных.

Поскольку для формирования индикаторов атаки следует учитывать прежде всего индикаторы компроментации, соответствующие оранжевому и красному уровню «пирамиды боли», из 85 признаков были исключены признаки, присущие зеленым уровням (Flow ID, Source IP, Source Port, Destination IP, Destination Port, Protocol, Timestamp, External IP), в силу того, что они легко атакующим маскируются или меняются. Оставшиеся признаки ранжировались. Полученные в результате ранжирования профили (рис. 2, 4, 5) образуют прототип паттерна атак (IoA). Результат ранжирования признаков атак SSH-Patator и FTP-Patator указывает на доминирующий признак Fwd Packet Length Max, имеющий наибольший вес. Это связано с похожими схемами проведения атак этих типов.

В свою очередь, существенные признаки веб-атак отличаются по составу доминирующих признаков.

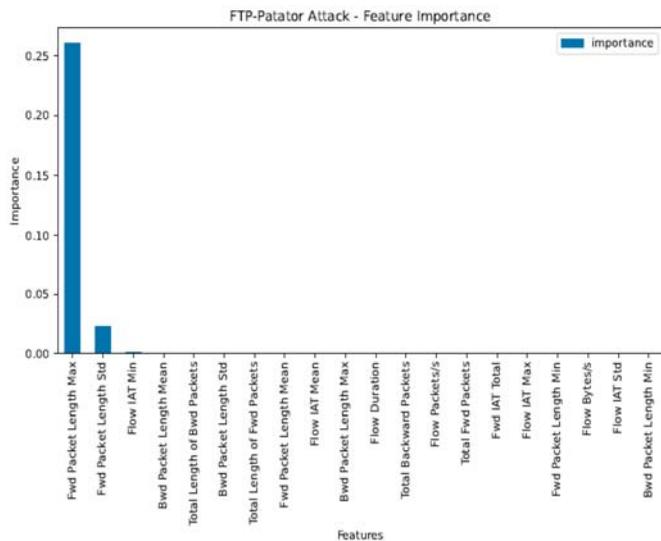
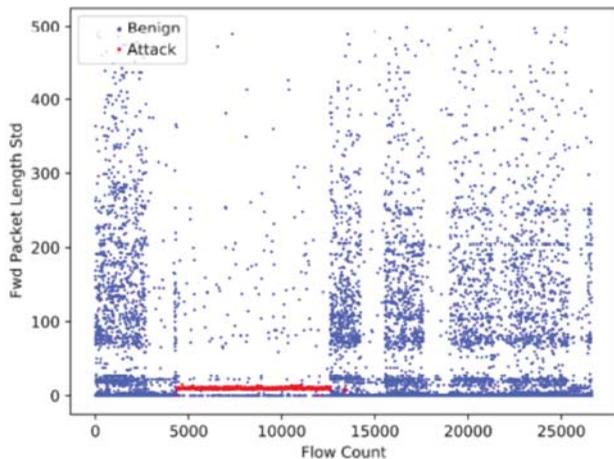
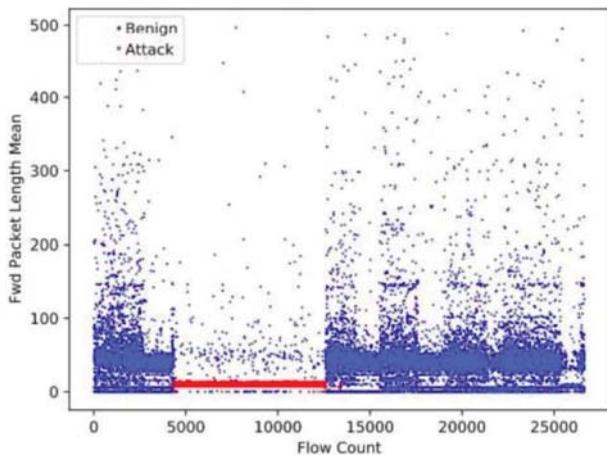


Рис. 2. Результат ранжирования признаков атаки FTP-Patator



а) Динамика "Fwd Packet Length Std" при FTP-Patator атаке



б) Динамика "Fwd Packet Length Mean" при FTP-Patator атаке

Рис. 3. Динамика доминирующих признаков при FTP-Patator атаке (фрагмент трафика)

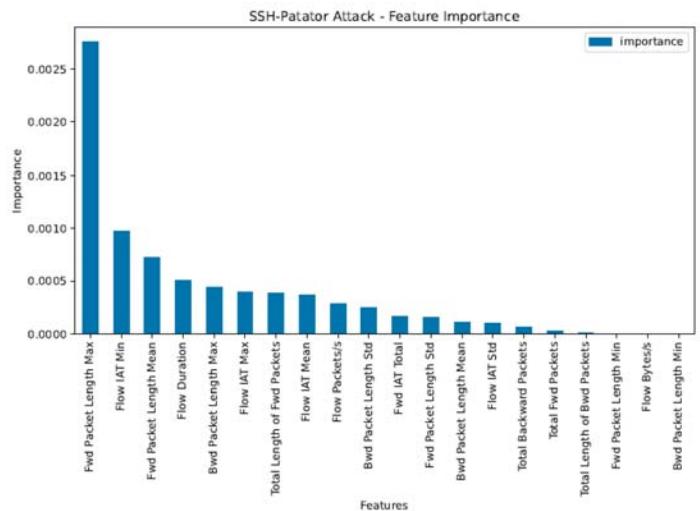


Рис. 4. Результат ранжирования признаков атаки SSH-Patator

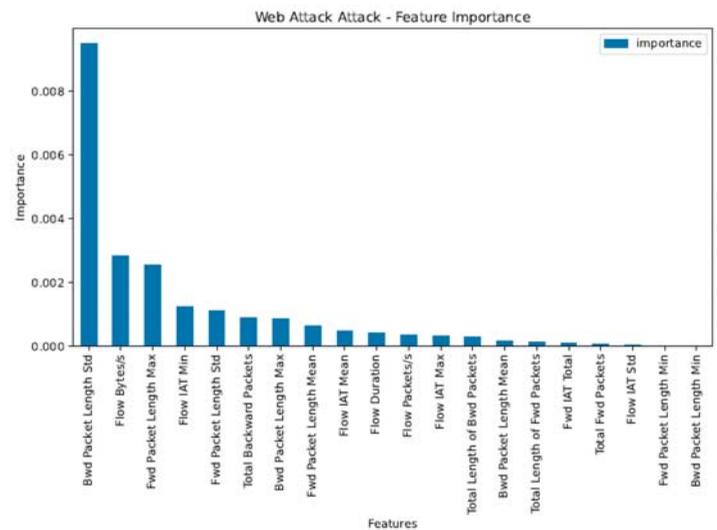


Рис. 5. Результат ранжирования признаков Web-атаки

Профиль рейтинга для случая совмещенных атак (рис. 6) нельзя интерпретировать как прототип паттерна конкретного *IoA*, однако он полезен для выявления доминирующей фичей систем аутентификации в целом и может быть проинтерпретирована как индикатор разворота *IoPivot* (*IoP*), характеризующий боковое движение сложной атаки:

$$IoP(t) = \varphi \left(\bigcup_j IoA_j \otimes \bigcup_i IoC_i(t) \right) \quad (11)$$

где φ – функциональная зависимость, выявленная в ходе оучения ML-модели, t – дискретное время наблюдений трафика, j – количество выявленных паттернов для *IoA*, i – число доминирующих признаков индикаторов компроментации *IoC*.

При установке для (11) порогового значения веса признака равным 1% от общей суммы весов признаков, выделены семь доминирующих признаков, покрывающих 95,8% общего веса признаков. Список семи доминирующих признаков приведен в таблице 5.

Таблица 6

Оценка качества обученных ML-моделей при выявлении аномалий в системах непрерывной аутентификации

ML-модель	Тип решаемой задачи	Принцип обучения	Метрика. (без ранжирования/с ранжированием)				Время обучения, с
			Accuracy	Precision	Recall	F1-score	
Random Forest (Случайный лес)	Classification	Supervised	0.99	1.0	0.75	0.83	6.6472
			0.99	1.0	0.89	0.99	4.7321
Naive Bayes (Наивный Байесовский метод)	Classification	Supervised	0.31	0.51	0.64	0.25	0.725
			0.16	0.5	0.53	0.15	0.628
QDA (Квадратичный дискриминантный анализ)	Classification	Supervised	0.73	0.52	0.85	0.47	1.0098
			0.69	0.52	0.83	0.45	0.8507
ID3 – Iterative Dichotomiser 3 (Итеративный дихотомизатор-3)	Classification	Supervised	1.0	0.99	0.84	0.9	4.6815
			1.0	0.99	0.83	0.89	4.7226
KNN (<i>k</i> -ближайших соседей)	Classification	Unsupervised	0.99	0.91	0.83	0.87	38.5388
			1.0	0.97	0.89	0.93	31.9922
One-Class SVM (Одноклассовая машина опорных векторов)	Classification	Unsupervised	0.99	1.0	0.22	0.37	19.5771
			0.99	1.0	0.25	0.42	20.2327
Isolation Forest (Изолирующий лес)	Proper Binary Tree	Unsupervised	0.99	0.85	0.78	0.81	4.9117
			0.99	0.93	0.81	0.83	3.9366

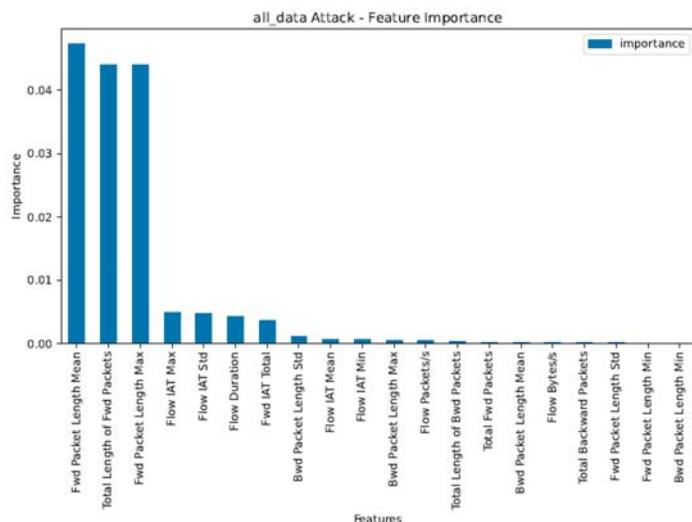


Рис. 6. Результат ранжирования признаков при совмещении атак

Таблица 4

Весы признаков для сценария со совмещенными атаками

Наименование признака	Вес признака	Наименование признака	Вес признака
Fwd Packet Length Mean	0.047260	Bwd Packet Length Max	0.000562
Total Length of Fwd Packets	0.043968	Flow Packets/s	0.000493
Fwd Packet Length Max	0.043883	Total Length of Bwd Packets	0.000318
Flow IAT Max	0.004879	Total Fwd Packets	0.000243
Flow IAT Std	0.004756	Bwd Packet Length Mean	0.000157
Flow Duration	0.004255	Flow Bytes/s	0.000156
Fwd IAT Total	0.003606	Total Backward Packets	0.000124
Bwd Packet Length Std	0.001099	Fwd Packet Length Std	0.000111
Flow IAT Mean	0.000696	Fwd Packet Length Min	0.000054
Flow IAT Min	0.000616	Bwd Packet Length Min	0.000012

Таблица 5

Доминирующие признаки при аутентификации

Наименование признака	Значение веса	Весовая доля, %
Fwd Packet Length Mean	0,047260	29.68
Total Length of Fwd Packets	0,043968	27.63
Fwd Packet Length Max	0,043883	27.57
Flow IAT Max	0,004879	3.06
Flow IAT Std	0,004756	2.99
Flow Duration	0,004255	2.67
Fwd IAT Total	0,003606	2.26

Результаты исследования ML-моделей для выявления аномалий с учетом проранжированных признаков отражены в таблице 6.

Хотя контролируемые методы устойчиво демонстрируют высокие значения метрик точности, однако неконтролируемые методы более применимы в реальной производственной среде, поскольку, во-первых, аномалии значительно реже встречаются в реальных системах и, во-вторых, маркировка данных требует много времени.

Для агентных систем непрерывной аутентификации в подавляющем большинстве используются неконтролируемые методы, реже – методы с подкреплением.

Методы предварительного ранжирования повышают точность и скорость функционирования у контролируемых ML-моделей в среднем на 7%. У неконтролируемых ML-моделей предварительное ранжирование существенно не влияет на время обучения, но повышает F1-Score на 2-10%, что обосновывает его целесообразность.

Методы Naive Bayes и QDA демонстрируют очень высокую скорость обучения, но склонны к переобучению модели и существенно проигрывают по точности классификации: F1-score имеет значение 0,25 и 0,47 соответственно. KNN – простой и эффективный метод классификации, он не является оптимальным решением для агентных систем аутентификации в силу низких скоростей адаптации, при работе с большими объемами данных. Кроме того, при наличии выбросов в данных, KNN может давать ошибочные результаты. ID3 эффективен для наборов данных с большим количеством признаков, не требует масштабирования данных и имеет хорошую производительность (ID3 имеет линейную сложность, следовательно, время работы алгоритма прямо пропорционально количеству данных). Однако, ID3 не способен обрабатывать пропущенные значения, имеет ограниченную поддержку для данных с числовыми значениями и склонность к переобучению на некоторых типах данных.

Random Forest обеспечивает наивысшую F1-меру (F1-Score = 0,99) и отклик (Recall=0,89) при использовании предварительного ранжирования признаков.

В целом, Random Forest имеет ряд преимуществ по сравнению с другими ML-алгоритмами, включая высокую точность, хорошую устойчивость к шуму и выбросам, а также возможность обработки больших объемов данных. При трансляции кода модели с интерпретируемого в нативный C время работы метода, как правило, можно сократить в 3-5 раз (до 1 сек, в данном случае). Однако используемый принцип обучения (Supervised) ограничивает его применение в агентных системах аутентификации. Интерпретация результатов классификации у Random Forest сложнее, чем у Isolation Forest. Хотя One-Class SVM обеспечивают высокое значение Accuracy (0,99), его отклик (Recall) слишком низок (0,25) даже после предварительного ранжирования, что приводит к низкому показателю *F1-Score*. Isolation Forest обеспечивает наивысшую *F1*-меру (*F1-Score* 0,99) и отклик (Recall = 0,89) при использовании предварительного ранжирования признаков, что отдает в его пользу предпочтение при выборе магистральной ML-модели классификации в агентных системах непрерывной аутентификации.

Заключение

Проведенные исследования показали, что методы предварительного ранжирования повышают точность и скорость функционирования у контролируемых ML-моделей в среднем на 7%. У неконтролируемых ML-моделей предварительное ранжирование существенно не влияет на время обучения, но повышает *F1-Score* на 2-10%, что обосновывает его целесообразность. В целом неконтролируемые подходы не столь точны, как контролируемые подходы, что актуализирует совершенствование объясняемых неконтролируемых подходов к выявлению аномалий, либо подходов на базе методов с подкреплением [20, 21].

На практике количество аномалий намного меньше, чем штатных случаев. В промышленных системах может появиться только 2-5 аномалий в год, но способных привести к нарушению функционирования критически важной инфраструктуры с серьезными последствиями. Таким образом, разработка подходов к обнаружению аномалий, которые не требуют исторических аномальных случаев, остается важной и сложной проблемой. Кроме того, все современные подходы к обнаружению аномалий основаны на лог-последовательностях, что оказывает ограниченную помощь разработчикам в дальнейшей диагностике, такой как анализ первопричин.

Литература

1. *Беззатеев С.В., Фомичева С.Г., Супрун А.Ф.* Повышение эффективности мультиагентных систем информационной безопасности методами постквантовой криптографии // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4 (52). С. 71-88. DOI: 10.48612/jisp/75dp-p3ed-hrmk
2. *Fomicheva, S. and Bezzateev, S.* Modification of the Berlekamp-Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents // Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2373(5), 052033. DOI:10.1088/1742-6596/2373/5/052033
3. *Mokaddem S., et al.* Taxonomy driven indicator scoring in MISP threat intelligence platforms // URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.03914.pdf> (дата обращения – 22.04.2923)
4. *Shilin He and Jieming Zhu,* Loghub: A Large Collection of System Log Datasets towards Automated Log Analytics // URL: <https://arxiv.org/pdf/2008.06448v1.pdf> (дата обращения – 22.04.2923)

5. *Kazato, Y.; Nakagawa, Y.; Nakatani, Y.* Improving Maliciousness Estimation of Indicator of Compromise Using Graph Convolutional Networks. // In Proceedings of the 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 10–13 January 2020, pp. 1-7. DOI:10.1109/CCNC46108.2020.9045113
6. *Wu Y., Huang C., Zhang X., Zhou H.* GroupTracer: Automatic Attacker TTP Profile Extraction and Group Cluster in Internet of Things // *Secur. Commun. Netw.* 2020, URL: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1155%2F2020%2F8842539>. DOI:10.1155/2020/8842539 (дата обращения – 22.04.2923)
7. *Ramsdale A., Shiaeles S., Kolokotronis N.* A Comparative Analysis of Cyber-Threat Intelligence Sources, Formats and Languages // *Electronics* 2020, 9 (5) :824. URL: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Felectronics9050824>. DOI:10.3390/electronics9050824 (дата обращения – 22.04.2923)
8. *Gong, S., Lee, C.* Cyber Threat Intelligence Framework for Incident Response in an Energy Cloud Platform. // *Electronics* 2021, 10 (3) 239. URL <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Felectronics10030239>. DOI:10.3390/electronics10030239
9. *Kumar M., Hanumanthappa M., Kumar T.V.S.* Intrusion Detection System using decision tree algorithm // Proceedings of the 2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology, Chengdu, China, 9-11 November 2012, pp. 629-634. DOI:10.1109/ICCT.2012.6511281.
10. *Li Y., Xia J., Zhang S., Yan J., Ai X., Dai K.* An efficient intrusion detection system based on support vector machines and gradually feature removal method // *Expert Syst. Appl.* 2012, 39, pp. 424-430. DOI:10.1016/j.eswa.2011.07.032.
11. *Lin W.C., Ke S.W., Tsai C.F.* CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors // *Knowl.-Based Syst.* 2015, 78, pp. 13-21. DOI:10.1016/j.knsys.2015.01.009.
12. *Aburomman A.A., Ibne Reaz M.B.* A novel SVM-kNN-PSO ensemble method for intrusion detection system // *Appl. Soft Comput.* 2016, 38, Pp. 360–372. DOI:10.1016/j.asoc.2015.10.011.
13. *Yin C., Zhu Y., Fei J., He X.* A Deep Learning Approach for Intrusion Detection Using Recurrent Neural Networks // *IEEE Access* 2017, 5, pp. 21954-21961. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2762418.
14. *Buczak A. L., Guven E.* A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1153-1176, Second-quarter 2016, DOI 10.1109/COMST.2015.2494502.
15. *Liu H., Lang B.* Machine learning and deep learning methods for intrusion detection systems: A survey // *Applied Sciences* 9(20):4396 DOI:10.3390/app9204396
16. *Shone N., et al.* Deep learning for anomaly detection: A review // *ACM Comput. Surv.*, Vol. 1, No. 1, Article 1. 2020. <https://arxiv.org/pdf/2007.02500.pdf> (дата обращения – 22.04.2923)
17. *Chalapathy, R., and Sanjay, H.* Deep anomaly detection: A survey // In book: *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. 2017, pp. 36-51. DOI:10.1007/978-3-319-71249-9_3
18. *Javid K., et al* Compromise-free Bayesian neural networks // URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.12211.pdf> (дата обращения – 22.04.2923).
19. *Фомичева С.Г., Конев А.В.* Адаптивная система управления содержания оксида кремния в шлаках при переработке медно-никелевых руд // Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 131-140. DOI:10.15827/0236-235X.107.131-140.
20. *Фомичева С.Г.* Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 2-10. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2017.3.2
21. *Bezzateev S., Fomicheva S.* Soft multi-factor authentication // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020. 2020. С. 9131537. DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131537

INFLUENCE OF ATTACK INDICATOR RANKING ON THE QUALITY OF MACHINE LEARNING MODELS IN AGENT-BASED CONTINUOUS AUTHENTICATION SYSTEMS

Svetlana G. Fomicheva, Petersburg University of Aerospace Instrumentations, St-Petersburg, Russia, levikha@mail.ru

Abstract

Security agents of authentication systems function in automatic mode and control the behavior of subjects, analyzing their dynamics using both traditional (statistical) methods and methods based on machine learning. The expansion of the cybersecurity fabric paradigm actualizes the improvement of adaptive explicable methods and machine learning models. Purpose: the purpose of the study was to assess the impact of ranking methods at compromise indicators, attacks indicators and other futures on the quality of detecting network traffic anomalies as part of the security fabric with continuous authentication. Probabilistic and explicable methods of binary classification were used, as well as nonlinear regressors based on decision trees. The results of the study showed that the methods of preliminary ranking increase the F1-Score and functioning speed for supervised ML-models by an average of 7%. In unsupervised models, preliminary ranking does not significantly affect the training time, but increases the by 2-10%, which justifies their expediency in agent-based systems of continuous authentication. Practical relevance: the models developed in the work substantiate the feasibility of mechanisms for preliminary ranking of compromise and attacks indicators, creating patterns prototypes of attack indicators in automatic mode. In general, uncontrolled models are not as accurate as controlled ones, which actualizes the improvement of either explicable uncontrolled approaches to detecting anomalies, or approaches based on methods with reinforcement.

Keywords: compromise indicator; attack indicator; ranking of indicators; methods of explained machine learning; decision trees.

References

1. S.V. Bezzateev, S.G. Fomicheva, A.F. Suprun (2022). Improving the efficiency of multi-agent information security systems using post-quantum cryptography. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], no. 4 (52), pp. 71-88. DOI: 10.48612/jisp/75dp-p3ed-hrmk
2. S. Fomicheva, and S. Bezzateev (2022). Modification of the Berlekamp-Massey algorithm for explicable knowledge extraction by SIEM-agents. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373(5), 052033. DOI:10.1088/1742-6596/2373/5/052033
3. S. Mokaddem, et al. (2023). Taxonomy driven indicator scoring in MISP threat intelligence platforms. URL: <https://arxiv.org/pdf/1902.03914.pdf> (date of access – 22.04.2023)
4. Shilin He and Jieming Zhu (2023). Loghub: A Large Collection of System Log Datasets towards Automated Log Analytics. URL: <https://arxiv.org/pdf/2008.06448v1.pdf> (date of access – 22.04.2023)
5. Y. Kazato, Y. Nakagawa, Y. Nakatani (2020). Improving Maliciousness Estimation of Indicator of Compromise Using Graph Convolutional Networks. *Proceedings of the 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 10-13 January 2020, pp. 1-7.13. DOI:10.1109/CCNC46108.2020.9045113
6. Y. Wu, C. Huang, X. Zhang, H. Zhou (2020). GroupTracer: Automatic Attacker TTP Profile Extraction and Group Cluster in Internet of Things. *Secur. Commun. Netw.* URL: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1155%2F2020%2F8842539>. DOI:10.1155/2020/8842539 (date of access – 22.04.2023)
7. A. Ramsdale, S. Shiales, N. Kolokotronis (2023). A Comparative Analysis of Cyber-Threat Intelligence Sources, /Formats and Languages. *Electronics* 2020, 9 (5) :824. URL: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Felectronics9050824>. DOI:10.3390/electronics9050824 (date of access – 22.04.2023)
8. S. Gong, C. Lee (2021). Cyber Threat Intelligence Framework for Incident Response in an Energy Cloud Platform. /*Electronics* 2021, 10 (3) 239. URL <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Felectronics10030239> DOI:10.3390/electronics10030239 (date of access – 22.04.2023)
9. M. Kumar, M. Hanumanthappa, T.V.S. Kumar (2012). Intrusion Detection System using decision tree algorithm. *Proceedings of the 2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology*, Chengdu, China, 9-11 November 2012, pp. 629-634. DOI:10.1109/ICCT.2012.6511281.
10. Y. Li, J. Xia, S. Zhang, J. Yan, X. Ai, K. Dai (2012). An efficient intrusion detection system based on support vector machines and gradually feature removal method. *Expert Syst. Appl.* 2012, no. 39, pp. 424-430. DOI:10.1016/j.eswa.2011.07.032.
11. W.C. Lin, S.W. Ke, C.F. Tsai (2015). CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors. *Knowl.-Based Syst.*, no. 78, pp. 13-21. DOI:10.1016/j.knsys.2015.01.009.
12. A.A. Aburomman, M.B. Ibne Reaz (2016). A novel SVM-KNN-PSO ensemble method for intrusion detectionsystem. *Appl. Soft Comput.*, no. 38, pp. 360-372. DOI:10.1016/j.asoc.2015.10.011.
13. C. Yin, Y. Zhu, J. Fei, X. He (2017). A Deep Learning Approach for Intrusion Detection Using Recurrent Neural Networks. *IEEE Access*, no. 5, pp. 21954-21961. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2762418.
14. A.L. Buczak, and E. Guven (2016). A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1153-1176, Secondquarter 2016, DOI 10.1109/COMST.2015.2494502.
15. H. Liu, B. Lang. Machine learning and deep learning methods for intrusion detection systems: A survey. *Applied Sciences*, no. 9(20), pp. 4396 DOI:10.3390/app9204396
16. N. Shone, et al. (2020). Deep learning for anomaly detection: A review. *ACM Comput. Surv.*, vol. 1, No. 1, Article 1, <https://arxiv.org/pdf/2007.02500.pdf> (date of access - 22.04.2023)
17. Chalapathy, R., and Sanjay, H. Deep anomaly detection: A survey. In book: *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases^ 2017*. pp. 36-51. DOI:10.1007/978-3-319-71249-9_3
18. K. Javid, et al. (2023). Compromise-free Bayesian neural networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.12211.pdf> (date of access – 22.04.2023)
19. S.G. Fomicheva, A.V. Konev (2014). Adaptive control system for silicon oxide concentration in slags at processing copper-nickel ores. *Programmye produkty i sistemy* [SOFTWARE & SYSTEMS], no. 3, pp. 131-140. DOI:10.15827/0236-235X.107.131-140
20. S.G. Fomicheva (2017). Theoretical aspects of knowledge base quantization in multi-agent systems. *Informacionno-upravljajushhie sistemy* [Information and control systems], no. 3 (88), pp. 2-10. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2017.3.2
21. S. Bezzateev, S. Fomicheva (2020). Soft multi-factor authentication. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020*, pp. 9131537. DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131537

Information about author:

Svetlana G. Fomicheva, PhD, Full Professor, Professor at the Department of Information Security, St. Petersburg University of Aerospace Instrumentations, St. Petersburg, Russia

THREAT ANALYSIS AND SECURITY OF PERSONAL DATA USING USER DEVICES WITH EYE-TRACKERS

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-56-62

Ilya Safonov,*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia***Mikhail Vyatkin,***Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia***Olesya Hizhenkova,***Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia***Kseniya Nezhivleva,***Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, k.i.nezhivleva@mtuci.ru***Igor Vlasuyk,***Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia*

Manuscript received 08 June 2023;

Accepted 07 July 2023

Keywords: data personalization, data protection, privacy, eye-tracking, information security

Eye-tracking technology has been extensively used in web development, marketing, and gaming mechanics because of the ability to obtain data regarding the trajectory and gaze fixation points. Eye movement information may be effectively used to study complex cognitive processes and human visual perception. However, a significant issue of leaking user privacy has arisen with the expansion of eye-tracking technology. Since the technology can obtain highly sensitive information regarding user behavior and preferences, measures for protecting personal data are required. At the current stage of the development of technology, research on threats and means to ensure the security of personal data has become a high priority in this field. Proper diligence in the development and use of eye-tracking devices is becoming an integral part of the process. Potential threats associated with collecting, storing, and transmitting information about users' gaze should be considered. Various methods have been proposed to ensure the security of personal data through the use of eye-tracking devices. The anonymization of data, which is the removal or replacement of personal identifying elements, appears to be among these. Transparency and user agreement to the collection and use of gaze data has also been an important aspect. This can be accomplished by explicitly providing information about the purpose of the data collection and the ability to control privacy. Threats related to the use of eye-tracking technology were considered, providing methods of ensuring the security of personal data. These are important steps in the development of the field to protect user privacy while improving the safety and ethics of using eye-tracking devices.

Для цитирования:

Илья Сафонов, Михаил Вяткин, Олеся Хиженкова, Ксения Неживлева, Игорь Власюк. Анализ угроз и средств обеспечения безопасности персональных данных при использовании пользовательских компьютеров со встроенными устройствами отслеживания взгляда // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 56-62.

For citation:

Ilya Safonov, Mikhail Vyatkin, Olesya Hizhenkova, Kseniya Nezhivleva, Igor Vlasuyk. Threat analysis and security of personal data using user devices with eye-trackers. *T-Comm*, vol. 17, no.8, pp. 56-62.

Introduction

The ubiquitous use of eye-tracking technology enables novel methods of interaction across a variety of devices. However, a possible privacy problem arises related to the collection of a considerable amount of personal information. Modern eye-tracking technologies have been available for decades and have been used in neuroscience, psychology, marketing studies, and simulations, as well as in game development and various research studies [1, 2, and 3]. Since 2009, the prices of eye-tracking devices have been falling, which has contributed to the rapid spread of the technology. Although eye-tracking devices are increasingly becoming popular, the loss of privacy is not transparent and evident to the average user and requires special attention. In accordance to statistics, more than 96 billion data records have been compromised on the Internet since 2009, and the number of users exposed to identity theft will increase every year [4].

The human gaze is unique for revealing subconscious activity which is complicated to control. Other human activity signals can be easily masked. The person can change voice, appearance, and force by pressing keys, however, the gaze can be controlled only partially [5, 6, 7]. The complexity of falsification demonstrates the considerable significance of user data being collected by third-party websites without the subject's agreement. The problems associated with understanding the privacy consequences of the ubiquitous usage of eye-tracking technology and the compromise between the accuracy and velocity of gaze-based authentication require an urgent solution to ensure the information security of subjects on the Internet.

The principle of operation of the eye tracking device

The eye tracker is a device which is installed or embedded in a user's equipment for measuring the position and movement of a human's eyes, or in other words, for determining the position of a user's gaze on a screen.

The eye tracker consists of cameras, light sources, and algorithms. A schematic representation of the positioning of the eye-tracking device is shown in Figure 1. The light sources produce a pattern of near-infrared light on the eyes. The cameras perceive an image of the user's eyes and the model. The image processing algorithm analyzes the peculiarities of the user's eyes and the reflection model. On the basis of the data, mathematical algorithms compute the eye position and gaze position.

Eye-tracking is a technology for tracking eye positions, also called gaze line or gaze point tracking technology. Eye-tracking is a sensor technology that is required to determine the point of the user's gaze in real-time. Visual attention direction is a piece of valuable information, which can be applied to a variety of purposes. The experience has demonstrated that the gaze of a person immersed in reflection is independent of the focus of consciousness [8]. The technology converts eye movements into a data stream containing information including eye position, gaze vector for each eye, and gaze point.

The eye tracker uses near-infrared light which is projected onto the eye and then uses a high-resolution camera to record the direction where the light is reflected from the surface of the cornea. A schematic representation of the human eye and eye tracker is shown in Figure 2. The data collected from eye-tracking devices are often provided in the format of coordinates and time, while

variations of the device also exist which provide additional information, such as changes in pupil size [9, 10].

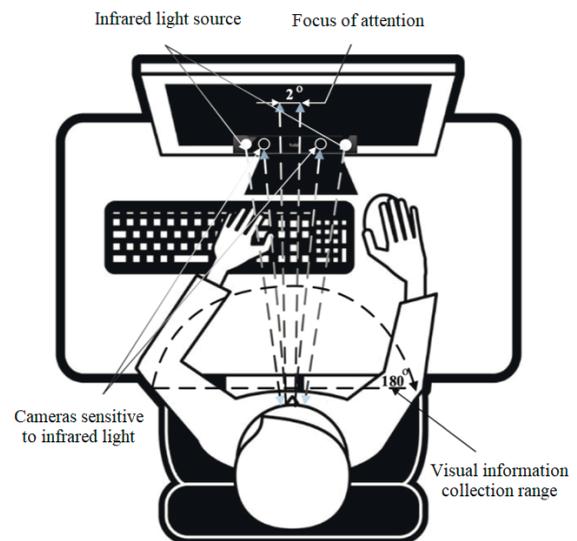


Fig. 1. Schematic representation of the positioning of the eye-tracker

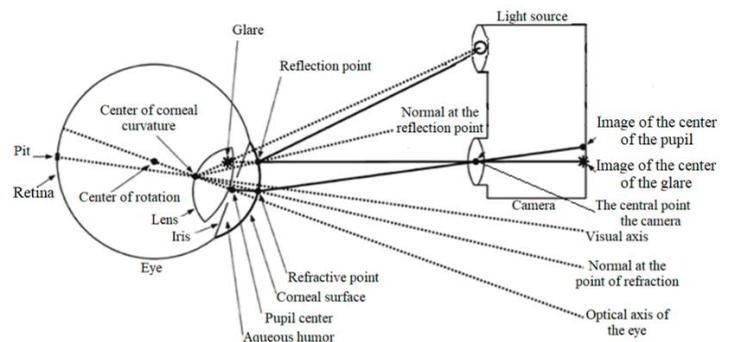


Fig. 2. Schematic representation of the human eye and the eye tracker

Information hidden in the gaze

On the basis of the data provided by the eye tracker, conclusions about human characteristics can be obtained. A brief description of several attributes determined by the gaze is presented in table 1.

The user's age can be indicated by the scanning trajectory, the change of interests, and the factors influencing the choice of an appropriate source. Assessment is formed with age and on the basis of prior knowledge and certain objectives. Age also affects saccades (rapid, strictly coordinated eye movements occurring simultaneously and in the same direction) during the execution of an assigned task [11]. On the basis of the obtained data, the approximate age of the user can be determined, as well as the symptoms of various neurological and behavioral disorders detectable in the existing eye movement disorders [12].

Multilingual users have a different reading pattern, since the fixation is on the dominant language and, as a consequence, different saccades [13]. Nutritional research has demonstrated that a person's body mass index can be estimated by presenting a set of food images with various nutrient contents, leading to a determination of the user's body mass index using pupil dilation fixation [14].

When people meet, attention is primarily directed to the person's face. By algorithmically tracking the user's gaze to the face image on the screen, conclusions can be deduced regarding the familiarity of the person with the user. The user's gaze is attracted to a group of people on the basis of race, social level, and gender [15]. Moreover, a person is also attracted to a visually appealing face, as a result of which identification of the gender to which the user is attracted is possible. An additional characteristic detectable by gaze is the user's health condition. As an example, people with autism have different facial scans and rely on other considerations when selecting an object of attention [16]. The change in the radius of a person's pupil can also contain information. A dilated pupil frequently indicates a degree of interest. Several studies have demonstrated that women's pupil changes while viewing illustrations with their partners are related to the hormonal cycle [17]. A pupil change may also identify the user's state of drowsiness or prostration. Generally, the normal pupil size is 2.0-4.0 millimeters (mm) in bright light and 4.0-8.0 mm in darkness. Pupil size in darkness and in natural light is illustrated in Figure 3. The pupil size in the usual human condition depends on the brightness of the monitor and natural light.

Table 1

A brief description of several attributes determined by the gaze

Attribute	Source
Age	Gaze trajectory, eye tremor
Gender	Gaze trajectory
Race	Gaze trajectory
Body mass index	Pupil dilation
Sexual preferences	Pupil dilation, gaze trajectory
Hormonal cycle	Pupil dilation
Health condition	Any changes

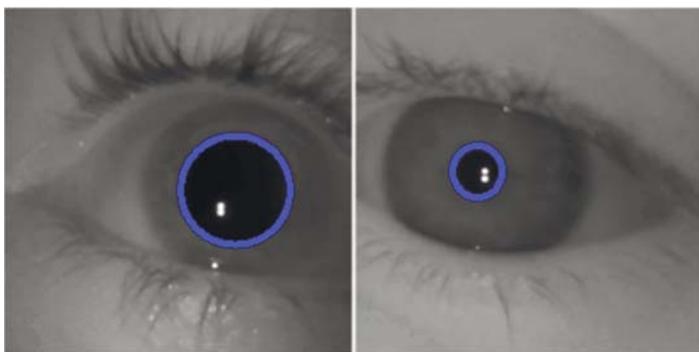


Fig. 3. The left side is the human pupil in darkness and the right side in natural light exposure

Threats and means of ensuring the security of personal data while using custom computers with integrated eye-trackers

Information leakage of identity and interests violates the principle of confidentiality of information self-identification. Users become unable to independently determine the way information about them is shared with others [18]. In accordance with statistics, the amount of leakage has been increasing annually and is expected to remain on the rise. The number of leaks and the volume of compromised records in the world are presented in table 2.

The identification and authentication methods restrict access to network resources. Biometric data is used for the implementation of access opening, the leakage of which would cause the impossibility of reuse because of the impossibility of replacement. Figure 4 represents a graph of leakage from 2009 to 2025.

For instance, patients' medical records contain a lot of personal information which is nearly impossible to anonymize. Information leakages are associated with the identification of a person in 99 instances of 100.

During the mid-1990s, Massachusetts published medical records summarizing the medical files of every state employee. The governor publicly assured the data remained anonymous, removing the identifying details - name, address, and social security number. In a short time thereafter, the governor received the medical records including personal information through the mail. In 2022, about 20% of all healthcare-related organizations in Russia had experienced information leaks, 45% of which were non-anonymous, personal data [19]. Information about the city, sex, and date of birth can be used to identify 50% of the people, and with additional information about the zip code, the possibility arises to identify about 85% of the people [20].

Table 2

Amount of leakage and compromised records worldwide

Year	Amount of leakage	Volume of compromised data records in billions	Amount of records per leakage
2009	747	0.07	93 708
2010	794	0.65	818 639
2011	801	0.22	274 656
2012	934	0.37	396 145
2013	1143	0.56	489 938
2014	1395	0.77	551 971
2015	1505	0.97	644 518
2016	1556	3.15	2 024 421
2017	2131	13.29	6 236 508
2018	2253	7.28	3 231 247
2019	2509	13.7	5 460 342
2020	2395	11.06	4 617 954
2021	4145	22.1	5 331 724
2022	4100	21.8	5 317 073
Estimated leakage			
2023	3760	19.75	5 252 659
2024	4095	22.24	5 431 013
2025	4435	24.9	5 614 430

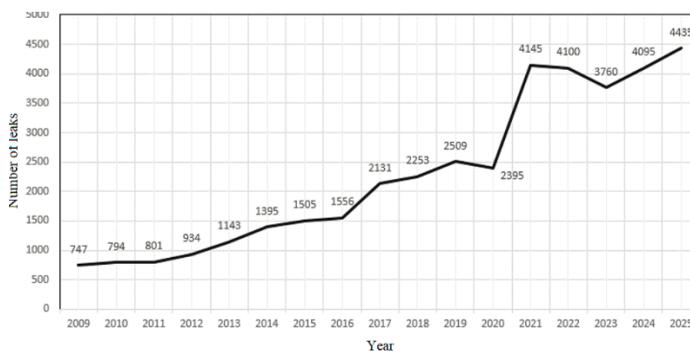


Fig. 4. Amount of leakage from 2009 to 2025

The Netflix database of 100 million records with people evaluating movies has contributed to the realization of identifying 70% of people using only ratings for 2 movies and approximate time [21]. On the basis of the data collected by the eye tracker, a person may be identified with a 90% probability, knowing only 3 parameters: age, sex and medical conditions.

Therefore, with reference being made to the information presented previously, the conclusion can be made that the necessity of developing identity theft protections is indisputable. The user should be allowed to limit data collection and be informed about the collection of confidential information and the potential consequences. Several methods are available to reduce the collection of personal data while using custom computers with embedded eye-tracking devices.

However, the possibility for users of viewing and storing all the output from the eye-tracking device remains an option. Operating system providers or the software developers of the eye tracker would create an interface proprietary to the eye tracker which would display a person's emotional state on the screen in real-time based on the eye tracker's output.

The majority of modern eye-tracking devices use infrared light to function. The method of physical barriers should be able to overcome the problem of data leakage. The proposed method is exceptionally straightforward, however, effective. The shielding relies on the use of glasses with lenses with infrared light filtering. Through software, eye-tracking data can be gathered from a conventional camera [22, 23, and 24]. The use of hidden cameras as eye-tracking devices entails the unauthorized collection of personal information. A shielding method is available to restrict the collection of personal information from conventional and hidden devices. However, the method has a problem if the technology becomes ubiquitous. Therefore, infrared light-filtered glasses would become irrelevant because of the necessity of constant interaction with eye-tracking devices.

The other method is the recognition of personal information related to gaze, and biometric data [25]. The user has to be aware of the scope, purpose of the collection and further manipulation of confidential information. All the data from the eye tracker will be particularly protected because a person can be identified on the basis of this data. The other method worth consideration is based on the use of a database of diligent content, including a variety of scenes of content viewing outcomes with areas of interest being marked by humans using eye-tracking devices. The database simulates personal data from a real-time eye tracker. Simulation can be achieved through the use of visual-motor system simulation [20]. In the presented method, the User Content block includes the user database containing the user's content.

The Regions of Interest (ROI) block contains the real regions of interest of users simulating human behavior while viewing content. Regions of interest represent areas in which the user focuses the most attention while viewing the content. The Virtual Area block creates a virtual area with a resolution several times higher than the actual size of the main monitor. Content from the average content base is transmitted to the virtual area. The installed eye-tracking system captures the user's gaze point and transmits the data to the coordinate displacement block. The vision model block generates points and saccades of the human gaze, considering the physiological features of vision, and replicating the vision of a real person.

The coordinate displacement block receives the original resolution of the monitor with the content, the human visual system model, and the regions of interest for the content, followed by the creation of acceptable displacement coordinates and transmitted to the virtual area. The pixel selection block displaces the main content with the original resolution over the virtual area by the coordinate calculated by the displacement block. Throughout the manipulation, the intruder would encounter intermingled data, the minority of which is real data, when attempting to steal the data. A schematic representation of the eye-tracking data simulation method is shown in Figure 5.

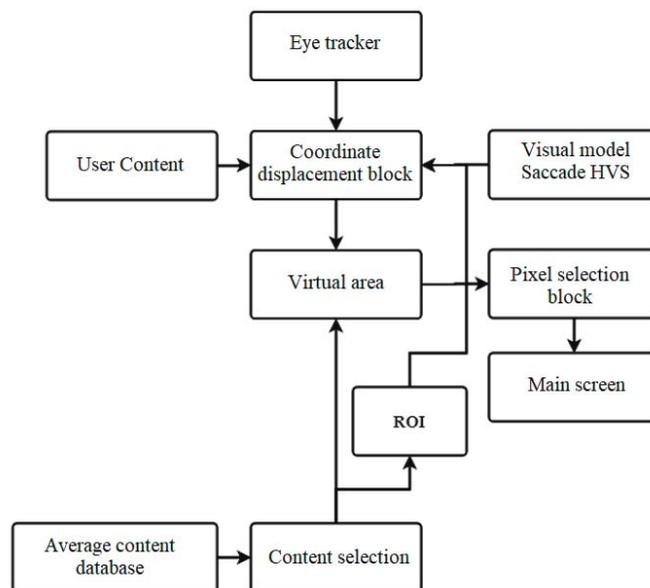


Fig. 5. Schematic representation of the method of simulating eye-tracking data

The most recent method being proposed is the implementation of a hardware-level status indicator in the eye tracker, enabling the unauthorized collection of confidential information to be avoided. Applying an indicator with multiple states, more significant information can be determined, in particular, whether the eye tracker is powered on, whether eye tracking is active, and the number of people in the collection boundaries [5].

Although the various security methods deserve separate attention, two methods are worth mentioning: the shielding method and the method using a database of diligent content. The shielding method completely limits data collection, but has many disadvantages. Conversely, the method based on the use of a database provides sufficiently high results of hiding personal information without noticeable disadvantages. A brief description of the advantages and disadvantages of the presented methods and technologies of personal data security is presented in Table 3.

The above methods do not consider the dependence of tracking accuracy on illumination. Tracking accuracy decreases with strong room illumination, respectively:

$$P = 100\% - \frac{A \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}{D \cdot 0.5} * 100\%, \quad (1)$$

where

D – pupil diameter

A – maximum possible displacement of the pupil center position

P – accuracy of pupil detection

α – visual field of the eye tracker

Table 3

A brief description of the advantages and disadvantages of the presented methods and technologies of personal data security

A method or technology for the protection of personal data using eye-tracking devices	Advantages	Disadvantages
Glasses with facial recognition protection	Blocking up to 100% infrared light, easy in use	Continuous use causes discomfort, high cost
Recognition of personal information related to gaze, biometric data	More vigilant attention to eye-tracking data from law enforcement agencies	No physical deterrent for the intruder.
Implementing a hardware-level status indicator in the eye-tracking device	Facilitates detection of unauthorized personal data collection	The need for a new model of eye-tracking device with an embedded indicator
Software for controlling the output from the eye-tracking device	Provides the possibility to analyze all output data from the eye tracker	No deterrent for the intruder.
Database simulating eye-tracking data	High reliability of data hiding, prevention of data at the stage of defining the regions of interest	High resource intensity

The average luminance after gamma correction is 18% of the white luminance. The brightness of the displays is set in accordance with the physiological characteristics, the optimal value is considered to be 100 cd/m². In conditions of natural or artificial light, the optimum brightness varies from 150 to 250 cd/m².

Recommendations for optimal monitor settings for maximum tracking accuracy and convenience of application can be developed, by using the data on the correlation between the tracking accuracy and the illumination. Figure 6 demonstrates the correlation between pupil size and illumination brightness [26, 27].

Conclusion

With the passage of time and the cost decline, eye-tracking devices have become increasingly popular in a variety of areas of life. Eye-tracking technology is unique among input mechanisms because of the identification of individual user characteristics which are complicated to falsify and conceal. Users agreeing to the collection of personal data for the purposes of improving the service are unintentionally exposed to leaks of sensitive personal information. Using, processing, storing, and analyzing information required to complete a particular task can reduce the risk of leaks of confidential data.

This research has revealed a problem with the widespread use of eye-tracking technology, which may threaten the privacy of the technology's users. The advantages of using eye-tracking technology in different areas are important, although, without the use of policies and information security measures, the technology would

not be able to function because of the unreliability of use and the security of personal data, despite the obvious superiorities.

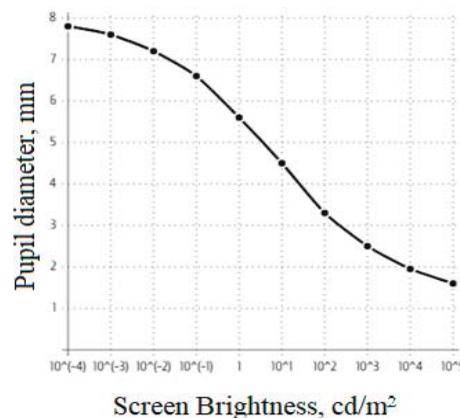


Fig. 6. Correlation between pupil diameter and illumination brightness

References

1. “Eye Tracking: The Complete Pocket Guide,” *IMOTIONS*, 2022 [online] Available: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/eye-tracking/>
2. A. Egorova, R. Baryshev and A. Mozhaeva, "Methodology of Researching Perception Identity of Regions of Users' Interests While Viewing Streaming Video Containing Various Content and Compression Artifacts," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092038.
3. A. Davydova, A. Mozhaeva, V. Hourani, "Methodology for studying the identity of perception of regions of user interests when watching streaming video containing various content and compression artifacts", *Synchronization, generation and signal processing systems*. 2022, vol. 13, no. 6, pp. 42-51.
4. “30+ data breach statistics and facts,” *Comparitech*, 2023 [online]. Available: <https://www.comparitech.com/blog/vpn-privacy/data-breach-statistics-facts>
5. J. Daniel, “Liebling and Sören Preibusch. Privacy considerations for a pervasive eye tracking world,” *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication (UbiComp '14 Adjunct)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2014, pp. 1169-1177. <https://doi.org/10.1145/2638728.2641688>
6. V. Mazin, M. J. Cree, L. Streeter, K. Nezhivleva and A. Mozhaeva, "Research and Application of the Adaptive Model of the Human Visual System for Improving the Effectiveness of Objective Video Quality Metrics," *2023 33rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Zilina, Slovakia, 2023, pp. 192-197, doi: 10.23919/FRUCT58615.2023.10142993.
7. A. Mozhaeva, V. Mazin, M.J. Cree, L. Streeter, “ Video Quality Assessment Considering the Features of the Human Visual System,” 2013. In: Yan, W.Q., Nguyen, M., Stommel, M. (eds) *Image and Vision Computing. IVCNZ 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol 13836. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25825-1_21
8. S. Uzzaman, S. Joordens, “The eyes know what you are thinking: Eye movements as an objective measure of mind wandering,” *Consciousness and Cognition: An International Journal*, no. 20(4), 2011, pp. 1882-1886. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.09.010>
9. How the eye production technology works and why it can be dangerous // RBC Trends, 2022[online] Available: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/635bbfb59a79477f31432b0d>
10. Andreas Bulling, Jamie A. Ward, and Hans Gellersen, “Real-Time Eye Tracking and Blink Detection with Deep Neural Networks,” *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*. 2020.

11. A. Borji, L. Itti, "Defending Yarbus: Eye movements reveal observers' task," *Journal of Vision*, no. 14(3):29, 2014, pp. 1-21, <http://www.journalofvision.org/content/14/3/29>, doi:10.1167/14.3.29.
12. D. P. Munoz, et al., "Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks," *Experimental brain research*, vol. 121, no. 4, 1998, pp. 391-400. doi:10.1007/s002210050473
13. "Privacy in Xbox One and Kinect," *Microsoft*, 2014 [online] Available: <http://www.microsoft.com/security/onlineprivacy/xbox.aspx>.
14. Graham, Reiko et al., "Body mass index moderates gaze orienting biases and pupil diameter to high and low calorie food images," *Appetite*, vol. 56, no. 3, 2011, pp. 577-86. doi:10.1016/j.appet.2011.01.029
15. Bar-Haim, Yair et al., "Nature and nurture in own-race face processing," *Psychological science*, vol. 17, no. 2, 2006, pp. 159-63. doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01679.x
16. Dalton, Kim M et al., "Gaze fixation and the neural circuitry of face processing in autism," *Nature neuroscience*, vol. 8, no. 4, 2005, pp. 519-26. doi:10.1038/nn1421
17. Laeng Bruno, and Liv Falkenberg, "Women's pupillary responses to sexually significant others during the hormonal cycle," *Hormones and behavior*, vol. 52, no. 4, 2007, pp. 520-30. doi:10.1016/j.yhbeh.2007.07.013
18. Reynolds, Osborne M., "Administrative Law Review," vol. 22, no. 1, 1969, pp. 101-06. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/40708684>. Accessed 29 June 2023.
19. "Data leaks in medical institutions," *ZDRAV.EXPERT*, 2023 [online] Available: <https://zdrav.expert/>
20. M. Vyatkin, A. Potashnikov, V. Selivanov, I. Vlasuyk, K. Nezhivleva, A. Mozhaeva, "Method of Preventing Leakage of Personal Data Through Eyetracking Modules of User Devices", *T-Comm*, vol. 16, no.7, pp. 44-51. (in Russian)
21. Ian H. Witten, E. Frank, M.A. Hall, "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques", *Elsevier Science & Technology*, Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 2016, pp 665.
22. Online Eye Tracking Software // Grabador de mirada [online] Available: <https://redirect.gazerecorder.com/>
23. E. Wood, A. Bulling, A. Schmidt, "Eye Tracking for Everyone," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, 2022, no. 4(2), pp. 1-23.
24. S. Ahuja, P. Rao, and V. Sarode. "Real-Time Eye Gaze Tracking with Webcam and Image Processing". 2021.
25. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 33450. "Graphical symbol for information about surveillance with optical-electronic devices (video-info signs)," 2014, p. 11.
26. K. Krafka, A. Khosla, P. Kellnhofer, H. Kannan, S. Bhandarkar, W. Matusik, A. Torralba, "Eye tracking for everyone with robust pupil detection," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 602-611.
27. L. Fan, X. Wei, H. Fu, T. Liu, "Accurate eye gaze estimation with a 3D eyeball model and calibration refinement," *Neurocomputing*, 2021, no. 449, pp. 264-274.

АНАЛИЗ УГРОЗ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЬЮТЕРОВ СО ВСТРОЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ВЗГЛЯДА

Илья Сафонов, Михаил Вяткин, Олеся Хиженкова, Ксения Неживлева, Игорь Власюк,

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, k.i.nezhivleva@mtuci.ru

Аннотация

Технология отслеживания взгляда широко используется в веб-разработке, маркетинге и игровых механиках благодаря возможности получения данных о траектории и точках фиксации взгляда. Эта информация о движениях глаз может быть эффективно использована для изучения сложных когнитивных процессов и визуальной восприимчивости человека. Однако, с распространением технологии отслеживания взгляда возникает серьезная проблема утечки конфиденциальности пользователей. Поскольку данная технология может получать высоко чувствительную информацию о пользовательском поведении и предпочтениях, необходимы меры для защиты персональных данных. На данном этапе развития технологий исследования угроз и средств обеспечения безопасности персональных данных становятся приоритетными задачами в данной области. Проявление должной осторожности при разработке и использовании устройств отслеживания взгляда становится неотъемлемой частью процесса. Необходимо учитывать потенциальные угрозы, связанные с сбором, хранением и передачей данных о взгляде пользователей. Для обеспечения безопасности персональных данных при использовании устройств отслеживания взгляда предлагаются различные методы. Одним из них является анонимизация данных, то есть удаление или замена идентифицирующих личность элементов. Также важным аспектом является обеспечение прозрачности и согласия пользователей на сбор и использование данных о взгляде. Это может быть достигнуто путем ясного предоставления информации о целях сбора данных и возможности контроля за своей конфиденциальностью. В данной работе рассмотрены угрозы, связанные с использованием технологии отслеживания взгляда, и предложены методы обеспечения безопасности персональных данных. Это важные шаги в развитии данной области, которые помогут защитить конфиденциальность пользователей и сделать использование устройств отслеживания взгляда более безопасным и этичным.

Ключевые слова: персонализация данных, защита информации, конфиденциальность, отслеживание взгляда, информационная безопасность.

Литература

1. Eye Tracking: The Complete Pocket Guide // IMOTIONS, 2022 [online] Available: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/eye-tracking/>
2. Egorova A., Baryshev R., Mozhaeva A. Methodology of Researching Perception Identity of Regions of Users' Interests While Viewing Streaming Video Containing Various Content and Compression Artefacts // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092038.
3. Давыдова А., Можалева А., Хурапи В. Методика исследования идентичности восприятия областей интересов пользователя при просмотре потокового видео, содержащего различный контент и артефакты сжатия // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13, № 6. С. 42-51. EDN IZCJOE.
4. 30+ data breach statistics and facts // Comparitech, 2023[online] Available: <https://www.comparitech.com/blog/vpn-privacy/data-breach-statistics-facts/>
5. Daniel J. Liebling and S?ren Preibusch. Privacy considerations for a pervasive eye tracking world // Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication (UbiComp '14 Adjunct). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2014, pp. 1169-1177. <https://doi.org/10.1145/2638728.2641688>
6. Mazin V., Cree M. J., Streeter L., Nezhivleva K., Mozhaeva A. Research and Application of the Adaptive Model of the Human Visual System for Improving the Effectiveness of Objective Video Quality Metrics // 2023 33rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Zilina, Slovakia, 2023, pp. 192-197, doi: 10.23919/FRUCT58615.2023.10142993.
7. Mozhaeva A., Mazin V., Cree M. J., Streeter L. Video Quality Assessment Considering the Features of the Human Visual System. 2023. In: Yan, W. Q., Nguyen, M., Stommel, M. (eds) Image and Vision Computing. IVCNZ 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13836. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25825-1_21
8. Uzzaman S., Joordens S. The eyes know what you are thinking: Eye movements as an objective measure of mind wandering // Consciousness and Cognition: An International Journal, 2011, no. 20(4), 1 pp. 882-1886. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.09.010>
9. How the eye production technology works and why it can be dangerous // RBC Trends, 2022 [online] Available: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/635bbfb59a79477f31432b0d>
10. Andreas Bulling, Jamie A. Ward, Hans Gellersen. Real-Time Eye Tracking and Blink Detection with Deep Neural Networks // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems. 2020.
11. Borji A., Itti, L. Defending Yarbus: Eye movements reveal observers' task // Journal of Vision, 2014, no. 14(3), pp. 29, 1-21, <http://www.journalofvision.org/content/14/3/29>, doi:10.1167/14.3.29.
12. Munoz D P et al. Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks // Experimental brain research vol. 121, no. 4. 1998, pp. 391-400. doi:10.1007/s002210050473
13. Privacy in Xbox One and Kinect // Microsoft, 2014. [online] Available: <http://www.microsoft.com/security/onlineprivacy/xbox.aspx>.
14. Graham Reiko et al. Body mass index moderates gaze orienting biases and pupil diameter to high and low calorie food images // Appetite vol. 56, no. 3, 2011, pp. 577-86. doi:10.1016/j.appet.2011.01.029
15. Bar-Haim Yair et al. Nature and nurture in own-race face processing // Psychological science vol. 17, no. 2, 2006, pp. 159-63. doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01679.x
16. Dalton Kim M. et al. Gaze fixation and the neural circuitry of face processing in autism // Nature neuroscience vol. 8, no. 4, 2005, pp. 519-26. doi:10.1038/nn1421
17. Laeng Bruno, Liv Falkenberg. Women's pupillary responses to sexually significant others during the hormonal cycle // Hormones and behavior vol. 52, no. 4, 2007, pp. 520-30. doi:10.1016/j.yhbeh.2007.07.013
18. Reynolds Osborne M. Administrative Law Review, vol. 22, no. 1, 1969, pp. 101-06. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/40708684>. Accessed 29 June 2023.
19. Data leaks in medical institutions // ZDRAV.EXPERT, 2023. [online] Available: <https://zdrav.expert/>
20. Vyatkin M., Potashnikov A., Selivanov V., Vlasuyk I., Nezhivleva K., Mozhaeva A. Method of Preventing Leakage of Personal Data Through Eyetracking Modules of User Devices // T-Comm, vol. 16, no.7, pp. 44-51.
21. Ian H. Witten, E. Frank, M.A. Hall. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques // Elsevier Science & Technology, Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 2016, pp 665.
22. Online Eye Tracking Software // Grabador de mirada. [online] Available: <https://redirect.gazerecorder.com/>
23. Wood E., Bulling A., Schmidt A. Eye Tracking for Everyone // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), 2022, no. 4(2), pp. 1-23.
24. Ahuja S., Rao P., Sarode V. Real-Time Eye Gaze Tracking with Webcam and Image Processing. 2021.
25. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 33450. symbol for information about surveillance with optical-electronic devices (video-info signs), 2014, p. 11.
26. Krafka, K., Khosla, A., Kellnhofer, P., Kannan, H., Bhandarkar, S., Matusik, W., Torralba, A. Eye tracking for everyone with robust pupil detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021, pp. 602-611.
27. Fan L., Wei X., Fu H., Liu T. Accurate eye gaze estimation with a 3D eyeball model and calibration refinement // Neurocomputing, 2021, no. 449, pp. 264-274.

ON PROBLEM OF PROPERTIES OPTIMIZING FOR VISCOELASTIC MATERIALS USING THE BEGLEY-TORVIK EQUATION

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-63-68

Marina V. Yashina,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia,
yash-marina@yandex.ru

Manuscript received 24 June 2023;
Accepted 30 July 2023

Mukhamed T. Aleroev,
Moscow Automobile and Road Construction State Technical
University, Moscow, Russia,
aleroevmuhammad@gmail.com

Keywords: *Begley-Torvik equation, fractional calculus, viscoelasticity, boundary value problem, elastomeric bearing, parameter identification, viscoelastic medium*

Recently, fractional calculus has been the focus of attention of many researchers in the field of science and technology, since a more detailed study of physical processes leads to the need to complicate the mathematical models that describe them, and, consequently, to the study of the behavior of solutions of differential equations containing, along with "ordinary", or "classical", derivative, also fractional. Processes of this kind can include: studies of continuous media with memory, fluid filtration in media with fractal geometry, physical aspects of stochastic transfer and diffusion, mathematical models of a viscoelastic body, models of damped oscillations with fractional damping (for example, vibrations of rocks during earthquakes or vibrations nanoscale sensors), models of non-local physical processes and phenomena of a fractal nature; climate models, etc. The paper studies boundary value problems for the equation of motion of an oscillator with viscoelastic damping (the Begley-Torvik equation) in the case when the damping order is greater than zero but less than two. Such problems model many physical processes, in particular, the vibration of a string in a viscous medium, the change in the deformation-strength characteristics of polymer concrete under loading, etc. This paper is devoted to optimizing the parametric control of the Begley-Torvik model. A fundamentally new, efficient algorithm is proposed that allows estimating the parameters of a model of real material.

Information about authors:

Marina V. Yashina, Professor of Department of Higher mathematics, doctor of technical sciences, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Mukhamed T. Aleroev, Assistant of Department of Higher mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

Для цитирования:

Яшина М.В., Алероев М.Т. К проблеме оптимизации свойств вязкоупругих материалов с помощью уравнения Бегли-Торвика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 63-68.

For citation:

Yashina M.V. Aleroev M.T. On problem of properties optimizing for viscoelastic materials using the Begley-Torvik equation. *T-Comm*, vol. 17, no.8, pp. 63-68.

Introduction

Fractional calculus is a mathematical field that deals with integrals and derivatives of arbitrary order. Although the concept dates back to 1695, it was only in the last century that the most impressive advances were made. In particular, over the past three decades, fractal theory [1], fractional differential equations have found applications in physics, signal processing, engineering, biological sciences and finance [2, 3, 4].

First of all, we note that fractional derivatives with respect to space can be used to model anomalous diffusions or dispersions, and fractional derivatives with respect to time can be used to model some processes with "memory".

It is known that it is expedient to model the stress-strain state of viscoelastic materials using fractional differential operators leading to differential equations with fractional derivatives.

Of particular interest are second-order differential equations with fractional derivatives in lower terms. Such equations, in particular, are used to describe the vibration of a string, taking into account friction in a medium with fractal geometry, or to simulate changes in the deformation and strength characteristics of polymer concrete (polymer concrete is a type of concrete mixture made on the basis of one of the synthetic resins) under the action of loads.

On methods of using fractional calculus in problems of viscoelastic media modeling

In this paper, samples of polymer concrete based on polyester resin were taken for research. As a polyester resin, polyesters based on diene and dichloride-1,1-dichloro-2,2 di (n-carboxy-phenyl) ethylene. Although all polyester resins are similar, a wide range of mechanical properties can always be achieved in their production by changing the basic constituents and their proportions. In our case, polymer concrete is represented as a set of mineral aggregate granules in a viscous medium of polyester resin.

When modeling the deformation-strength characteristics of polymer concrete, it can be represented as a set of solid filler granules located in a viscoelastic medium. Then [3], the transverse motion of the filler granule under the action of loads (applying an external force) can be described by the equation (this equation is called the Begley-Torvik equation [3]) of the fractal (fractional) oscillator:

$$m \cdot u''(x) + \nu \cdot D_{0x}^\alpha u(x) + k \cdot u(x) = \zeta(x), \quad (1)$$

where $u(x)$ – granule displacement, $x \in [0; l]$,

m – filler granule weight,

ν – resin viscosity modulus,

k – resin stiffness modulus;

α – medium viscoelasticity parameter,

ζ – external force.

Definition: $D^\alpha u(x)$ – is the fractional differential operator of order $\alpha \in [0; 2]$ in Riemann-Liouville sense, i.e.:

- 1) for $\alpha \in [0; 1]$
- 2)

$$D^\alpha u(x) = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^x \frac{u(\tau) d\tau}{(x-\tau)^\alpha} \right),$$

where $\Gamma(x)$ – is the Euler’s gamma – function;

- 3) for $\alpha \in [1; 2]$ we have

$$D_{0x}^\alpha u(x) = \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{1}{\Gamma(2-\alpha)} \int_0^x \frac{u(\tau) d\tau}{(x-\tau)^{\alpha-1}} \right).$$

Note [4], that for $\alpha = 1$, the equation (1) transforms to the well-known equation

$$m \cdot u''(x) + \nu \cdot u'(x) + k \cdot u = \zeta(x), \quad (2)$$

which describes the movement (in asphalt concrete) of a granule of mass m under the action of a load $\zeta(x)$ from moving vehicles, which is widely used in road construction.

It should be noted [5]-[7] that rutting of roads can be formed with any type of road surface.

For $\alpha=0.7$ the equation

$$m \cdot u''(x) + \nu \cdot D_{0x}^{0.7} u(x) + k \cdot u = \zeta(x), \quad (3)$$

beings [2] a good constitutive model for elastomeric bearings (elastomeric bearings are currently used as insulating bearings to protect building bridges, etc. from earthquakes).

This paper is devoted to the optimization of the parametric control of the Begley-Torvik model. A fundamentally new, efficient algorithm has been proposed that allows estimating the parameters of a model of real materials.

First of all, we give the following well-known statement [8, 14].

Theorem 1. Solution of the boundary value problem

$$u''(x) + cD^\alpha u(x) + \lambda u(x) = 0; \quad (4)$$

$$u(0) = 0 \quad u(l) = 0. \quad (5)$$

can be found using a sequence of recurrent kernels and written out as a power series

$$u(x) = x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m} x^{2n+1-m\alpha}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)} \quad (6)$$

The eigenvalues are found as solutions to the implicit equation:

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)} 1^{2n+1-m\alpha}. \quad (7)$$

Relation (7) will be used below to determine the order of the fractional derivative.

Method for determining the parameters of the Begley-Torvik model

It is known [3] that to model the deformation-strength characteristics of viscoelastic materials, the equation

$$\sigma(t) = E_1 D^\beta \varepsilon(t), \quad (8)$$

where $\sigma(t)$ – the stress, $\varepsilon(t)$ – the deformation, E_1 and $0 < \beta < 1$ – parameters of the material. Here,

$$D^\beta f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^t \frac{f'(\tau)}{(t-\tau)^\beta} d\tau \quad (9)$$

fractional Caputo derivative, of order β , to be determined.

In numerous publications of the last ten years, the problem of identifying the parameters of fractional models is mainly solved

at the theoretical level, for example, using spectral analysis methods. As noted in publications, in particular [9] V.P. Radchenko E.N. Ogorodnikov L. G. Ungarova, in the papers of T. S. Alerov [8], [10], the model parameters are determined based on several characteristic points obtained in the experiment by substituting the strain values into the analytical solutions of the corresponding problem.

In this paper, the same technique is used to determine the order of the fractional derivative in the problem for the Begley-Torvik equation

$$u''(x) + cD^\alpha u(x) + \lambda u(x) = 0; \quad (10)$$

$$u(0) = 0 \quad u'(l) = 1; \quad (11)$$

here $D^\alpha u(x)$ – is the fractional differential operator of order $\alpha \in [0; 2]$.

In [10],[13], solution (10) -(11) was calculated using a sequence of recurrent kernels and written out as a power series,

$$u(x) = x - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)} x^{2n+1-m\alpha} \quad (12)$$

In order to shade the main ideas of this technique, we first of all dwell on the paper [10],[13], which describes a technique for determining the order of the fractional derivative.

In this paper, to determine the parameter β , in (8) it is assumed that the tension of the material is given linearly.

$$\varepsilon(t) = kt \quad (13)$$

Taking into account the well-known formula

$$D^\beta t = \frac{t^{1-\beta}}{A(2-\beta)}$$

we obtain

$$\sigma(t) = \frac{kE_1}{\Gamma(2-\beta)} t^{1-\beta} = \frac{k_1 E_1}{\Gamma(2-\beta)} [\varepsilon(t)]^{1-\beta}$$

Designated as $A = \frac{k^\beta E_1}{\Gamma(2-\beta)}$, we have

$$\sigma(t) = A[\varepsilon(t)]^{1-\beta}. \quad (14)$$

Thus, in this case, the stress depends on the strain according to the power law. To determine the β it suffices to know the results of two measurements $\varepsilon(t_1)$ and $\varepsilon(t_2)$.

Of course, in nature, deformation is a far from linear function. But if it is possible to establish the parameter β for the case of linear loading, then, by the existence and uniqueness theorem for equation (8), it can be argued that this parameter is invariant and does not depend on the type of loading function.

In this paper we apply the same technique to determine the parameters of the Begley-Torvik model. To do this, we divide the interval (0,2) where the possible order of the fractional derivative is located into N equal parts (N is any natural number). And consider the tasks

$$u''(x) + cD^{\alpha_i} u(x) + \lambda u(x) = 0; \quad i = 1 \dots N; \quad (15)$$

$$u(0) = 0, \quad u'(l) = 1; \quad (16)$$

Figure 1 shows graphs for solving these problems for various values of the order of fractional differentiation.

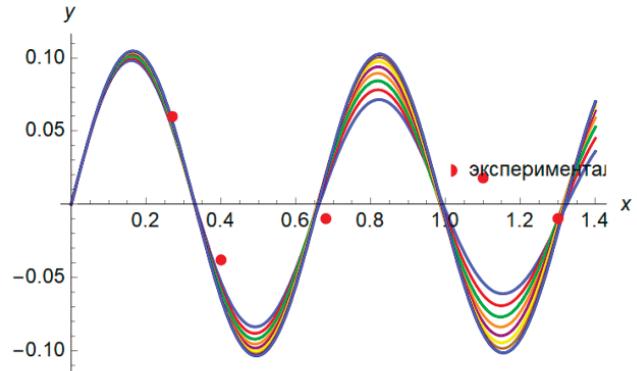


Figure 1. Problem solving graphs for $0 < \alpha < 2$

First of all, we note:

a) that we proceed from the fact that the process under study is described by one of the tasks (15-16);

b) the existence and uniqueness theorem holds for these problems;

c) no matter how large N is, there is an interval (γ, β) included in (0,2), where the graphs for solving problems (15-16) do not intersect.

And now we will make the following important remark: when planning an experiment, take into account that we will be interested in experimental data or field measurements of the quantity $u(x)$ for $x \in (\gamma, \beta)$.

Now take any point x_0 from the interval (γ, β) and mark on the plane, where the graphs of solutions are shown, a point with coordinates $(x_0, u(x_0))$ ($u(x_0)$ we obtain from the experience).

The graph from figure 1, which passes through this point, will be the graph of the solution of the problem that this process models.

In order to more accurately determine the order of the fractional derivative, it is necessary to solve the following equation for α

$$u(x_0) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m} x_0^{2n+1-m\alpha}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)} \quad (17)$$

Generally speaking, this equation can have several roots (this does not contradict the existence and uniqueness theorem, since, generally speaking, the roots are found not of equation (17), but of the equation

$$u(x_0) = x_0 + \sum_{n=1}^N (-1)^n \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m} x_0^{2n+1-m\alpha}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)}).$$

Of these, the desired root will be the one that induces the graph, which at the point x_0 deviates less than all other graphs from the point $(x_0, u(x_0))$.

For an approximate calculation of the sum of the series in (17), we take the first 80 terms. Thus, we solve numerically for α the following equation:

$$u(x_0) = x_0 + \sum_{n=1}^{80} (-1)^n \sum_{m=0}^n \frac{\binom{n}{m} c^m \lambda^{n-m} x_0^{2n+1-m\alpha}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)}$$

Once again, we note that, for our polymer concrete $c=1.2, \lambda = 89$.

Note that there are practically no papers devoted to solving such equations, and therefore questions related to the accuracy of the solutions obtained remain open.

Results analysis

We test the above method on the example of the above polymer concrete.

In order to test the technique, we take the experimental data obtained in [10]. Values for polymer concrete samples based on PES (dian and dichloanhidride-1,1-dichloro-2,2-diethylene) are presented in Table 1.

Table 1

Experimental points for polymer concrete samples

$x_i(c)$	0,27	0,4	0,68	1,1	1,3	1,6
U_i	0,06	-0,038	-0,0098	0,018	-0,0097	-0,01

In order to determine the order of the fractional operator, consider the integral curves of the following Cauchy problem (Fig. 2)

$$my'' + cD_{0x}^\alpha y + \lambda y = 0, \\ y(0) = 0, \quad y'(0) = 1,$$

for different α, c, λ .

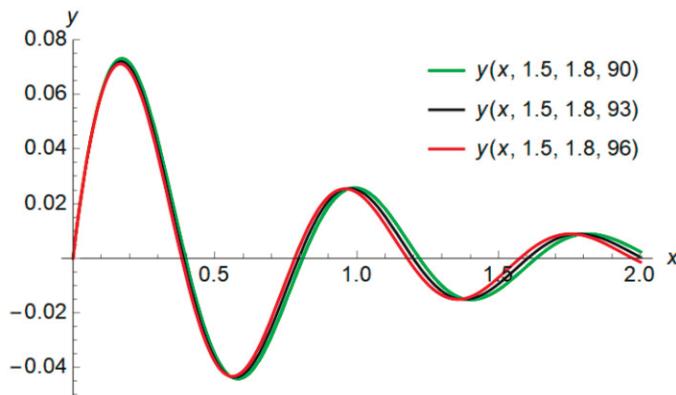


Fig. 2. Solutions of the Cauchy problem for the oscillator model with RT damping at $\alpha = 1.5, c = 1.8, \lambda = 90, 93, 96$

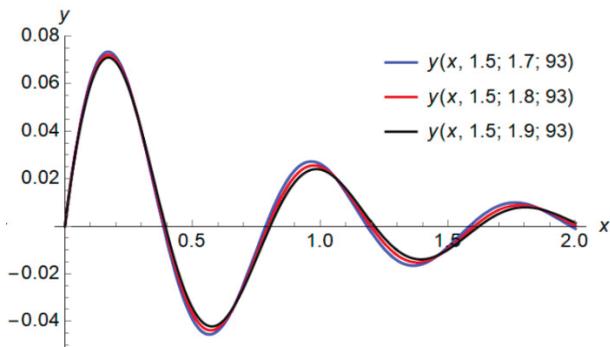


Fig. 3. Solutions of the Cauchy problem for the oscillator model with RT damping at $\alpha = 1.5, c = 1.7, 1.8, 1.9, \lambda = 93$

Analysis of the graphs in Figures 2 and 3 shows that to determine the order of the fractional derivative, it is sufficient to choose

an interval where these graphs do not intersect. Taking any point from this interval, we look at the value of the solution at this point. And this value is compared with experimental data. Experimental data [11] relevant for this case are given in Table 2.

Table 2

Experimental data

(0,46; 1,03)	(0,47; 1,02)	(0,48; 1,0198)	(0,49; 1,018)	(0,50; 1,0178)
(0,51; 0,93)	(0,52; 0,83)	(0,53; 0,5)	(0,54; 0,2)	(0,55; 0,18)
(0,56; -0,01)	(0,57; -0,3)	(0,58; -0,61)	(0,59; -0,93)	(0,60; -0,96)
(0,61; -0,21)	(0,62; -0,8)	(0,63; 0,21)	(0,64; 0,24)	(0,65; 0,301)
(0,66; 0,32)	(0,67; 0,38)	(0,68; 0,41)	(0,69; 0,43)	(0,70; 0,431)

To choose an interval where the graphs of the corresponding solutions do not intersect, we present the graphs of the solutions of the corresponding problems for different values of the order of fractional differentiation.

In accordance with our methodology, for the interval (γ, β) we can take the interval (0.35,0.45), and for the point x_0 we take $x_0=0.4$. And then the problem of finding α is reduced to solving the following equation

$$-0.038 = 0.4 + \sum_{n=1}^{80} (-1)^n \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \frac{1.2^m 89^{n-m} (-0.038)^{2n+1-m\alpha}}{\Gamma(2n+2-m\alpha)} \quad (19)$$

Making the corresponding calculations using MATLAB, we get that $\alpha=1.4$.

Thus, when it comes to samples of polymer concrete based on PES (dian and dichloanhidride-1,1-dichloro-2,2-diethylene), the equation of motion has the form

$$u''(x) + 1.2 \cdot D_{0x}^{1.4} u(x) + 89 \cdot u = 0 \quad (20)$$

The same problem was solved in the standard way in [10].

The unknown parameter α is located there minimizing the deviation of the theoretical curves from the experimental ones. That is, defining the deviation function by the least squares method

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^N (U_i - u(x_i, \alpha))^2$$

Here

$$u(x_i) = U_i, i = 1, \dots, N$$

several experimental points, and $u(x_i, \alpha)$ - theoretical points calculated by formula (12).

The unknown parameter α is selected minimizing the deviation of the theoretical curves from the experimental ones.

The accuracy of the result obtained by this standard method depends on the sample size (the larger the sample size, the more accurate the result) and how accurate the U_i measurements obtained as a result of the experiment are.

The application of our technique leads to much more accurate results and does not require the costs of the experiment, which are necessary when implementing the standard technique given in [10].

And finally, as shown in Figures 1-3, the frequencies and amplitudes of the oscillations of the granules depend on the parameter α . In turn α , as mentioned, it characterizes the viscoelasticity of the medium (i.e., it completely depends on the physicochemical properties of the resin). So that the oscillation amplitudes do not

go beyond the permissible limits, the intervals for changing α must also be clearly defined.

The method presented in this paper also solves this important problem. Since the optimal control of the parameter α makes it possible (using directed synthesis) to synthesize polyester resins with the required strength characteristics.

Let us give an example of using the developed technique in modeling viscoelastic properties and hysteresis damping of springs made of composite materials using fractional calculus [12]. In this case, the parameter on which the deflection of the spring depends (the spring test scheme is shown in Figure 4).

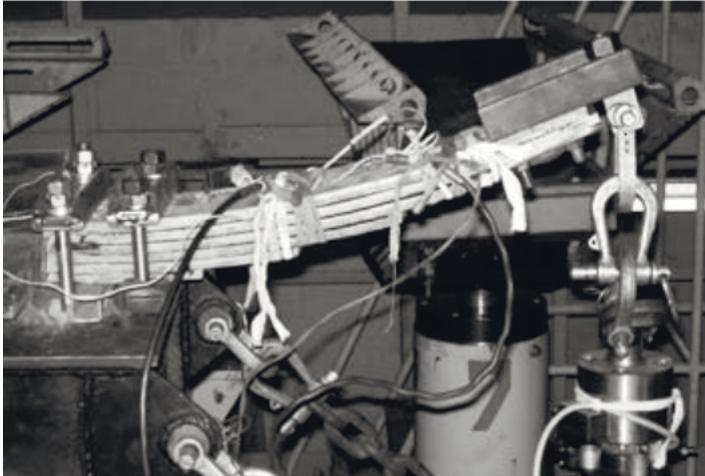


Fig. 4. Spring test is the order of the fractional derivative, the method of estimating which we have given above

Conclusion

The method of parametric identification of the order of a fractional derivative proposed in this paper allows us to solve a number of inverse problems in fractional calculus. In particular, to develop an effective method for optimizing the parametric control of the Bagley-Torvik model.

References

1. D.V. Georgievsky, M.V. Shamolin, "Results of science and technology. Modern Mathematics and its Applications. Thematic

reviews," Founders: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information RAS, vol. 205, pp. 3-9, 2022.

2. C.G. Koh, J.M. Kelly, "Application of fractional derivatives to seismic analysis of base-isolated models," First published: February 1990 <https://doi.org/10.1002/eqe.4290190207>

3. R. Bagley, P. Torvik, "Fractional Calculus – a Different Approach to the Analysis of Viscoelastically Damped Structures," *Aiaa Journal - AIAA J*, no. 21, pp. 741-74, 1983.

4. A.M. Kirillov, "Modeling of energy exchange processes in the road surface – vehicle system," 2015.

5. M.V. Yashina, P.I. Pospelov, I.A. Kuteinikov, "Influence of traffic flow distribution on the rutting of road surfaces," *Proceedings of the XIV all-russian multi-conference on management issues MKPU-2021. Materials of the XIV multi-conference in 4 volumes. Vol. 4. Rostov-on-Don – Taganrog, 2021*, pp. 107-110.

6. R.G. Abyshov, A.P. Buslaev, Yu.D. Kupriyanov, M.V. Yashina, "Distributed system for monitoring the maintenance of highways," *Vestnik MADI*, no. 1(24), 2011, pp. 79-85.

7. A.P. Buslaev, O.V. Zamotailov, P.I. Pospelov, M.V. Yashina, "On the restoration of pavement layers according to subsurface radar data (part 1)," *Bulletin of MADI (STU)*, 2009, pp. 89-96.

8. T.S. Aleroev, H.T. Aleroeva, "Problems of Sturm-Liouville type for differential equations with fractional derivatives," In Volume 2 Fractional Differential Equations; Kochubei, A., Luchko, Y., Eds.; De Gruyter: Berlin, Germany; Boston, MA, USA, 2019, pp. 21-46.

9. E.N. Ogorodnikov, V.P. Radchenko, L.G. Ungarova, "Mathematical models of nonlinear viscoelasticity with operators of fractional integro-differentiation," *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2018, no. 2, pp. 147-161.

10. T. Aleroev, S. Erokhin, "Parametric Identification of the Fractional Derivative Order in the Bagley-Torvik Model," *Mathematical Models and Computer Simulations*, no. 11, pp. 219-225.

11. E.R. Keharsaeva, V.G. Pirozhkov, "Modeling of changes in the deformation-strength characteristics of asphalt concrete under loading using fractional calculus," *Sat. Proceedings "Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media"*. Moscow, IPRIM RAS, 2016, pp.104-109.

12. N.N. Staroverov, "Modeling of viscoelastic properties and hysteresis damping of springs made of composite materials," *News of higher educational institutions. Engineering*, 2011, no. 8, pp. 25-34.

13. A. Elsayed, "The using of fractional calculus to study the deformation-strength characteristics of polymer concrete: Candidate of Physics and Mathematics," *MIPT*, Moscow 2023, 153 p.

14. T. Aleroev, "On completeness of the system of eigenfunctions for one differential operator of fractional order," *Differential Equations*, no. 36:6. 2000.

15. A.M. Nakhshuev, "Fractional Calculus and Its Application," Moscow: Fizmatlit, 2003, p. 272.

К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ БЕГЛИ-ТОРВИКА

Яшина Марина Викторовна,

Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ), Москва, Россия, yash-marina@yandex.ru

Алероев Мухамед Тимерханович,

Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ), Москва, Россия, aleroevmuhammad@gmail.com

Аннотация

В последнее время дробное исчисление находится в центре внимания многих исследователей в области науки и техники, так как более детальное исследование физических процессов приводят к необходимости усложнения математических моделей, их описывающих, и, следовательно, к исследованию поведения решений дифференциальных уравнений, содержащих, наравне с "обычной", или "классической", производной, еще и дробную. К процессам такого рода могут быть отнесены: исследования сплошных сред с памятью, фильтрация жидкости в средах с фрактальной геометрией, физические аспекты стохастического переноса и диффузии, математические модели вязкоупругого тела, модели затухающих колебаний с дробным демпфированием (например, колебания горных пород при землетрясениях или колебания наноразмерных сенсоров), модели нелокальных физических процессов и явлений фрактальной природы; климатические модели и т.д. В работе изучаются краевые задачи для уравнения движения осциллятора с вязкоупругим демпфированием (уравнение Бегли-Торвика) в случае, когда порядок демпфирования больше нуля, но меньше двойки. Такие задачи моделируют многие физические процессы, в частности, колебание струны в вязкой среде, изменение деформационно-прочностных характеристик полимербетона при нагружении и др. Данной работа посвящена оптимизации параметрического управления модели Бегли-Торвика. Предложен принципиально новый, эффективный алгоритм позволяющий оценить параметры модели реальных материалов.

Ключевые слова: уравнение Бегли-Торвика, дробное исчисление, вязкоупругость, краевая задача, эластомерный подшипник, идентификация параметра, вязкоупругая среда.

Литература

1. Георгиевский Д.В., Шамолин М.В. Заседания семинара механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова "Актуальные проблемы геометрии и механики" им. проф. В. В. Трофимова под руководством С. А. Агафонова, Д. В. Георгиевского и М. В. Шамолина // Геометрия и механика, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз., 205, ВИНТИ РАН, М., 2022. С. 3-9.
2. Кох К.Г., Келли Дж.М. Применение дробных производных к сейсмическому анализу моделей с изолированным основанием. 1990 <https://doi.org/10.1002/eqe.4290190207>
3. Бегли Р., Торвик П. Дробное исчисление - иной подход к анализу вязкоупругих демпфирующих конструкций // Aiaa Journal, № 21. С. 741-74, 1983.
4. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство // Инженерно-строительный журнал, №5, 2015.
5. Яшина М.В., Поспелов П.И., Кутейников И.А. Влияние распределения транспортного потока на колебательность дорожных покрытий. Труды XIV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2021 // Материалы XIV мультиконференции в 4 томах. Том 4. Ростов-на-Дону – Таганрог, 2021. С. 107-110.
6. Абышов Р.Г., Буслаев А.П., Куприянов Ю.Д., Яшина М.В. Распределенная система мониторинга содержания автомобильных дорог // Вестник МАДИ, № 1(24), 2011. С. 79-85.
7. Буслаев А.П., Заматайлов О.В., Поспелов П.И., Яшина М.В. О восстановлении слоев дорожной одежды по данным подповерхностной радиолокации (ч.1) // Вестник МАДИ(ГТУ), 2009. С. 89-96.
8. Алероев Т.С., Алероева Х.Т. Задачи типа Штурма-Лиувилля для дифференциальных уравнений с дробными производными. Т.2 Дробные дифференциальные уравнения; под ред. Кочубея А. и Лучко Ю.; Изд. De Gruyter: Германия; США, 2019. С. 21-46.
9. Огородников Е.Н., Радченко В.П., Унгарова Л.Г. Математические модели нелинейной вязкоупругости с операторами дробного интегрирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2018, № 2. С. 147-161.
10. Алероев Т.С., Ерохин С.В. Параметрическая идентификация порядка дробной производной в модели Бегли-Торвика // Матем. моделирование, № 30:76 2018. С. 93-102.
11. Кехарсаева Э.Р., Пирожков В.Г. Моделирование изменения деформационно-прочностных характеристик асфальтобетона при нагружении с помощью дробного исчисления // Сб. трудов "Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред", М., ИПРИМ РАН, 2016. С. 104-109.
12. Староверов Н.Н. Моделирование вязкоупругих свойств и гистерезисного демпфирования рессор из композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2011, №8. С. 25-34.
13. Елсайед Асмаа Елсайед Махди. Применение дробного исчисления для исследования деформационно прочностных характеристик полимербетона: кнд.физ.мат.н-ук.1.2.2 / Мос.гос. физ. тех. у-нт. Москва, 2023. 153 с.
14. Алероев Т.С. К проблеме о нулях функции Миттаг-Лефлера и спектре одного дифференциального оператора дробного порядка // Дифференц. уравнения, том 36, №9, 2000ю С. 1278-1279.
15. Нахушев А.М. Дробное исчисление и его применение, Издательство Физматлит, 2003. 272 с.

Информация об авторах:

Яшина Марина Викторовна, профессор кафедры Высшей математики, доктор технических наук, Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ), Москва, Россия

Алероев Мухамед Тимерханович, ассистент кафедры Высшей математики, Московский Автомобильно-Дорожный Государственный Технический Университет (МАДИ), Москва, Россия