

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

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

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

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

- 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций (техн. науки)
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (техн. науки)
- 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (техн. науки)
- 2.3.6 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (техн. науки)
- 2.5.13 Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (техн. науки)
- 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (техн. науки)

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

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

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

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

Язык публикаций: русский, английский.
Периодичность выхода – 6 номеров в год.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-86203 от 27.10.2023
Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

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

© ООО “ИД Медиа Паблишер”, 2024

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

The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.

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

- 2.2.15 Telecommunication systems, networks and devices
- 2.3.1 System analysis, management and information processing
- 2.3.5 Mathematical and software support for computing systems, complexes and computer networks
- 2.3.6 Methods and systems of information security
- 2.5.13 Design, construction and production of aircraft
- 2.5.16 Dynamics, ballistics, aircraft motion control

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

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

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

Language of publications: Russian, English.
Periodicity – 6 issues per year.
Media Registration Certificate PI No. FS 77-86203 Date of issue: 27.10.2023
Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

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

© “Media Publisher”, LLC, 2024

Учредитель:

ООО "ИД Медиа Паблшер"

Издатель:

ДЫМКОВА С.С.

Главный редактор:

ЛЕГКОВ К.Е.

Редакционная коллегия:

БОБРОВСКИЙ В.И., д.т.н., доцент;

БОРИСОВ В.В., д.т.н., профессор,
Действительный член академии военных наук РФ;

БУДКО П.А., д.т.н., профессор;

БУДНИКОВ С.А., д.т.н., доцент,
Действительный член Академии информатизации образования;

ВЕРХОВА Г.В., д.т.н., профессор;

ГОНЧАРОВСКИЙ В.С., д.т.н.,

профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ;

КОМАШИНСКИЙ В.И., д.т.н., профессор;

КИРПАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;

КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,
академик Международной академии информатизации, Действительный член Российской академии естественных наук;

МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,
Действительный член Академии военных наук РФ;

МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;

ПАВЛОВ А.Н., д.т.н., профессор;

ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;

СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;

СИНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;

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

Адрес издателя:

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

Адрес редакции:

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

Адрес типографии:

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

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО "ИД Медиа Паблшер".

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Редругина Н.М., Зарубин А.А.

Модели и методы расчета временных характеристик слабосвязанных транзакционных услуг

4

Степанова И.В., Кнаж Нума

Проблематика организации фиксированого и мобильного доступа в корпоративных сетях связи

13

Шерстнева А.А., Шерстнева О.Г.

Методика оценки функционирования системы диагностики средств и сетей связи

20

Жук А.П., Стогний К.В.

Исследование методов трансформации изображений для защищённой передачи в информационных системах

27

Росляков А.В., Герасимов В.В.

Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN

35

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Петров А.Ю.

Методы разделения программных и аппаратных ресурсов для современных вычислительных сетей

44

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Ясинский С.А., Соколов М.В.

Концепция воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел

51



CONTENTS

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

- Redrugina N.M., Zarubin A.A.**
Models and methods for calculating the temporal characteristics of loosely coupled transactional services **4**
- Stepanova I.V., Knaj Nouma**
Building a combined code based on turbo code with additional bit encoding **13**
- Sherstneva A.A., Sherstneva O.G.**
Methodology for assessing the functioning of a diagnostic system for communication equipment and networks **20**
- Zhuk A.P., Stogniy K.V.**
Research of image transformation methods for secure transfer in information systems **27**
- Roslyakov A.V., Gerasimov V.V.**
Analysis of end-to-end delay in Fronthaul transport segment of 4G/5G networks based on TSN technology **35**

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

- Petrov A.Yu.**
Methods for software and hardware partitioning for modern computing networks **44**

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

- Jasinskii S.A., Sokolov V.M.**
The concept of the aerial component of a multispectral tactical covert surveillance complex of internal affairs bodies **51**

Founder:
"Media Publisher", LLC

Publisher:
DYMKOVA S.S.

Editor in chief:
LEGKOV K.E.

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

Address of publisher:
111024, Russia, Moscow,
st. Aviamotornaya, 8, bild. 1, office 323

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

Address of printing house:
Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.

doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-4-12

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОСВЯЗАННЫХ ТРАНЗАКЦИОННЫХ УСЛУГ

РЕДРУГИНА

Наталья Михайловна¹

ЗРУБИН

Антон Александрович²

АННОТАЦИЯ

Введение: Постоянный рост популярности информационно-телекоммуникационных сервисов, приводит к росту требований, предъявляемых к разрабатываемым услугам. Решения, основанные на заявленных требованиях, привели к росту сложности архитектурных решений, функциональности, производительности, надежности и другим характеристикам инфокоммуникационных систем. В данном исследовании рассматриваются услуги, разработанные на основе микросервисной архитектуры, а вопросы поставленные во главу исследования связаны с отсутствием формализованных методов оценки их временных характеристик. **Цель исследования** заключается в разработке моделей и методов расчета временных характеристик услуг, включающих рабочие процессы реализации транзакций, для последующего внедрения в процессы проектирования и предоставления инфокоммуникационных услуг. **Методы:** в данной работе исследования основаны на общеизвестных положениях теории массового обслуживания, а оценка временных характеристик услуг реализуется при помощи разработанной гибридной имитационно-аналитической модели. **Результаты:** в результате был предложен метод применения разработанных моделей для оценки временных характеристик сценариев рабочих процессов транзакционных услуг, с применением методов аппроксимации для определения верхних и нижних границ временных характеристик рабочих процессов в последовательных сетях систем произвольного вида. **Практическая значимость:** практическая значимость работы заключается в разработке методов применения моделей для расчета вероятностно-временных характеристик различных типов телекоммуникационных услуг, которые могут быть внедрены в основу подхода к планированию, проектированию и разработке требований к предоставлению телекоммуникационных услуг, основанного на оригинальных моделях, полученных в целях прогнозирования и повышения эффективности качественных характеристик телекоммуникационных услуг.

Сведения об авторах:

¹ аспирант, ассистент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций, г. Санкт-Петербург, Россия

² к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций, г. Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транзакции, рабочие процессы, микросервисная архитектура, математическое моделирование.

Для цитирования: Редругина Н.М., Зарубин А.А. Модели и методы расчета временных характеристик слабосвязанных транзакционных услуг // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 4-12.
doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-4-12

Введение

В современном обществе, насыщенном информацией, наблюдается интенсивный рост как количества, так и разнообразия телекоммуникационных услуг. Разработчики этих услуг активно взаимодействуют с исследователями и публикуют научные работы, посвященные анализу качества предоставляемых услуг для различных пользователей [1, 2], разработке архитектурных решений с поддержкой QoS (Quality of Service) [3], созданию комплексных информационно-коммуникационных услуг [4] и улучшению функционала уже существующих [5].

Замечено следующее закономерное явление: эволюция сетей приводит к расширению функциональности системы. Это объясняется положительной взаимосвязью между пропускной способностью сетей и функциональностью, что сказывается на требованиях к разработке систем. Системы с высоким уровнем функциональности обычно требуют возможности масштабирования для адаптации к росту нагрузки и высокой степени надежности для сведения к минимуму вероятности сбоев. Важно отметить, что с увеличением характеристик, необходимых для удовлетворения данных требований, архитектура системы становится более сложной.

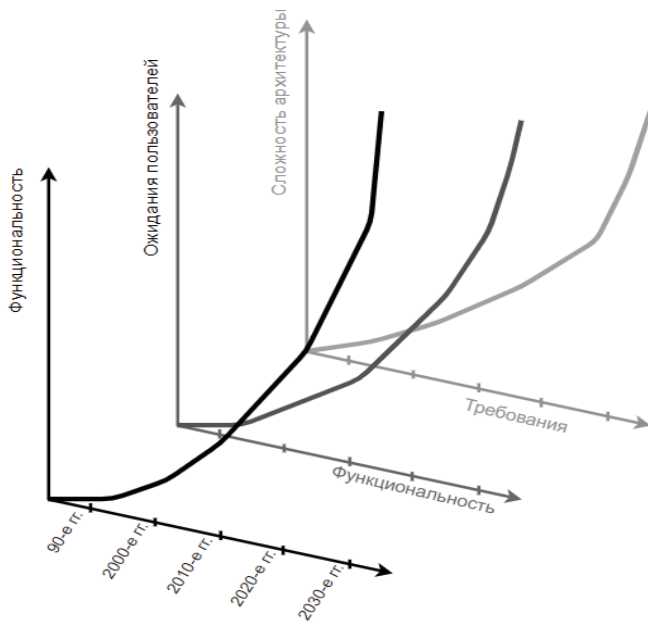


Рис. 1. Проблематика разработки инфокоммуникационных услуг

Системы на микросервисной архитектуре предоставляют инновационные методы разработки сложных IT-решений. Однако для эффективного функционирования и удовлетворения потребностей пользователей требуется глубокое исследование временных характеристик и производительности.

Термин "слабосвязанные сервисы" часто используется для определения элементов микросервисной архитектуры. В работе [9] предлагается метод оценки производительности слабосвязанных программных компонентов. В котором используется автоматизированное тестирование производительности, включая нагрузочное тестирование, для измерения эффективности каждого компонента при слабой связи с другими.

Исследование [10] более подробно рассматривает взаимодействие между слабосвязанными услугами в рамках рабочих процессов. Для этого применяется графовая модель, что позволяет более наглядно представить структуру и взаимодействие слабосвязанных сервисов. В [11] проведен анализ фундаментальных принципов масштабирования веб-сервисов, а также рассмотрены успешные методы решения проблем, связанных с обработкой большого числа одновременных запросов, управлением ограниченной пропускной способности и снижением задержек при операциях чтения и записи данных. В рамках этого исследования также представлен метод оценки времени отклика, направленный на повышение эффективности веб-служб при разработке вычислительных систем [12].

В статье [13] рассматривается методика и структура фреймворка для оценки масштабируемости различных конфигураций архитектуры разработки. Авторы поставили цель провести анализ различных конфигураций архитектур, учитывая специфические рабочие нагрузки. Основной задачей при этом стала разработка более точной модели сети очереди. Использование операционных профилей и эмпирических распределений помогает представить взаимодействие каждого рабочего сценария в реальной среде. Этот подход способствует детальному анализу различных конфигураций архитектур, что является ключевым вопросом в исследовании масштабируемости архитектурных решений.

1 Особенности моделирования при проектировании инфокоммуникационных систем

На этапе проектирования информационной системы активно применяется аналитическое моделирование, основанное на методе аппроксимационных расчетов. Этот метод использует стационарные, обыкновенные процессы без последовательности систем M/M/1. Данный подход обеспечивает возможность определения различных параметров системы, включая временные моменты возникновения узких мест в конкретных рабочих процессах.

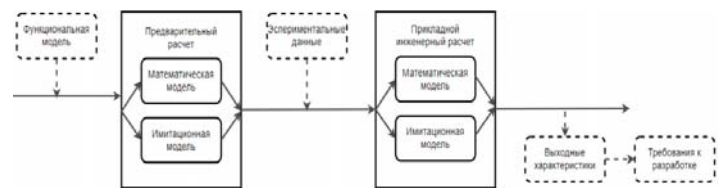


Рис. 2. Принципы проектирования ИК услуг

Применение математического аппарата систем M/M/1 для аппроксимационных расчетов в последовательных сетях обеспечивает значительные преимущества при выявлении узких мест в рабочих процессах инфокоммуникационных услуг. Узкие места представляют собой ключевые компоненты или процессы, которые ограничивают общую производительность системы.

На данном этапе также рекомендуется интегрировать имитационное моделирование. Путем использования данных, полученных при построении функциональной и математической модели, имитационное моделирование позволяет

оценить правильность реализации математических расчетов. Этот метод не только способствует выявлению узких мест в системе, но также обеспечивает получение более точных и надежных данных для оптимизации эффективности рабочих процессов в услугах высоконагруженных инфокоммуникаций.

Последующие этапы будут включать данные, полученные в ходе реальных экспериментов в операционных процессах, может потребовать моделирования потоков и процессов с использованием распределений входных характеристик, не являющихся экспоненциальными, что приведет к формированию систем произвольного типа G/G/1. Для моделирования таких систем могут быть использованы имитационные модели или методы моделирования систем, способные учесть неэкспоненциальный характер распределений с высокими коэффициентами вариации.

Применение имитационного моделирования предоставляет уникальную возможность точного вычисления характеристик системы без обращения к методам аппроксимации и проведения проверок, основанных на фактических данных.

Использование математических моделей дает возможность оценить эффективность и производительность компонентов системы, а также регулировать количественные и качественные параметры системы до ее конкретной реализации.

2 Рабочие процессы транзакционных услуг

В высоконагруженных системах обслуживания транзакций, точность оценки временных характеристик и производительности является критично важным аспектом. Для повышения эффективности таких систем принято использовать стратегию вертикального масштабирования. В контексте моделирования услуг, основанного на микросервисной архитектуре, данное масштабирование может быть реализовано путем избирательного увеличения ресурсов и производительности в отдельных компонентах системы.

В ходе исследований по системам, построенным на микросервисной архитектуре, основное внимание уделяется изучению рабочих процессов. Эти процессы представляют собой последовательность шагов (рис. 3), направленных на обработку запросов между слабосвязанными компонентами системы, которые взаимодействуют между собой не очень плотно [14-15].



Рис. 3. Обобщенная схема сценария рабочего процесса

В контексте транзакционных систем рабочий процесс традиционно определяется как упорядоченный набор операций и этапов, необходимых для обработки конкретной транзакции или выполнения определенной задачи.

Вопросы масштабирования и повышения эффективности рабочих процессов выполнения транзакций микросервисами, затронули концепцию эквивалентных микросервисов и параллельной обработки запросов.

Под данными определениями выступают компоненты микросервисной архитектуры, которые выполняют схожие функциональные задачи или предоставляют схожие сервисы, но для различных сущностей, контекстов или пользователей представляют эквивалентность. Они предоставляют аналогичные функциональные возможности в рамках своих уникальных областей ответственности.

Применение эквивалентных микросервисов может улучшить модульность и масштабируемость системы, так как каждый микросервис может быть разработан, развернут и масштабирован независимо от других, даже если они выполняют схожие функции.

Для определения возможности внедрения подобных подходов, требуется анализ таких аспектов рабочего процесса, как надежность, затраты, временной отклик, производительность и другие.

2.1 Математическое моделирование рабочего процесса

Для оценки временных характеристик рабочих процессов транзакционных систем возможно применение метода реализации математических моделей. Которые позволяют анализировать и повышать эффективность рабочих процессов, прогнозировать будущие сценарии реализации и планирование ресурсов.

Для упрощения анализа последовательной сети систем массового обслуживания возможно применение свойства сцепления как показано на рисунке 4. Метод включает в себя преобразование последовательную цепь система массового обслуживания запросов (СМО) в единый эквивалентный узел с функцией распределения вероятности (ФРВ) времени прохождения $F_x(t)$.

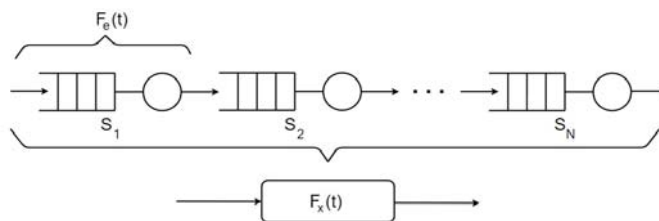


Рис. 4. Модель цепочки локальных транзакций в рабочем процессе системы

Для расчета среднего значения и дисперсии временных характеристик сети СМО необходимо оценить параметры распределения времени пребывания запроса в ней. Функция распределения времени прохождения всей последовательности [16], микросервисов определяется путем свертки функций распределения времени (ФРВ) времени пребывания в каждой отдельной системе массового обслуживания (СМО):

$$F_x(t) = F_{e1}(t) \otimes F_{e2}(t) \otimes F_{e3}(t) \otimes \dots \otimes F_{eN}(t) \quad (1)$$

где $F_{ei}(t)$ – ФРВ времени окончания обслуживания в i -ой СМО, $i=1..N$

Соответственно для получения значения ФРВ времени окончания обслуживания используется та же процедура свертки ФРВ времени ожидания и времени обслуживания:

$$F_e(t) = F_w(t) \otimes F_s(t) \quad (2)$$

где $F_w(t)$ – ФРВ времени ожидания обслуживания, $F_s(t)$ – ФРВ времени обслуживания.

Необходимо получить изображения для первоначальных функций $F(t)$, для чего рекомендуется использование преобразования Лапласа–Стилтьеса (ПЛС), для проведения процедуры свертки:

$$f(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dF(t) \quad (3)$$

где s – комплексный параметр, $s \geq 0$

Для частных случаев есть готовые варианты решения [17]:
Для систем М/М/1:

$$f_e(s) = \frac{\lambda - \mu}{\lambda - s - \mu} \quad (4)$$

Для систем М/Г/1:

$$f_e(s) = \frac{s(1 - \rho)\beta(s)}{s - \lambda + \lambda\beta(s)} \quad (5)$$

Математическое моделирование сетей систем произвольного вида может потребовать аппроксимации неэкспоненциальных распределений с высоким коэффициентом вариации и использование экспериментальных данных для последующего внедрения в процедуры расчета. При этом оцениваются аппроксимационные модели с учетом критериев точности и сложности.

Для преодоления сложностей при аналитическом моделировании и расчетах цепочек систем массового обслуживания [18, 19] были предложены различные методы аппроксимации. Например, для распределений с "длинными хвостами", таких как Парето и Вейбулла-Гнеденко, которые сложно анализировать, предложена аппроксимация гиперэкспоненциальным распределением [20, 21]. Также для процессов, где функция распределения времени не определена в явном виде, рекомендуется применение ступенчатых функций, эмпирических методов [22] или имитационного моделирования. Эти процессы часто формируются при оценке реальных данных в ходе проектирования телекоммуникационных услуг.

2.2 Особенности оценки характеристик сетей систем произвольного вида

2.2.1 Особенности оценки времени задержки

Одним из важных параметров, требующих оценки, является задержка в СМО – время, которое требуется для обработки запроса от момента его поступления до начала обслуживания.

Для получения времени ожидания $E(W_i)$ возможно использовать приближение Крамера и Лангенбаха Бельца (КЛБ) (6-7) [24], а также иные аппроксимационные методы [25]

$$E(W_i) = \frac{\rho_i(ca_i + cs_i)}{2\mu_i(1 - \rho_i)} g \quad (6)$$

где

$$g = \begin{cases} \exp\left\{\frac{-2(1 - \rho_i)(1 - ca_i)^2}{3\rho_i(ca_i + cs_i)}\right\}, & ca_i < 1 \\ \exp\left\{\frac{-(1 - \rho_i)(ca_i - 1)}{ca_i + 4cs_i}\right\}, & ca_i \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

В том числе уравнение Кингмана:

$$E(W_i) = \left(\frac{\rho_i}{1 - \rho_i}\right) \left(\frac{ca_i + cs_i}{2}\right) \mu_i \quad (8)$$

где cs_i – квадратный коэффициент вариации обслуживания, ca_i – квадратный коэффициент вариации времени между поступлением запросов, ρ_i – коэффициент загрузки i -ой СМО.

Для более глубокого понимания и более точной оценки задержки в системах G/G/1 часто применяют спектральное решение интегрального уравнения Линдли. Этот метод анализа позволяет учесть влияние различных факторов, таких как периоды простоя и интервалы между запросами, что существенно повышает точность оценки временных характеристик. Такой подход особенно важен в условиях высоконагруженных систем, где точность оценки задержки является критическим фактором для обеспечения эффективного функционирования и удовлетворения потребностей пользователей.

Оценка функции распределения вероятности времени ожидания в системах массового обслуживания (СМО) произвольного типа представлена в виде:

$$W(t) = 1 - \left(1 - \frac{x}{\mu}\right) e^{-xt} \quad (9)$$

где $x = \mu \times \lim_{s \rightarrow 0} \frac{W_+(s)}{s}$

Решение этого уравнения осуществляется с применением метода спектрального разложения интегрального уравнения Линдли.

$$W(t) = \begin{cases} \int_0^{\infty} W(u) dC(t-u), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Упрощение процесса решения достигается путем переноса вычисленных нулей и корней уравнения на комплексную плоскость при графическом представлении полученных выражений.

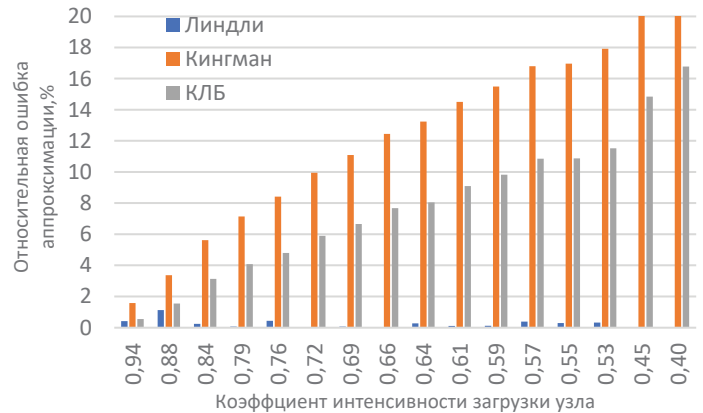


Рис. 5. Относительная ошибка аппроксимации при применении методов моделирования для 1 узла

Таким образом, применение спектрального решения интегрального уравнения Линдли обеспечивает надежный метод для оценки времени ожидания в системах G/G/1.

2.2.2 Особенности оценки характеристик выходного потока

При моделировании характеристик последовательных сетей систем массового обслуживания произвольного вида необходимо учитывать изменение параметров потока, покидающего каждую СМО в цепочке. Как показано в [27], ПРВ интервалов времени между последовательными поступлениями требований $d(t)$ на выходе из узла i . $D(s)$ представляет собой преобразование Лапласа для данной плотности.

Расчет данного параметра проводится следующим выражением [27]:

$$D(s) = (1 - \rho)D(s)\Big|_{\text{узел } i \text{ свободен}} + \rho D(s)\Big|_{\text{узел } i \text{ занят}} \quad (11)$$

– иная форма данного выражения:

$$D(s) = (1 - \rho)\Gamma(s)V(s) + \rho B(s) \quad (12)$$

где $V(s)$ – преобразование ЛС ФРВ времени обслуживания, $\Gamma(s)$ – преобразование ЛС ФРВ времени до поступления следующего требования в систему.

Теорема Бёрке представляет исключение, утверждая, что выходной поток системы типа М/М/ν также является пуассоновским потоком с тем же параметром λ , что и параметр входного потока. Точные результаты и готовый математический аппарат реализованы для сетей систем вида М/М/1, что доказано в работе [23] при анализе временных характеристик последовательного рабочего процесса с использованием аппарата параллельного обслуживания Fork-Join. Поэтому рекомендовано при проектировании и предварительных расчетах характеристик сетей использовать данное практичное решение.

В случае использования приближенных методов, не прибегая к преобразованию Лапласа-Стилтьеса, возможно использование формулы Маршалла [26] для оценки квадратного коэффициента вариации cd_i между выходящими требованиями с системы i .

$$cd_i = ca_i + 2\rho_i^2 cs_i - 2\rho_i(1 - \rho_i) \frac{E(W_i)}{S_i} \quad (13)$$

Это будет эффективным решением в совокупности с приближенными методами для оценки среднего временного значения задержки (6-8).

2.2.3 Аппроксимационные методы расчета последовательных сетей систем G/M/1

Дальнейший анализ проводится для систем с произвольным законом поступления запросов, что позволит определить дальнейшие этапы и задачи необходимые для реализации общей методики расчёта.

Предложенная в данном анализе задача – оценка параметров выходного потока запросов, после их обслуживания в СМО с показательным распределением времени обслуживания.

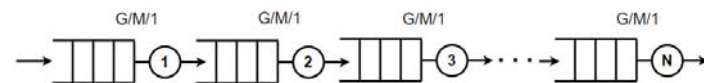


Рис. 6. Последовательная цепочка систем G/M/1

Существуют готовые решения частных случаев (4-5), однако системы G/M/1 в эту категорию не входят и для них отсутствуют точные универсальные решения. В связи с этим был проведен анализ временных характеристик, при внедрении в расчет некоторых методов аппроксимации.

В качестве входных характеристик для последующего анализа системы, входной поток характеризуется гиперэкспоненциальным распределением шестого порядка H_6 преобразование Лапласа-Стилтьеса которого задается выражением (14), а время обслуживания задается экспоненциальным временем обслуживания.

$$p(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} p(t) dt = \sum_{i=1}^k \frac{P_i \lambda_i}{\lambda_i + s} \quad (14)$$

При анализе были выделены следующие методы аппроксимации для определения преобразования ЛС функции распределения времени простоя:

а) Первый метод построен на основе аппроксимационного предположения [27], где время простоя будет равно остаточному значению промежутка времени между поступающими требованиями, оно же звучит следующим образом «...длинные промежутки времени между моментами восстановления захватывают на оси времени большие участки, чем короткие промежутки, поэтому более вероятно, что случайно выбранная точка t попадет на длинный промежуток», и определяет преобразование ЛС ФРВ периода простоя следующим образом:

$$\Gamma(s) = \begin{cases} \frac{1 - I_a(s)}{sx} & \text{при } \rho \leq 0,5 \\ \frac{1 - B(s)}{sm} & \text{при } \rho > 0,5 \end{cases} \quad (15)$$

где \bar{m} – среднее время обслуживания; $V(s)$ – ПЛС ФРВ времени обслуживания; $I_a(s)$ – аппроксимация ПЛС ФРВ остаточного времени $I_a(s) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + s}$, $\varepsilon = 1/\bar{x} = 1/(\bar{t} - \bar{m})$, \bar{x} – среднее значение остаточного времени, \bar{t} – среднее время между приходом запросов.

б) Второй метод предполагает аппроксимацию периода простоя изначальным временем между поступлением запросов в систему:

$$D(s) = (1 - \rho)A(s)V(s) + \rho B(s) \quad (16)$$

где $A(s)$ – преобразование ЛС ФРВ времени между поступлением запросов.

Расчет функции распределения времени задержки на каждом узле цепочки систем при использовании методов аппроксимации "а" и "б" можно реализовать, упростив решение переносом полученных нулей и корней уравнения на комплексную прямую при построении графиков полученных выражений (см. рис. 7). Расчет неизвестных параметров реализован с использованием интегрального решения спектрального уравнения Линдли [27].

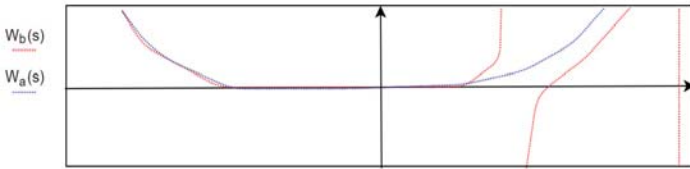


Рис. 7. Графическое представление нулей и корней

Оценка задержки в цепочке систем массового обслуживания при увеличении нагрузки представлена для двух методов, а также результаты имитационного моделирования на рисунке 6. Результаты приближенных формул КЛБ/Маршалл и Кингмана/Маршалл получены с использованием выражения:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^N E(W_i) \times 1 / \mu_i \quad (17)$$

Данные методы могут определять верхнюю и нижнюю границу временных характеристик сетей систем массового обслуживания.

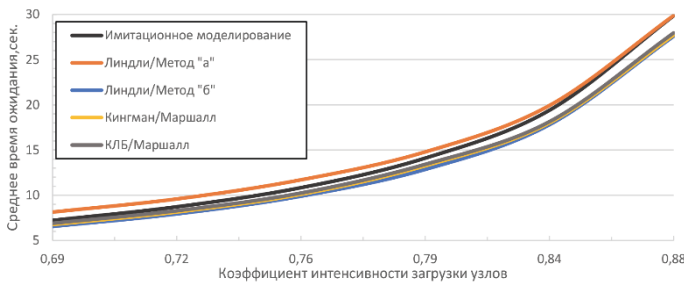


Рис. 8. Оценка средней задержки для средних значений нагрузки

Точность этих методов можно оценить, рассматривая рисунок 9. Высокий процент ошибки аппроксимации наблюдается при реализации метода "а" при средних значениях нагрузки и может превышать 10%. Однако, при приближении коэффициента загрузки к единице, процент ошибки значительно снижается, что объясняется зависимостью в выражении (10).

Реализация метода "б" не может гарантировать точные результаты при любом состоянии системы, однако характеризуется стационарным значением ошибки в пределах 6-8%.

Приближенный метод Крамера Лангенбаха-Бельца дает более точные результаты, однако в таком случае не поддерживается свойство стационарности результатов, а на высоких значениях нагрузки он уступает в точности методу «а». Характер результатов приближенных методов обосновывается использованием точной формулы для оценки параметра выходного потока. Это позволяет сформулировать в выводах к данной работе последующую цель исследований.

Обеспечить абсолютную точность результатов не может ни один из предложенных методов. Тем не менее, при проведении анализа полученных данных отмечается, что можно использовать данные методы для определения нижней и верхней границ значений искомой величины, как показано на рисунке 8.

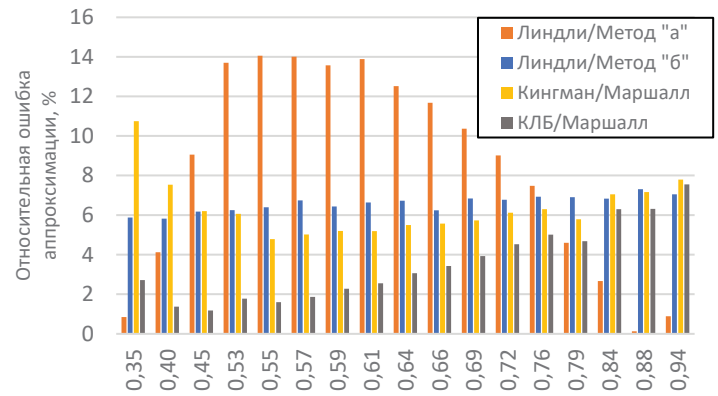


Рис. 9. Относительная ошибка аппроксимации для 2 методов моделирования

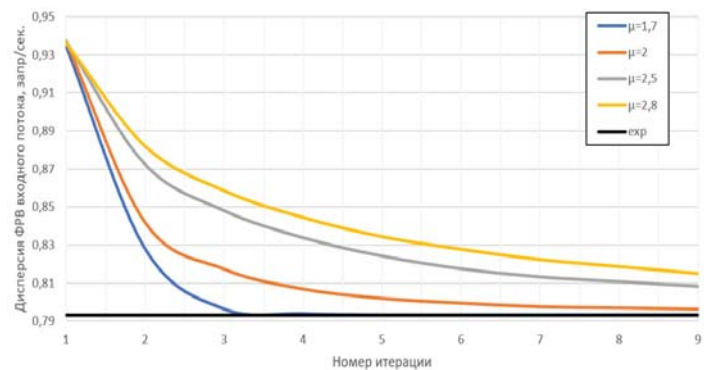


Рис. 10. Дисперсия ФРВ входного потока на каждый узел в сети

В дополнение был проведен анализ, и получены результаты изменения характера потока в зависимости от количества узлов в сценарии рабочего процесса.

На рисунке 10 представлена скорость сходимости заданного входного потока (H_6) к экспоненциальному распределению при разной загруженности узлов. Наблюдаемый результат заключается в том, что при увеличении нагрузки на узлы происходит ускоренный процесс приближения формы входного потока к распределению времени обслуживания в системах G/M/1.

Алгоритм оценки временных характеристик рабочих процессов транзакционных услуг, представленный на рисунке 11, является важным результатом.

Внедрения методов средних значений и процедуры свертки позволяют более полно оценивать временные характеристики разнообразных сценариев реализации рабочих процессов транзакционных систем.

Полученные данные обеспечивают обоснованное принятие решений на всех этапах планирования и проектирования услуг, независимо от того, являются ли входные данные реальными или теоретическими.

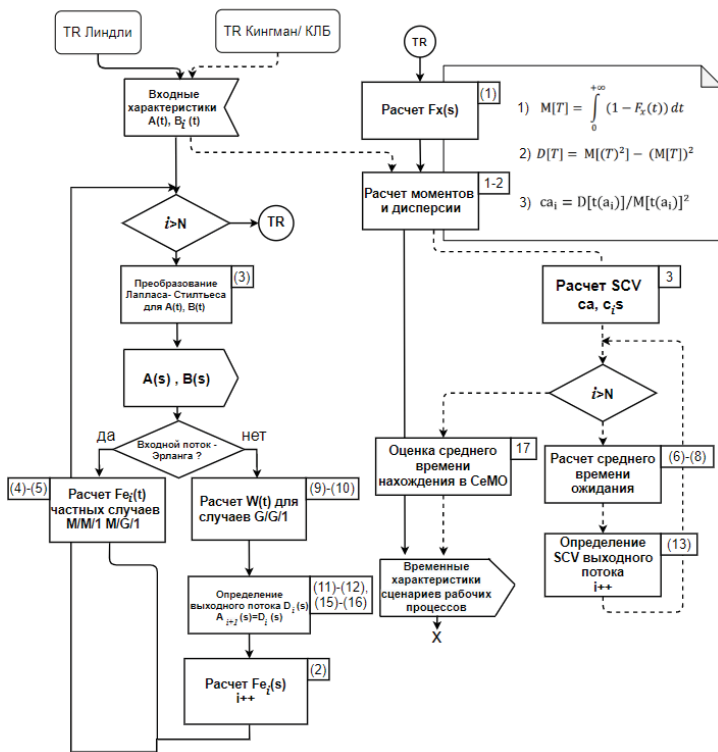


Рис. 11. Метод расчета транзакционных услуг

Заключение

В данной научной работе проведено исследование моделей и методов оценки временных характеристик рабочих процессов в транзакционных слабосвязанных услугах. Разработан алгоритм, основанный на теории массового обслуживания, который использует методы свертки и аппроксимации для вычисления временных характеристик систем произвольного типа G/G/1. Особое внимание уделяется разработанным методам аппроксимации для оценки характеристик выходного потока, обслуживаемого в узлах рассматриваемых сетей систем G/G/1. Получены оценки верхней и нижней границы временных характеристик при всех значениях нагрузки.

Полученные в ходе исследования результаты предоставляют инструментарий для принятия обоснованных решений по управлению качественными и количественными показателями и их формализации на всех этапах разработки и эксплуатации инфокоммуникационных услуг.

Целью дальнейших исследований будет являться разработка математического инструмента, основанного на предложенных аппроксимационных методах для получения точного результата с коэффициентом ошибки не превышающем наименьшее из заявленных на всех значениях нагрузки, за счет увеличения точности моделирования расчёта параметров выходных потоков.

Литература

1. Solomko Y.S., Sotnikov A.D., Katasonova G.R. Analysis of poly-modal interaction in applied infocommunication systems // Information Innovative Technologies: International Scientific – Practical Conference, Prague, 26-30 апреля 2021 г. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2021, pp. 235-238.
2. Li F., Lu M. Hou K. Cui M. Darbandi. Customer satisfaction with bank services: The role of cloud services, security, e-learning and service quality // Technology in Society, 2021, no. 64, p. 101487
3. Iwanow Maksymilian, Dudycz Helena, Michalak Krzysztof. Required Quality of Service attributes in the context of various types of Web Services. 2022, pp. 261-267. 10.15439/2022F104.
4. Лившиц М.В. Разработка методологии проектирования программного обеспечения инфокоммуникационных систем // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2022. Т. 1. С. 58-61.
5. Cheung L., Golubchik L., Sha F. A Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective // 9th Annual IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. Singapore, 2011, pp. 75-84.
6. Shabani I. Design of modern distributed systems based on micro-services architecture // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. Т. 12. №2.
7. Zhu J. QoS-Aware Co-Scheduling for Distributed Long-Running Applications on Shared Clusters // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 33, no. 12, pp. 4818-4834.
8. State of the Art in Microservices [Электронный ресурс] URL: https://microxchg.io/2015/slides/01_08_AdrianCockcroftSlides.pdf (Дата обращения 13.04.2023)
9. Cerny T., Abdelfattah A.S., Bushong V., Al Maruf A., Taibi D. Microservice Architecture Reconstruction and Visualization Techniques: A Review // 2022 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE), Newark, CA, USA, 2022, pp. 39-48, doi: 10.1109/SOSE55356.2022.00011.
10. Guo X., Peng X., Wang H., Li W., Jiang H., Ding D., Xie T., Su L. Graph-based trace analysis for microservice architecture understanding and problem diagnosis // Proceedings of the 28th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering. 2020, pp. 159-174.
11. Макаров Д.А., Шибанова А.Д. Масштабирование веб-приложений // Теория и практика современной науки. 2021. №1 (67). 4 с.
12. Фурсов Н.Ю. Система предиктивного анализа доступности веб-сервисов // Мавлютовские чтения: Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Уфа, 25-27 октября 2022 года. Том 5. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. С. 746-750.
13. Avritzer A., Ferme V., Janes A., Russo B., Hoorn A., Schulz H., Rufino V. Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests // Journal of Systems and Software. 2020. Vol. 165, pp. 16.
14. Chen Q., Dayal U., Hsu M., Griss M. Dynamic-agents, Workflow and XML for E-Commerce Automation // EC-Web. 2000, pp. 314-323.
15. G. Shegalov, Shegalov M., Weikum G. XML-enabled workflow management for e-services across heterogeneous platforms // VLDB Journal. 2001. №10, pp. 91-103.
16. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1968. 496 с.
17. Кожанов Ю.Ф. Теория телетрафика: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2020. 203 с.



18. Gupta R.D., Debasis Kundu K. Discriminating between Weibull and generalized exponential distributions // Computational Statistics & Data Analysis. 2003. № 43(2), pp. 179-196.

19. Tongdan J., Lakshmana G. Weibull and Gamma Renewal Approximation Using Generalized Exponential Functions, Communications in Statistics // Simulation and Computation. 2008. №38, pp. 154-171.

20. Буранова М.А., Карташевский В.Г. Рекурсивный подбор параметров гиперэкспоненциальных распределений при аппроксимации распределений с «тяжелыми хвостами» // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 40-46.

21. Буранова М.А., Карташевский И.В. Применение EM-алгоритма для аппроксимации гиперэкспонентами плотностей вероятностей коррелированного трафика // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 10-17.

22. Орлов А.И. Процесс итерации формул // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 182. С. 229-260.

23. Редругина Н.М. Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов. Труды учебных заведений связи. 2023, no. 9(3), pp. 82-90.

24. Wolfgang & Langenbach-Belz, M. (Approximate Formulae for the Delay in the Queueing System GI/G/1. 1976, pp. 235/1-235/8.

25. Klinecicz J.G., Whitt W. On Approximations for Queues, II: Shape Constraints. AT&T Bell Laboratories Technical Journal, 1984, no. 63(1), pp. 139-161. doi:10.1002/j.1538-7305.1984.tb00006.x

26. Marshall K.T. Some Inequalities in Queueing // Operations Research, 1968, no. 16(3), pp. 651-668.

27. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

MODELS AND METHODS FOR CALCULATING THE TEMPORAL CHARACTERISTICS OF LOOSELY COUPLED TRANSACTIONAL SERVICES

NATALIA M. REDRUGINA
St. Petersburg, Russia

ANTON A. ZARUBIN
St. Petersburg, Russia

KEYWORDS: *transactions, workflows, microservice architecture, mathematical modeling*

ABSTRACT

Introduction: Constant growth of popularity of information and telecommunication services leads to constant growth of requirements to the developed services. The solution based on the stated requirements has led to an increase in the complexity of architectural solutions, functionality, performance, reliability and other characteristics of info-communication systems. This study deals with services developed on microservice architecture, and the issues raised at the head of the study are related to the lack of formalized methods for their evaluation. **The purpose of the research** is to develop models and methods for calculating the temporal characteristics of services, including the work processes of transaction realization, for further implementation in the processes of design and provision of infocommunication services. **Methods:** In this paper, the research is based on the well-known provisions of the theory of mass service, and the

estimation of temporal characteristics of services is realized with the development of a hybrid simulation-analytical model. **As a result**, a method of applying the developed models for estimating the probabilistic characteristics of scenarios of transactional services workflows, using approximation methods to determine the upper and lower bounds of the temporal characteristics of workflows in sequential networks of systems of arbitrary type and synthesis with simulation tools for complex analysis was proposed. **Practical relevance:** the work consists in the development of methods of application of models for calculation of probabilistic-temporal characteristics of various types of telecommunication services, which can be introduced into the basis of the approach to planning, design and development of requirements for the provision of telecommunication services, based on the original models obtained for the purpose of prediction and improvement of efficiency of the quality characteristics.

REFERENCES

1. Y.S. Solomko, A.D. Sotnikov, G.R. Katasonova, "Analysis of poly-modal interaction in applied infocommunication systems," *Information Innovative Technologies: International Scientific - Practical Conference*, Prague, 26-30 апреля 2021 года. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2021, pp. 235-238.
2. F. Li, H. Lu, M. Hou, K. Cui, M. Darbandi, "Customer satisfaction with bank services: The role of cloud services, security, e-learning and service quality," *Technology in Society*, 2021, no. 64. P. 101487.
3. Maksymilian Iwanow, Helena Dudycz, Krzysztof Michalak, "Required Quality of Service attributes in the context of various types of Web Services," 2022, pp. 261-267. 10.15439/2022F104.
4. M.V. Livshits, "Development of a methodology for designing software for infocommunication systems," *Youth school-seminar on management problems in technical systems named after A.A. Vavilov*. 2022. Vol. 1, pp. 58-61.
5. L. Cheung, L. Golubchik, F. Sha, "Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective," *9th Annual IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Singapore, 2011, pp. 75-84.
6. I. Shabani, "Design of modern distributed systems based on microservices architecture," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021. Vol. 12. No. 2.
7. J. Zhu, "QoS-Aware Co-Scheduling for Distributed Long-Running Applications on Shared Clusters," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 33, no. 12, pp. 4818-4834.
8. State of the Art in Microservices [Электронный ресурс] URL: https://microxchg.io/2015/slides/01_08_AdrianCockcroftSlides.pdf (Дата обращения 13.04.2023).
9. T. Cerny, A. S. Abdelfattah, V. Bushong, A. Al Maruf and D. Taibi, "Microservice Architecture Reconstruction and Visualization Techniques: A Review," *2022 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, Newark, CA, USA, 2022, pp. 39-48, doi: 10.1109/SOSE55356.2022.00011.
10. X. Guo, X. Peng, H. Wang, W. Li, H. Jiang, D. Ding, T. Xie, L. Su, "Graph-based trace analysis for microservice architecture understanding and problem diagnosis," *Proceedings of the 28th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*. 2020, pp. 159-174.
11. D.A. Makarov, A.D. Shibanova, "Scaling of web applications," *Theory and practice of modern science*. 2021. No.1 (67), 4 p.
12. N.Yu. Fursov, "System of predictive analysis of the availability of web services," *Mavlyutov readings: Materials of the XVI All-Russian Youth Scientific Conference*. In 6 vol., Ufa, October 25-27, 2022. Vol. 5. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2022, pp. 746-750.
13. A. Avritzer, V. Ferme, A. Janes, B. Russo, A. Hoorn, H. Schulz, V. Rufino, "Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests," *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol.165, pp. 16.
14. Q. Chen, U. Dayal, M. Hsu, M. Griss, "Dynamic-agents, Workflow and XML for E-Commerce Automation," *EC-Web*. 2000, pp. 314-323.
15. G. Shegalov, M. Shegalov, G. Weikum, "XML-enabled workflow management for e-services across heterogeneous platforms," *VLDB Journal*, 2001. No.10, pp. 91-103.
16. A.N. Kolmogorov, S.V. Fomin, "Elements of the theory of functions and functional analysis," Moscow: Nauka, 1968, 496 p.
17. Yu.F. Kozhanov, "Teletraffic theory: textbook," SPb.: SPbGUT, 2020. 203 p.
18. R.D. Gupta, K. Debasis Kundu, "Discriminating between Weibull and generalized exponential distributions," *Computational Statistics & Data Analysis*, 2003. No. 43(2), pp. 179-196.
19. J. Tongdan, G. Lakshmana, "Weibull and Gamma Renewal Approximation Using Generalized Exponential Functions, Communications in Statistics," *Simulation and Computation*. 2008. No.38, pp. 154-171.
20. M.A. Buranova, V.G. Kartashevsky, "Recursive selection of parameters of hyperexponential distributions when approximating distributions with "heavy tails", " *Proceedings of educational institutions of communication*. 2023. Vol. 9. No. 2, pp. 40-46.
21. M.A. Buranova, I.V. Kartashevsky, "Application of the EM algorithm for approximation of probability densities of correlated traffic by hyperexponents," *Proceedings of educational institutions of communication*. 2021. Vol. 7. No. 4, pp. 10-17.
22. A.I. Orlov, "Process of iteration of formulas," *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2022. No. 182, pp. 229-260.
23. N.M. Redugina, "A method for calculating the time characteristics of service in service platforms for infocommunication transactional services with parallel processing of requests," *Proceedings of educational institutions of communication*. 2023, no. 9(3), pp. 82-90.
24. Wolfgang & Langenbach-Belz M., "Approximate Formulae for the Delay in the Queueing System GI/G/1," 1976, pp. 235/1-235/8.
25. J.G. Klinecicz, W. Whitt, "On Approximations for Queues, II: Shape Constraints," *AT&T Bell Laboratories Technical Journal*, 1984, no. 63(1), pp. 139-161. doi:10.1002/j.1538-7305.1984.tb00006.x
26. K.T. Marshall, "Some Inequalities in Queueing. Operations Research, 1968, no. 16(3), pp. 651-668.
27. L. Kleinrock, "Teoria delle code. Traduzione dall'inglese," I.I. Grushko; a cura di V. I. Neiman-M.: Ingegneria Meccanica, 1979, p. 432.
28. Y.S. Solomko, A.D. Sotnikov, G.R. Katasonova, "Analysis of polymodal interaction in applied infocommunication systems," *Information Innovative Technologies: International Scientific - Practical Conference*, Prague, 26-30 апреля 2021 года. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2021, pp. 235-238.
29. F. Li, H. Lu, M. Hou, K. Cui, M. Darbandi, "Customer satisfaction with bank services: The role of cloud services, security, e-learning and service quality," *Technology in Society*, 2021, no. 64, 101487.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Natalia M. Redugina, assistant, St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia
Anton A. Zarubin, PhD, Docent, St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

For citation: Redugina N.M., Zarubin A.A. Models and methods for calculating the temporal characteristics of loosely coupled transactional services. *H&ES Reserch*. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 4-12. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-4-12 (In Rus)



ПРОБЛЕМАТИКА ОРГАНИЗАЦИИ ФИКСИРОВАННОГО И МОБИЛЬНОГО ДОСТУПА В КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

СТЕПАНОВА

Ирина Владимировна ¹

КНАЖ НУМА ²

АННОТАЦИЯ

Введение: Проблематика прогнозирования необходимой пропускной способности различных участков сетей пакетной коммутации широко известна. Возникновение перегрузок на участке доступа к сетевым ресурсам может быть следствием перехода на более совершенные устройства кодирования информации. Часто пожелания пользователей и возможности операторов связи вступают в противоречие. Внедрение и использование технологии коммутации по меткам IP/MPLS в сочетании с организацией туннелей до некоторой степени снимает проблему задержек при передаче пакетов по сети. Однако при использовании фиксированного ресурса скорости туннеля возможны просчеты при его определении как в большую, так и в меньшую сторону. С другой стороны, для операторов связи важно эффективное использование собственных ресурсов (ресурсов сети) при соблюдении требований по ожидаемому качеству передачи информации. Кроме того, имеется широкая номенклатура кодеков, отличающихся друг от друга не только стоимостью, но и такими показателями как скорость одного соединения, качество восстановленного сигнала. Получили развитие и распространение кодеки с улучшенными характеристиками и, как следствие, более высокой скоростью на одно соединение. Как альтернатива – появились кодеки с переменной скоростью работы. Выбор кодеков заказчиком может существенно повлиять на такой показатель как вероятность отказа в обслуживании из-за исчерпания выделенного ресурса скорости. Представляет интерес проведение оценки – насколько зависит этот показатель от скорости работы кодека и каковы перспективы применения кодеков с переменной скоростью. Для корпоративных сетей связи (КСС) необходимо учитывать различные подходы в организации фиксированного и мобильного доступа. Для некоторых видов КСС перспективен переход к оборудованию мобильной связи поколения 5G, который, в частности облегчает организацию удаленного доступа сотрудников. При этом остро встают вопросы защищенности информации от постороннего доступа и проблема потерь сообщений при передаче. **Цель работы:** представить результаты исследования по оценке вероятности отказов в обслуживании вызовов на участке доступа к сети технологии IP/MPLS из-за отсутствия свободного ресурса. Обоснованность данного подхода доказана аналитически с учетом самоподобного характера трафика и с привлечением методов теории массового обслуживания. **Результат:** для варианта фиксированного доступа предложен подход к оценке вероятности отказов в обслуживании вызовов, а для мобильного доступа получены результаты моделирования работы системы связи технологии 5G при фиксированной величине потерь сообщений.

Сведения об авторах:

¹ кандидат технических наук, доцент,
Московский технический университет
связи и информатики, Москва, Россия,
w515iv@mail.ru

² аспирант, Московский технический
университет связи и информатики,
Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: корпоративные сеть связи, фиксированный доступ, вероятность потерь по вызовам, ресурс скорости, мобильная связь, вероятность потери сообщений.

Для цитирования: Степанова И.В., Кнаж Нума. Проблематика организации фиксированного и мобильного доступа в корпоративных сетях связи // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 13-19. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-13-19

1 Общая проблематика развития корпоративных сетей связи

Сети на базе технологии IP (Internet Protocol) служат транспортом для разнообразных сервисов. Перечислим основные факторы субъективного восприятия качества связи со стороны пользователей: голосовая связь – нет искажений голоса и отказов в обслуживании вызовов; видеосвязь – высокое качество изображения, нет задержек; передача данных – высокая скорость передачи, отсутствие ошибок и сбоев [1-3].

С другой стороны, для операторов связи важно эффективное использование собственных ресурсов (ресурсов сети) при соблюдении требований по ожидаемому качеству передачи информации. При организации фиксированного доступа пользователей КСС к сетевым ресурсам есть возможность оперативного изменением (снижения) скорости кодирования при перегрузках. Необходимость такого регулирования возникает как следствие не контролируемого роста абонентской емкости в филиалах КСС, а также как следствие перспективности туннелирования в сетях технологии IP/MPLS с фиксированным ресурсом скорости. Необходимо обеспечить контроль таких показателей как: задержка передаваемых пакетов; вариации задержек; уровень потерь пакетов (сообщений) [4-6].

Перспективы перехода к оборудованию мобильной связи поколения 5G расширяют спектр требований заказчиков: некоторым приложениям требуется пиковая скорость передачи данных в несколько гигабит в секунду; другим требуется доставка пакетов данных с задержкой всего в несколько миллисекунд; для третьих критично время автономной работы в течение нескольких лет. При этом остро встают вопросы защищенности информации от постороннего доступа и проблема потерь сообщений при передаче. При организации фиксированного доступа пользователей КСС к сетевым ресурсам есть возможность оперативного изменением (снижения) скорости кодирования при перегрузках.

Необходимость такого регулирования возникает как следствие не контролируемого роста абонентской емкости в филиалах КСС, а также как следствие перспективности туннелирования в сетях технологии IP/MPLS с фиксированным ресурсом скорости. Чтобы удовлетворить эти требования в сети технологии 5G используются виртуализация сетевых функций и сегментация сети. Это позволяет обеспечить гибкий базовый ресурс, который можно легко перенастроить для поддержки новых требований по мере их возникновения. Сравнить эффективность перспективных кодов позволяет моделирование работы участка доступа сети при фиксированных показателях качества связи и, в частности, при заданной вероятности потери сообщений [7, 8].

2 Систематизация факторов влияния на пропускную способность сети

Корпоративная сеть связи (КСС) – комплексная система, состоящая из различных элементов, таких как компьютеры, серверы, МФУ, цифровые АТС и в том числе IP-телефонной АТС (IP-PBX), системное и прикладное программное обеспечение, сетевые адаптеры, коммутаторы и маршрутизаторы,

кабельная система (рис. 1). Целями создания корпоративной сети является обеспечение взаимосвязи системных приложений, которые расположены в различных узлах, и доступ к ним удаленных пользователей. Чаще всего КСС является территориально распределенной – она связывает офисы, подразделения, участки и прочие структуры, которые находятся на значительном удалении друг от друга [2, 3].



Рис. 1. Пример построения корпоративной сети связи

Сетевые сервисы в разной степени чувствительны к изменениям параметров. Качество начинает ухудшаться в периоды перегрузок (когда количество передаваемых пакетов приближается или превышает предельное значение для данного интерфейса/канала). В зависимости от типа приложения пользователи КСС предъявляют к ним различные требования. К примеру, задержка при получении письма по внутрикорпоративной почте до двух минут приемлема с точки зрения пользователя, однако прерывания связи, искажение или пропадание звука и изображения при селекторных совещаниях с использованием видеоконференцсвязи резко снижают оценки пользователей данного сервиса.

С точки зрения операторов IP сети качество транспортной среды определяется несколькими параметрами:

- с орошь подключения к магистральной сети;
- потеря пакетов IP (процент потерь, Packet Loss);
- круговая задержка (Round-Trip Delay, RTD, Round-Trip Time RTT, Round-Trip Latency, RTL);
- вариация задержки (Jitter; IP Packet Delay Variation, IPDV, Packet Delay Variation, PDV).

Для проверки уровня сервиса необходим контроль и управление следующими параметрами: задержка (delay); джиттер (jitter); ширина полосы пропускания (bandwidth); показатели потери пакетов (packet loss parameters).

Требования к полосе пропускания задаются индивидуально для каждого проекта КСС [1, 2].

Большое количество приложений и все возрастающий объем трафика приводят к росту нагрузке на корпоративную сеть. Традиционно, нагрузку на сеть можно регулировать увеличением ширины полосы пропускания используемых линий связи и увеличением производительности сетевых устройств (коммутаторы доступа, коммутаторы ядра, роутеры, мультиплексоры).



Однако, эти два вида регулирования не учитывают какой именно тип трафика должен передаваться в первую очередь, а для какого допустима передача во вторую очередь. При распределении ресурсов система управления ресурсами должны учитываться не только наличие ресурсов и общая стратегия управления ресурсам, но и требования к QoS (Quality of Service) для приложения.

3 Оценка вероятности отказов в предоставлении речевого соединения на участке доступа к ресурсам пакетной сети

Методы проектирования КСС существенно отличаются от тех, что используются при создании локальных сетей. Главное отличие – территориально-распределенные сети объединяют удаленные друг от друга объекты и часто используют относительно медленные линии связи. При проектировании офисной локальной сети основные издержки приходятся на покупку оборудования и прокладывание кабеля, а в территориально-распределенных сетях добавляются значительные затраты на арендную плату за использование инфокоммуникационных каналов связи. С одной стороны, по мере развития бизнес-процессов растет потребность в передаче все более значительных объемов информации, а с другой стороны может повышаться цена аренды ресурсов у местных, как правило малочисленных, операторов. При проектировании КСС необходимо точно прогнозировать объем передаваемых данных и решать вопросы аренды скорости передачи информации на участках доступа к ресурсам пакетных сетей (например, сети Интернет и специализированные сети технологии MPLS).

Начальный этап проектирования КСС особенно важен, поскольку просчеты и ошибки могут в дальнейшем привести к необходимости аренды дополнительных сетевых ресурсов и даже к созданию дополнительных, параллельных сетевых структур [2, 5].

Используем одно из базовых положений теории массового обслуживания о том, что интенсивность нагрузки характеризует среднее число одновременных соединений на участке сети [7], определим среднюю величину интенсивности трафика $Q_{\text{необх}}$ (в данном случае – необходимый ресурс скорости) как

$$Q_{\text{необх}} = B1 \times Y, \quad (1)$$

где величина $B1$ характеризует скорость кодека на одно соединение (Bit/rate);

Y – интенсивность нагрузки или среднее число соединений на участке сети в текущий момент времени.

Оценка по средней величине Q , как показано в формуле (1), не учитывает колебаний трафика. Не учитывается такое свойство как самоподобие потоков трафика, особенности изменения интенсивности потоков трафика во времени [6, 7]. Ее использование может привести к просчетам при проектировании как в выделении недостаточного ресурса скорости, так и в выделении избыточного ресурса.

В первом случае возрастает вероятность отказов в предоставлении связи, а во втором – требуются необоснованные расходы при аренде ресурса. Кроме того, при сравнении про-

токолов и технологий можно получить излишне пессимистичный или оптимистический результат.

Предлагается задействовать математический аппарат теории массового обслуживания для проведения оценок. Основываясь на данных публикаций [3, 6, 7] можно сделать предварительный вывод, что так называемые «накладные» расходы существенно влияют на пропускную способность для одного соединения, причем уменьшение пропускной способности наиболее выражено при использовании классических IP-кодеков.

В качестве объекта исследования рассмотрим участок доступа при включении IP PBX в сеть пакетной коммутации для этапа установления нового голосового соединения. Представим его как СМО вида $M/M/V_{\text{экв}}/V_{\text{экв}}$, где величина $V_{\text{экв}}$ обозначает число соединений, которое может быть реализовано на выделенном для этих целей ресурсе скорости Q . Такое представление позволяет использовать первую формулу Эрланга для расчета вероятности отказа в обслуживании вызова P , или при фиксированной величине $P_{\text{доп}}$ определять допустимую интенсивность нагрузки $Y_{\text{доп}}$. Отказ в обслуживании наступает, когда полностью использован весь ресурс скорости, доступный для данного вида трафика Q . Число эквивалентных каналов $V_{\text{экв}}$ будем определять по формуле

$$V_{\text{экв}} = Q / q, \quad (2)$$

где величина q характеризует усредненную скорость одного голосового соединения с учетом характеристик кодеков разного вида, их доли в общем количестве, величины накладных расходов в передаваемых пакетах с учетом особенностей технологий и протоколов пакетной сети

$$q = \sum_j B1j \times zj, \quad (3)$$

где j – фактор влияния; zj – оценка влияния j – фактора на величину q в относительных единицах; $B1j$ – усредненная скорость одного голосового соединения с учетом влияния j – фактора (например, использование конкретного кодека или определенного протокола защиты информации).

Обозначим среднее число одновременных соединений на участке сети как $Y_{\text{доп}}$, определяя его для заданного значения вероятности потерь вызовов на участке доступа $P_{\text{доп}}$ из-за занятости сети. Можем получить допустимое число пользователей в i -ом офисе как

$$N_{i\text{доп}} = Y_{i\text{доп}} / (y1 \times ki), \quad (4)$$

где $Y_{i\text{доп}}$ – допустимая интенсивность нагрузки, определенная по первой формуле Эрланга для заданного значения вероятности потерь вызовов на участке доступа $P_{\text{доп}}$ и числа эквивалентных каналов $V_{\text{экв}}$, определяемого по формуле (2); $y1$ – удельная абонентская нагрузка, Эрл; $N_{i\text{доп}}$ – допустимое число пользователей в i -ом офисе; Ki – доля вызовов, направляемых/поступающих в/из пакетную/пакетной сети от других офисов.

Величина $V_{\text{экв}}$ зависит от соотношения между аппаратами с разными типами кодеков, кроме того, возможно изменение принципов кодирования (переход в автоматическом режиме на более низкие скорости) при перегрузке.

В таблице 3 представлены результаты расчетов. Общий алгоритм расчетов следующий.

1. Определяем совокупность факторов влияния для конкретного случая и рассчитываем значение q по формуле (3).

2. Рассчитываем величину $V_{экв}$ по формуле (2), исходя из предполагаемых значений арендуемого ресурса скорости для речевого трафика.

3. По 1-ой формуле Эрланга, используя программу калькулятор Эрланга, получаем зависимость $Y_{идоп} = F(V_{экв})$ при $R_{доп} = const$. Но сначала находим верхнюю границу $V_{max} = Q/q$;

4. Для значений $Y_{идоп}$ получим допустимое число пользователей в i -ом офисе $N_{идоп}$.

Возможно изменение порядка расчета в соответствии с целями и задачами. Например, может стоять задача по оценке необходимой пропускной способности для речевого трафика на участке доступа Q при известном числе пользователей и заданном типе кодеков.

Проведем расчет в соответствии с предложенным алгоритмом для определения зависимости $N_{идоп} = F(Q)$. Предположим, что величина Q принимает значения $Q = 2 \text{ Мбит/с} - 5 \text{ Мбит/с}$. В офисе используется кодек G.711. Удельная абонентская нагрузка $y_1 = 0,2$ Эрл. Доля вызовов, направляемых/поступающих в/из пакетную /пакетной сети от других офисов $ki = 0,3$. Погрешность будет иметь место из-за того, что значения $V_{экв}$ будут целыми числами (округление в меньшую сторону). В таблице 1 приводятся результаты расчетов. Аналогичные расчеты, выполненные для кодека G.723.1 с исходной скоростью Bit rate = 5,3 кбит/с, представлены в таблице 2. Были учтены возможности кодека G.722 по изменению скорости Bit/rate, а именно проведены расчеты $N_{идоп}$ для фиксированной величины Q и значений скорости Bit rate = 24, 32, 48, 56, 64 кбит/с (см. табл. 3).

Таблица 1

Результаты расчетов допустимой величины $N_{идоп}$ при использовании кодека G.711 со скоростью Bit/rate = 64 кбит/с и использовании протокола MPLS для исходных данных $y_1 = 0,2$ Эрл, $ki = 0,3$

Q, Мбит/с	q, кбит/с	V _{экв} MPLS	R _{доп} , промили	Y _{идоп} MPLS	N _{идоп} MPLS
2	88,8	22	1	10,8	180
3	88,8	33	1	18,88	314
4	88,8	45	1	28,45	474
5	88,8	56	1	37,46	624
2	88,8	22	5	12,6	209
3	88,8	33	5	21,51	358
4	88,8	45	5	31,66	527
5	88,8	56	5	41,23	687

Таким образом, сравнение кодеков с позиции пропускной способности участка доступа показывает, что при прочих равных условиях IP-кодек дает трехкратное преимущество по числу пользователей.

Возможность регулирования пропускной способности путем снижения скорости в кодеке G.722 будет давать меньший эффект, чем полный переход на кодеки IP-телефонии, но с

другой стороны – все-таки позволит увеличить число пользователей в конкретном офисе более чем вдвое при фиксированном допустимом значении потерь по вызовам.

Таблица 2

Результаты расчетов допустимого числа пользователей в i -ом офисе корпоративной сети при использовании кодека G.723.1 со скоростью Bit/rate = 5,3 кбит/с и использовании протокола MPLS для исходных данных $y_1 = 0,2$ Эрл, $ki = 0,3$

Q, Мбит/с	q, кбит/с	V _{экв} MPLS	R _{доп} , промили	Y _{идоп} MPLS	N _{идоп} MPLS
2	32,6	61	1	41,6	693
3	32,6	92	1	68,2	1136
4	32,6	122	1	94,7	1578
5	32,6	153	1	122,7	2043
2	32,6	61	5	45,6	760
3	32,6	92	5	73,6	1225
4	32,6	122	5	101,2	1686
5	32,6	153	5	130,2	2169

Таблица 3

Результаты расчетов допустимого числа пользователей в i -ом офисе корпоративной сети при использовании кодека G.722 и протокола MPLS для исходных данных $y_1 = 0,2$ Эрл, $ki = 0,3$, R_{доп} = 1 промилля

Скорость B1, Bit/rate кбит/с	q, кбит/с	Q, Мбит/с	V _{экв} MPLS	Y _{идоп} MPLS	N _{идоп} MPLS
64	88,8	2	22	10,8	180
56	80,8	2	24	12,2	203
48	72,8	2	27	14,4	240
32	56,8	2	35	20,5	341
24	48,8	2	40	24,4	406

4 Результаты моделирования работы оборудования мобильного доступа 5G в корпоративных сетях связи

Наблюдается быстрое внедрение решений оборудования 5G на участке доступа корпоративных сетей связи. Важной особенностью является то, что в 5G NR применяются два новых канальных кода с исправлением ошибок. В частности, коды LDPC (Low Density Parity Check) заменили турбокоды для каналов данных, а полярные коды заменили сверточные коды с нейтрализацией хвоста (Tail-Biting Convolutional Codes – TBCC) каналов управления. Сообщение представляет собой сигнал в физическом канале передачи данных линии Downlink (Physical Downlink Shared Channel – PDSCH).

Для определения исходных параметров моделирования было решено обратиться к показателям, зафиксированным в запущенных на момент июля 2022 года сетях 5G [8-11]. По результатам усреднения скорости закачки (Download speed) десятки операторов-лидеров, была установлена исходная планка пропускной способности канала в 380 Мбит/сек.

Еще одним параметром, который можно определить на основании данных из открытых источников, является имеющаяся в наличии у оператора и используемая для сети 5G NR

полоса спектра. На основании данных по запущенным в коммерческое использование 5G сетям [11, 12] для рассмотрения был выбран часто используемый частотный диапазон – бэнд n78 (3,5 ГГц), в котором поддерживается временной дуплекс (TDD).

На физическом уровне объем передаваемых данных связан с размером транспортного блока (TBS). Отметим, что расчеты TBS по методике, изложенной в рекомендации TR 38.214 [13], предполагают в канале PDSCH применение LDPC кода. Размеры транспортных блоков, скорости кода и порядки модуляции для случая полярного кода принимались равными тем, что получены для LDPC. В таблице 4 приведены выбранные для моделирования некоторые параметры и размеры транспортных блоков [14, 15].

Таблица 4

Параметры расчетов и размеры транспортных блоков

Конфигурация	Высоко-скоростная	Средне-скоростная	Низко-скоростная
Модуляция	256-QAM	16-QAM	QPSK
Скорость кода	948/1024	340/1024	251/1024
Количество выделенных ресурсных блоков RB	22	22	22
Размер транспортного блока (TBS)	25608	4480	1736

Одним из ограничений применения полярных кодов в 5G NR является малый предельный размер закодированного блока на выходе кодера. В случае линии Downlink он составляет 512 бит, а максимальное количество информационных символов равно 140 битам. Для все заданных конфигураций задавался пороговый показатель коэффициента ошибки передачи блока (BLER) в 10% [10-12].

Имитационное моделирование проводилось в среде MATLAB 2022b, предоставляющей широкие возможности для настройки компонентов сигналов стандарта 5G NR.

На рисунке 2 приведена блок-схема используемой модели и основные проводимые в ней операции. Предварительно были определены максимальные значения отношения сигнал-шум, при превышении которых BLER был значительно меньше целевого показателя в 10%. Некоторые результаты моделирования представлены на рисунке 3.

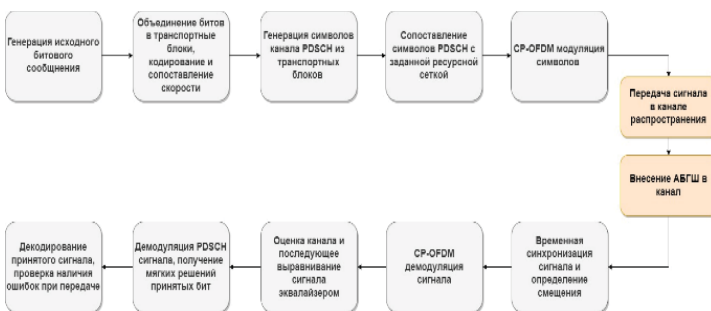


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели

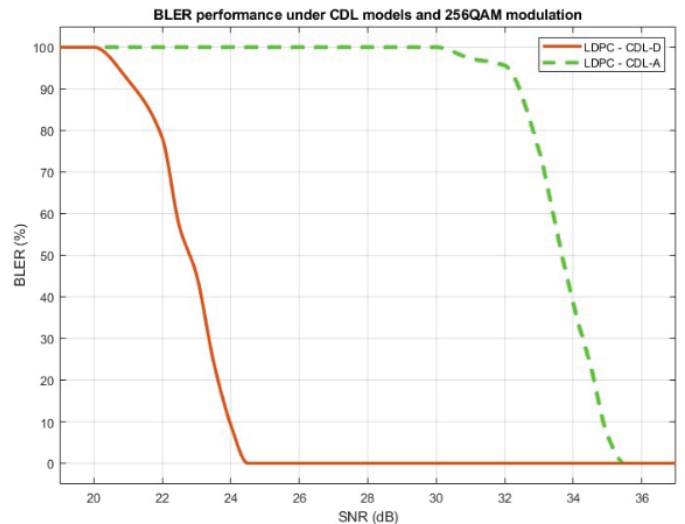


Рис. 3. Зависимости BLER от показателя отношение сигнал/шум SNR при кодировании LDPC для высокоскоростной конфигурации в каналах CDL-D, CDL-A

Ввиду большого размера блоков, предоставленного одному устройству, для всех моделей каналов достижение целевого значения BLER в 10% потребовало наличия достаточно высоких значений отношения сигнал/шум SNR. В результате искажений возникающая ошибка декодирования одного бита нарушает целостность всего транспортного блока, что критичнее для блоков больших размеров.

4 Выводы

1. На пропускную способность участков доступа КСС влияют такие факторы как:

- развитие технологий кодирования и декодирования информации (в частности, переход на кодеки улучшенного качества преобразования речи, такие как G.722);
- увеличение числа пользователей и рост объемов трафика в конкретных филиалах корпорации;
- просчеты в распределении предоставляемой скорости доступа как между офисами, так и между приложениями и пользователями разных классов обслуживания (возможно изменение предпочтений в пользовании оконечными устройствами);
- перераспределение потоков трафика между филиалами компании при появлении новых офисов или изменение их местоположения;
- рост трафика удаленного доступа;
- изменение общепринятых подходов к защите трафика в пакетных сетях (переход к использованию туннелирования в сочетании с технологией IPSec или с технологией MPLS).

2. Переход к принципам организации тоннелей в сетевых структурах таких как IP-MPLS позволяет увеличить защищенность и снизить общие задержки передачи, но повышает требования к обоснованию предоставляемого ресурса скорости. Актуальность оценки вероятности отказов из-за недостаточности ресурса скорости на участке доступа связана с

многообразием используемых кодеков и возможным быстрым ростом числа сотрудников в отдельных филиалах компаний. Фактически речь идет о новом факторе отказов в обслуживании, который необходимо учитывать. В качестве инструмента расчетов допустимого числа пользователей в офисах предлагается использовать модели Эрланга.

3. Проведенное имитационное моделирование системы мобильного доступа поколения 5G показало, что высокий порядок модуляции (256-QAM) – одна из причин, ведущих к высоким требованиям к SNR для успешной передачи сообщений. Из-за малого расстояния между модуляционными символами в случае помех при передаче велика вероятность ошибочного приема и последующего неверного декодирования. Был отмечен серьезный выигрыш полярных кодов, стандартизованных 5G NR, по сравнению с LDPC 5G NR, и, одновременно, проигрыш в задержке декодирования.

Литература

1. Степанова И.В., Патенченкова Е.К., Кнаж Нума. Оценка факторов влияния на пропускную способность сетей пакетной коммутации // Научные исследования в космических исследованиях Земли, 2023, №5. С. 48-56.
2. Степанова И.В., Кнаж Нума. Особенности организации сетей связи с привлечением технологии MPLS // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 63-68.
3. Степанова И.В., Куник П.А., Кнаж Нума. Анализ подходов к развертыванию корпоративных систем мобильного широкополос-

ного доступа // Труды международной научно-технической конференции "Телекоммуникационные и вычислительные системы. Международный форум информатизации МФИ 2021. Москва. С. 15 -30.

4. Кнаж Нума. Влияние протокола туннелирования на требуемую полосу пропускания // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Том 14. №3. С. 55-60.

5. Степанова И.В., Егоров А.Н. Построение сети связи горнодобывающего комплекса на оборудовании перспективной технологии MESH // Труды международной научно-технической конференции "Телекоммуникационные и вычислительные системы. Международный форум информатизации МФИ 2021. Москва. С. 5-14.

6. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 290 с.

7. Пшеничников А.П. Теория телетрафика. Учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 212 с.

8. Xu J., Yuan Y. Channel Coding in 5G New Radio (1st ed.). CRC Press. 2022.

9. Christopher Cox. An Introduction to 5G: The New Radio, 5G Network and Beyond John Wiley & Sons, 2021.

10. 3GPP TS 38.212, v15.0.0, NR; Multiplexing and channel coding.

11. URL: <https://www.opensignal.com/reports/2022/09/global/5g-global-mobile-network-experience-awards>

12. UR https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_5G_NR_networks

13. Toskala A., Nakamura T., Holma H. 5G Technology: 3GPP New Radio, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2019.

14. Ulrich Trick an Introduction to the 5th Generation Mobile Networks De Gruyter Oldenbourg, 2021.

15. Haesik Kim Design and Optimization for 5G Wireless Communications John Wiley & Sons, 2020.

PROBLEMS OF ORGANIZING FIXED AND MOBILE ACCESS IN CORPORATE COMMUNICATION NETWORKS

IRINA V. STEPANOVA

Moscow, Russia, w515iv@mail.ru

KNAJ NOUMA

Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction: The problem of predicting the required throughput of various sections of packet switching networks is widely known. The occurrence of congestion in the access area to network resources may be a consequence of the transition to more advanced information encoding devices. Often the wishes of users and the capabilities of telecom operators come into conflict. The introduction and use of IP/MPLS label switching technology in combination with the organization of tunnels to some extent eliminates the problem of delays in the transmission of packets over the network. However, when using a fixed tunnel speed resource, miscalculations are possible in determining it, both up and down. On the other hand, for telecom operators it is important to effectively use their own resources (network resources) while meeting the requirements for the expected quality of information transmission. In addition, there is a wide range of codecs that differ from each other not only in cost, but also in such indicators as the speed of one connection and the quality of the recovered signal. Codecs with improved characteristics and, as a result, higher speed per connection have become developed and widespread. As an alternative, codecs with variable speed have appeared. The choice of codecs by the customer can sig-

KEYWORDS: corporate communication network, fixed access, probability of call losses, speed resource, mobile connection, possibility of message loss.

nificantly affect such an indicator as the probability of denial of service due to the exhaustion of the allocated speed resource. It is of interest to assess how dependent this indicator is on the speed of the codec and what are the prospects for using codecs with variable speed. For corporate communication networks (CCN), it is necessary to take into account different approaches to organizing fixed and mobile access. For some types of CCN, the transition to mobile communication equipment of the 5G generation is promising, which, in particular, facilitates the organization of remote access for employees. At the same time, the issues of information security from unauthorized access and the problem of message loss during transmission become acute. **Purpose of the work:** to present the results of a study assessing the probability of denial of call service in the IP/MPLS technology network access section due to the lack of a free resource. The validity of this approach has been proven analytically, taking into account the self-similar nature of traffic and using methods from the classical theory of teletraffic. **Result:** an approach has been proposed for estimating the probability of denials of call service for fixed access, and for mobile access the results of modeling the operation of a 5G technology communication system with a given amount of message loss have been obtained.



REFERENCES

1. I.V. Stepanova, E.K. Patenchenkova, Knaj Nouma, "Assessment of factors influencing the throughput of packet switching networks," *H&ES*, 2023, No. 5, pp. 48-56.
2. I.V. Stepanova, Knaj Nouma, "Features of organizing communication networks using MPLS technology," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 5, pp. 63-68.
3. I.V. Stepanova, P.A. Kunik, Knaj Nouma, "Analysis of approaches to the deployment of enterprise mobile broadband access systems," *Proceedings of the international scientific and technical conference "Telecommunication and computing systems - International Forum of Informatization MFI 2021*, Moscow, pp.15-30.
4. Knaj Nouma, "Impact of the tunneling protocol on the required bandwidth," *Systems for synchronization, signal generation and processing*. 2023. Vol. 14. No. 3, pp. 55-60.
5. I.V. Stepanova, A.N. Egorov, "Construction of a communication network for a mining complex using advanced MESH technology equipment," *Proceedings of the international scientific and technical conference "Telecommunication and computing systems. International Forum of Informatization MFI 2021*, Moscow, pp. 5-14.
6. A.P. Pshenichnikov, "Teletraffic theory. Textbook for universities," Moscow: Hotline – Telecom, 2017. 212 p.
7. B.Ya. Lichtzinder, "Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)," Moscow: Hotline – Telecom, 2018. 290 p.
8. J. Xu, Y Yuan, "Channel Coding in 5G New Radio." (1st ed.). CRC Press. 2022.
9. Cox Christopher, "An Introduction to 5G: The New Radio," 5G Network and Beyond John Wiley & Sons, 2021.
10. 3GPP TS 38.212, v15.0.0, NR; Multiplexing and channel coding.
11. URL: <https://www.opensignal.com/reports/2022/09/global/5g-global-mobile-network-experience-awards>.
12. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_5G_NR_networks.
13. A. Toskala, T. Nakamura, H. Holma, "5G Technology: 3GPP New Radio," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2019.
14. "Ulrich Trick An Introduction to the 5th Generation Mobile Networks," De Gruyter Oldenbourg, 2021.
15. "Haesik Kim Design and Optimization for 5G Wireless Communications," John Wiley & Sons, 2020.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Irina V. Stepanova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, MTUCI, Moscow, Russia, w515iv@mail.ru
Knaj Nouma, graduate student, MTUSI, Moscow, Russia

For citation: Stepanova I.V., Knaj Nouma. Building a combined code based on turbo code with additional bit encoding. *H&ES Reserch*. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 13-19. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-13-19 (In Rus)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СРЕДСТВ И СЕТЕЙ СВЯЗИ

ШЕРСТНЕВА

Алина Анатольевна¹

ШЕРСТНЕВА

Ольга Григорьевна²

АННОТАЦИЯ

Введение: При наблюдении за функционированием как инфокоммуникационных сетей в целом, так и за отдельными сетевыми элементами системой диагностики фиксируются все случайные события, связанные с их работоспособностью. Негативными последствиями этих событий являются отказы, полные или частичные, неисправности, сбой программного обеспечения, ошибки, вызванные как внешними факторами, так и внутрисистемными процессами. Для интеграции параметров надежности функционирования сети используется комплексный показатель - коэффициент готовности. В его состав входят единичные показатели, характеризующие только одно свойство надежности сетевого функционирования. **Методы:** при расчете комплексного показателя необходимо учитывать тот факт, что система диагностики, являющаяся самостоятельной системой, также подвергается как внешнему, так и внутреннему воздействию. Значит параметры, оценивающие достоверность ее работы, и вероятность ошибочно принятых решений по восстановлению условно неработоспособных сетевых элементов должны входить в качестве единичных показателей в состав комплексной оценки готовности сети предоставлять услуги связи. Ошибочно принятые решения системой автоматической диагностики корректируются в процессе выполнения восстановительных работ путем проведения дополнительных, более углубленных методик тестирования. **Результаты:** В статье выявлены аналитические зависимости величины комплексных показателей надежности от вероятностей ошибок системы диагностики. Приведены математические модели функционирования сетевого объекта и рассчитаны аналитические выражения для случая полностью достоверной и частично недостоверной работы системы диагностики. Приведены выведенные графики зависимости вероятностей и диаграмма оценки вероятности ошибок системы диагностики.

Сведения об авторах:

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия, shers7neva@gmail.com

² к.т.н., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия, o.g.sherstneva@ya.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инфокоммуникационные системы, диагностика, коэффициент готовности, математическая модель, ошибка диагностики, надежность, показатели надежности.

Для цитирования: Шерстнева А.А., Шерстнева О.Г. Методика оценки функционирования системы диагностики средств и сетей связи // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 20-26. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-20-26



Введение

К сложному оборудованию телекоммуникационных систем и сетей с централизованным управлением функционирования и контроля предъявляются высокие требования к качеству обслуживания. Основными значениями, вводимыми в алгоритмы и методики расчета показателей качества, являются статистические данные системы диагностики. И, если, алгоритмы и методы являются проверенным средством выполняемых вычислений, то вводимые данные не всегда являются безусловно достоверными.

Этому есть логическое объяснение. Во-первых, разброс получаемых значений одного и того же параметра может быть очень велик и не всегда есть возможность принять однозначное решение по его реальной величине. Во-вторых, количество самих измеряемых параметров хотя и ограничено, тем не менее, исчисляется сотнями. Причем параметры, имеющие одинаковое название, но относящиеся к разным устройствам, например, к узлу доступа и к узлу коммутации имеют разные требования к их граничным значениям. И, наконец, ошибки в программном обеспечении не всегда однозначно идентифицируются. Например, программный сбой вызывает неправильное выполнение процедуры согласования баз данных. Причина данной ошибки может быть вызвана не верным согласованием таблиц в базе данных. Ряд одних и тех же данных используется в разных базах данных и одновременно в нескольких таблицах баз данных.

В некоторых таблицах данные взаимосвязаны. Поэтому первоначально необходимо ввести так называемые исходные данные, а затем те, что с ними связаны. Исходные данные также подлежат проверке на исправление и согласованность после обнаружения, например, программного сбоя. Для каждого пользователя в программном обеспечении установлена защита от ввода несанкционированных данных или данных, которые не соответствуют установленным правилам и порядку ввода. На крайний случай существует резервная копия базы данных. Однако повторная загрузка данных также чревато негативными последствиями, поскольку может содержать те или иные недопустимые действия. Право на осуществление контроля обычно имеет только системный администратор, а на вывод или считывание информации имеют все допущенные им пользователи.

Следует также учитывать и то, что запуск систем измерений, как правило, осуществляется по расписанию, установленному самой системой диагностики. Одновременно нельзя осуществлять процедуру измерений по разным параметрам на одних и тех же устройствах. Поэтому процесс комплексной диагностики может продлиться неопределенной время. Если в системе диагностики наблюдаются какие-то неисправности или временные сбои, то полученные результаты продемонстрируют не верное представление о работе системы в целом.

Таким образом, оценка работы системы диагностики является отдельной задачей в области телекоммуникаций. Актуальность ее решения продиктована и существующим соглашением об уровне обслуживания между поставщиком услуги и потребителем.

Постановка задачи

Задача формулируется как разработка методики расчета показателей системы диагностики на предмет выявления ошибок первого, второго рода [ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Национальный стандарт Российской Федерации. ЗАО «НИЦ КД», дата введения 01.01.2022, 40с].

Однако прежде, чем разрабатывать методику расчета этих показателей необходимо выполнить расчет коэффициента недоступности к сетевым услугам и среднее время недоступности услуг в условиях, когда система диагностики работает идеально. Обозначенная задача решается с помощью математической модели, представленной как граф состояний объекта контроля (рис. 1), находящегося в состоянии диагностики его работоспособности.

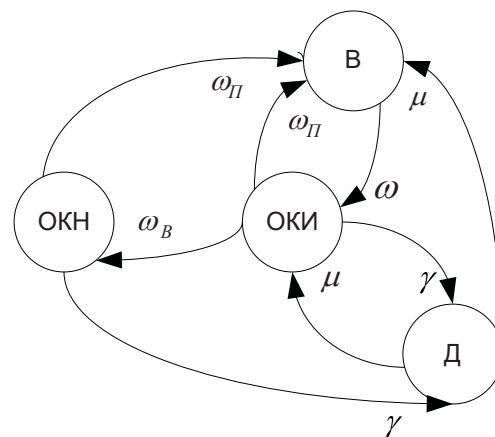


Рис. 1. Математическая модель при достоверной работе системы диагностики

При рассмотрении процесса жизнедеятельности сетевого объекта с точки зрения надежности его работы основной целью системы диагностики является фиксирование неисправности. Под неисправностью здесь будем понимать, как, собственно, сам термин «неисправность» в соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021 (Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Национальный стандарт Российской Федерации. ЗАО «НИЦ КД», дата введения 01.01.2022, 40 с.), так и отказ любого вида, в том числе и частичный функциональный отказ.

В случае допущения о том, что система диагностики работает безошибочно, считаем, что с вероятностью равной единице фиксируются все отказы, обнаруживаемые при выполнении как временного контроля, так и постоянного. Отметим, что в понятие «временной контроль» здесь включен контроль, производимый как системой автоматической диагностики, так и обслуживающим персоналом в качестве контроля по требованию.

В математической модели рисунка 1, приведенной для этого случая, в отдельные состояния выделены два основных состояния: исправное состояние объекта контроля (ОКИ) и неисправное (ОКН).

В состоянии ОКН объект переходит в двух случаях. Первый – это когда система постоянного контроля не выявляет полный отказ из-за ограниченной глубины контроля. Второй – это частичный функциональный отказ объекта, который не приводит к полному отказу, однако некоторые рабочие функции объект не выполняет. Таким образом, при первичном временном контроле, выполняемом по параметрам, обеспечивающим жизнеспособность объекта, отказ не был обнаружен. Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 (Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Национальный стандарт Российской Федерации. ЗАО «НИЦ КД», дата введения 01.01.2022, 40 с.) такое состояние объекта относится к частично неработоспособному состоянию. А обнаружен такой отказ может быть также в двух случаях. Либо в случае, когда частичный отказ приводит к полному отказу, который выявляется постоянным контролем. Либо последствия частичного отказа таковы, что будут выявлены при более детальном временном контроле, выполняемом, в том числе, и обслуживающим персоналом.

Также отдельными состояниями являются состояние диагностики (Д) и состояние восстановления (В). Переходы из одного состояния в другое маркированы в соответствии с логикой происходящих событий. Переменной случайной величиной ω отмечена интенсивность восстановления, переменными ω_B и ω_{Π} – интенсивность выполнения временного и постоянного контроля, переменными γ и μ – интенсивность выполнения временного контроля и его завершения.

Целью исследований является расчет комплексных показателей надежности, таких как среднее время нахождения объекта контроля в состоянии неготовности к выполнению всех или части выполняемых им функций и коэффициент готовности/неготовности, первоначально, при идеальных условиях эксплуатации и абсолютно надежной работе системы диагностики. Результатом исследований – выявление аналитических зависимостей комплексных показателей надежности от случайных величин, которые в рассматриваемом случае проявляются в виде интенсивностей отказов и восстановлений. Выполненный расчет произведен на основе метода, изложенного в [1]. Получены следующие аналитические выражения:

$$K_{\Gamma} = \frac{\omega(\omega_D + \gamma) - \omega\omega_{\Pi}}{\omega(\omega_D + \gamma) + \omega_D(\omega_{\Pi} + \gamma)},$$

$$K_{НГ} = 1 - K_{\Gamma} = \frac{\omega\omega_{\Pi} + \omega_D(\omega_{\Pi} + \gamma)}{\omega(\omega_D + \gamma) + \omega_D(\omega_{\Pi} + \gamma)},$$

$$t_{Н} = \frac{\omega_B}{\omega_D(\omega_{\Pi} + \gamma)}.$$

Большой интерес для анализа надежности объекта контроля представляет коэффициент неготовности, чем коэффициент готовности, поскольку он вычисляется как вероятность того, что объект окажется либо в полном, либо частично неработоспособном состоянии. А второй параметр, временной, покажет, сколько долго объект может находиться в этом состоянии.

Однако, поскольку сама система диагностики также является системой, подверженной разного рода неисправностям, в том числе и кратковременным сбоям программного обеспечения, который фиксируется как случайное событие, вызванное несогласованностью вводимых данных, результаты ее работы могут быть недостоверны. В этом случае математическая модель должна быть скорректирована так, как показано на рисунке 2, т.е. в ней учтены параметры, характеризующие работу системы диагностики на предмет достоверности полученных результатов проверки.

Обозначение основных состояний на рисунке 2 не изменилось по сравнению с обозначениями рисунка 1. Но переменные, полученные в результате случайных событий, происходящих как с объектом контроля, так и системой диагностики и символизирующие переход объекта контроля из одного состояния в другое дополнены переменными, характеризующими работу системы диагностики. Так переменные α и β обозначают ошибки системы диагностики первого и второго рода соответственно.

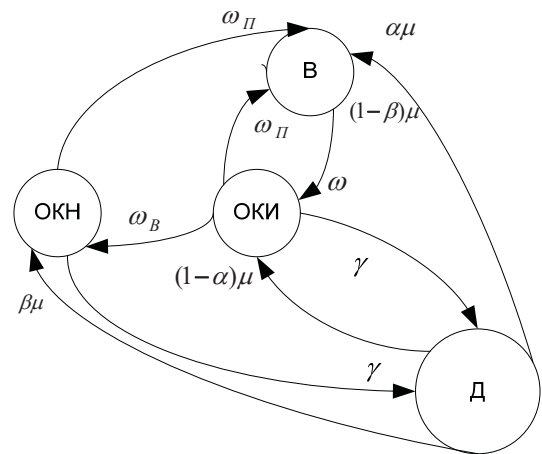


Рис. 2. Математическая модель с учетом неидеальной работы системы диагностики

Обозначение основных состояний на рисунке 2 не изменилось по сравнению с обозначениями рисунка 1. Но переменные, полученные в результате случайных событий, происходящих как с объектом контроля, так и системой диагностики и символизирующие переход объекта контроля из одного состояния в другое дополнены переменными, характеризующими работу системы диагностики. Так переменные α и β обозначают ошибки системы диагностики первого и второго рода соответственно.

Для рассматриваемого случая расчетные формулы коэффициента неготовности и среднего времени нахождения объекта контроля в состоянии неготовности выполнять все и часть своих функций имеют следующий вид:

$$K_{НГ} = \frac{\omega_B\omega + (\omega_{\Pi} + \gamma(1 - \beta))(\omega_B + \omega_{\Pi} + \alpha\gamma)}{\omega(\omega_B + \omega_{\Pi} + \gamma(1 - \beta))(\omega_B + \omega_{\Pi} + \alpha\gamma)},$$

$$t_{\Gamma} = \frac{\omega_B}{(\omega_{\Pi} + \gamma(1 - \beta))(\omega_B + \omega_{\Pi} + \alpha\gamma)}$$

Неизвестными величинами в приведенных аналитических выражениях является ряд параметров, а именно ω_B , ω_{Π} , α , β .

Теоретические исследования

Указанные параметры ω_B , ω_{Π} , α , β могут быть рассчитаны с помощью аналитических выражений по статистическим данным [2, 3], полученным в ходе выполнения объектом контроля своих функций. Это даст возможность рассчитать их реальную величину и дать точечную оценку этим параметрам. Сбор статистических данных осуществляется системой диагностики [4-6]. Обработка результатов реализуется людскими ресурсами в ходе выполнения процесса восстановления. Считаем, что объект контроля относится к восстанавливаемым объектам и его восстановление происходит в условиях выполнения ремонтных работ.

Однако на восстановление объект контроля поступает в результате выполнения двух видов диагностики: временного и постоянного. Соответственно эти два вида диагностики, обладая разной глубиной и периодичностью обнаруживают разные виды отказов. Исходя из этих рассуждений в процессе восстановления, обнаруженные отказы классифицируются по видам диагностики. Следует учитывать и то, что объект контроля с частичным функциональным отказом, находясь в состоянии необнаруженного отказа, может быть подвержен и отказу, обнаруживаемому постоянным контролем.

В этом случае он поступает на восстановление с двумя видами отказов одновременно. Частичный отказ, необнаруженный при первичном временном контроле увеличивает время нахождения объекта контроля в состоянии не полной готовности выполнять свои функции, тем не менее, он находится в рабочей конфигурации. Однако суть временного контроля заключается в том, что в каждый временной интервал тестируются определенные параметры.

Таким образом, есть несколько тестирующих программ, которые выполняются в разное время, имеют разную продолжительность и тестируют объект контроля по разным тестовым параметрам. Таким образом, состояние объекта контроля с частичным отказом будет обнаружено или в ходе проведения очередного временного контроля, или в ходе выполнения предупредительно-корректирующих мероприятий, выполняемых обслуживаемым персоналом в связи, например, с ухудшением качества предоставляемых услуг.

Исходя из приведенных выше рассуждений, составлена математическая модель (рис. 3), отражающая процесс восстановления неработоспособного объекта контроля.

В математической модели процесс восстановления разделен на три состояния, которые обозначены в соответствии с видом системы диагностики, обнаружившей отказ.

На рисунке 3 состояние восстановления распределено на три состояния Вв, Вп, Ввп – присутствует отказ, обнаруживаемый временным контролем, присутствует отказ, обнаруживаемый постоянным контролем, присутствует два отказа, обнаруживаемых системой диагностики в совокупности видов

контроля. Процесс включения объекта контроля в эти состояния является вероятностным, поэтому переходы в состояния обозначены через вероятности фиксации отказов – P_B , P_{Π} , $P_{ВП}$.

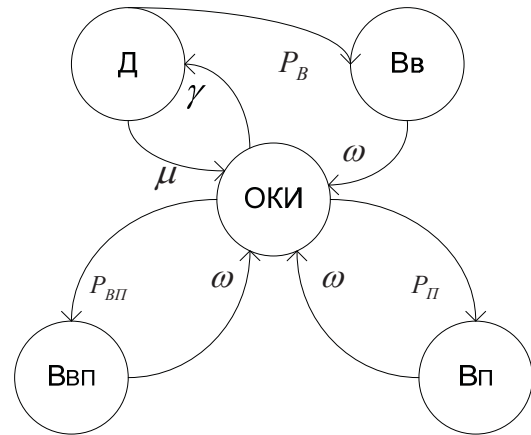


Рис. 3. Математическая модель процесса восстановления

Далее выполняется сопоставление двух математических моделей (рис. 1 и 3) и определяются расчетные формулы, в которых данные, полученные в процессе восстановления, ставятся в соответствие статистическим данным, полученным в процессе диагностики. Конечный вид выявленных аналитических выражений для первого случая, когда система диагностики идеальна

$$\omega_{\Pi} = \frac{\gamma(1 - P_B)}{n_T}, \quad \omega_B = \frac{\gamma P_B(1 + n_T + \gamma P_B)}{n_T(n_T - P_B)}$$

При сопоставлении математических моделей, показанных на рисунках 2 и 3, при условии неидеальной системы диагностики конечный вид полученных аналитических выражений для расчета α и β

$$1 - \beta = \frac{1}{\gamma} \frac{n_T(\omega_B + \omega_{\Pi} + \alpha\gamma)(\gamma(\omega_B + \omega_{\Pi}) - \omega_{\Pi})}{\gamma + n_T(\omega_B + \omega_{\Pi} + \gamma)}$$

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \frac{P_P(\omega_B + \omega_{\Pi})}{1 - P_P}$$

Параметр n_T – общее число выполненных тестирований сетевого объекта.

Таким образом, по статистическим данным системы диагностики и результатам, полученным в процессе восстановления можно дать точечную оценку всех перечисленных показателей, в том числе и оценить работу самой системы диагностики.

Экспериментальный анализ

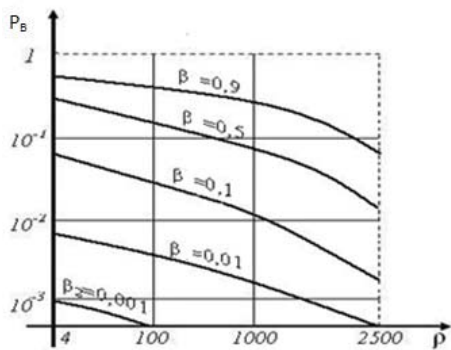
Полученные результаты позволяют вычислить точечные оценки ω_B , ω_{Π} , α , β через параметры системы диагностики P_P , P_B , P_{Π} , $P_{ВП}$. Показатель P_P символизирует вероятность того, что в процессе восстановления отказ, зафиксированный системой диагностики, не был подтвержден, т.е.

имела место ошибка первого рода. На практике встречаются такие ситуации. Обычно они вызваны тем, что в результате накопленного числа программных сбоев, например, из-за непредсказуемых внешних воздействий или внутрисистемных ошибок, объект автоматически выводится из рабочей конфигурации.

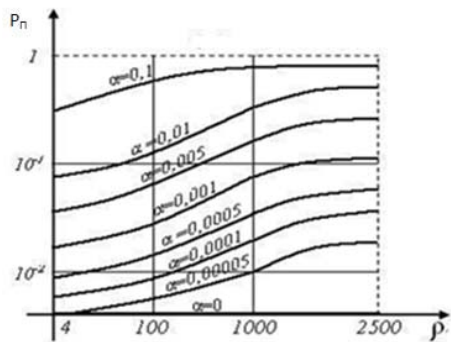
При разработке математических моделей рисунков 1 и 2 относительно вероятностей ошибок было сделано два допущения. Первое допущение о том, что вероятность ошибки третьего рода исключается, т.е. обслуживающий персонал действует строго по инструкции в соответствии с требованиями, прописанными в технических условиях по эксплуатации. Второе, что исключается вероятность ошибки постоянного контроля второго рода.

Путем моделирования описанных выше процессов, введения в программу моделирования значения статистических данных в приведенные аналитические выражения можно визуализировать получаемые результаты в виде графиков зависимостей и диаграмм.

Примеры полученных графиков зависимостей вероятностных характеристик работы системы диагностики приведены на рисунке 4.



а) график зависимости P_B от ρ



б) график зависимости P_P от ρ

Рис. 4. Графики зависимости вероятности ошибок системы диагностики

Для наглядности графиков зависимости введен показатель $\rho = \frac{\gamma}{\omega_B + \omega_P}$.

По приведенным графикам зависимости можно отследить как величина ошибок временного и постоянного контроля

влияет на вероятностные показатели, рассчитанные при восстановлении объекта контроля. И как следствие, влияет на величину коэффициента готовности и среднего времени нахождения сетевого объекта в состоянии полной или частичной неработоспособности.

На диаграмме рисунка 5 показаны в процентном соотношении идеальная работа системы диагностики и доля вероятностей ошибок первого и второго рода при условии общей интенсивности отказов в пределах от 1×10^{-5} до $0,1 \text{ час}^{-1}$.

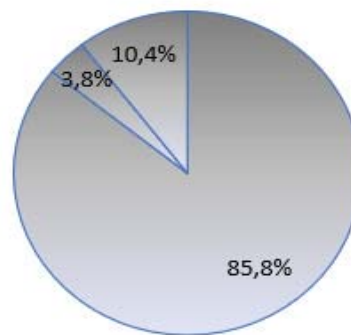


Рис. 5. Диаграмма сравнения результатов работы системы диагностики

На диаграмме в процентном соотношении выделены выявленное число ошибок первого рода (3,8%), число ошибок второго рода (10,4%).

Результаты скорректированы в процессе выполнения восстановительных работ и объясняются следующим образом. При первоначальной диагностике объекта, находящегося в рабочей конфигурации, был выставлен код отказа и объект был заблокирован. Однако при более детальном рассмотрении уже в условиях нахождения объекта на восстановлении, код ошибки был изменен, поскольку первоначальные сведения о его состоянии были лишь следствием, но не причиной отказа. Такая ситуация относится к ошибкам системы первоначальной диагностики.

Заключение

При оценке работоспособности теле- и инфокоммуникационных систем опираются лишь на результаты работы системы диагностики [7-12]. Система диагностики охватывает большой ряд параметров, характеризующих доступность и качество предоставляемых услуг, которые, в свою очередь, являются свойствами такого всеобъемлющего понятия, как надежность. Но поскольку система диагностики по своей сути также является отдельной системой, то она подвержена таким же отказам, как, собственно, и любая технически и программно сложная система.

Исходя из полученных аналитических выражений следует вывод, что при выполнении диагностики в процессе восстановления следует различать и фиксировать причины, по которым контролируемый объект попал на восстановление.

В статье выполнена точечная оценка исследуемых величин, однако для получения более достоверных результатов при их анализе с целью дальнейших исследований необхо-



дима интервальная оценка, т.е. необходимо заручиться верхними и нижними доверительными границами исходных статистических данных, получаемых от системы диагностики.

Для достижения этой цели можно предложить следующий алгоритм действий. Первоначально получить интервальные оценки для показателей, которые устанавливаются непосредственно в процессе функционирования инфокоммуникационной сети или отдельного контролируемого сетевого объекта. Например, это могут быть вероятности фиксации отказов, обозначенных в статье как P_p , P_B , P_{II} , $P_{ВП}$.

В дальнейшем установить характер зависимости между такими показателями как ω_B , ω_{II} , α , β и параметрами, полученными непосредственно при выполнении диагностики контролируемого объекта. Затем установить доверительные границы искомых величин путем подстановки в расчетные формулы уже этих новых значений, воспользовавшись, например, ГОСТ Р ИСО 28640-2012 (Статистические методы. Генерация случайных чисел. 15 с.), ГОСТ Р ИСО 28640-2012 (Статистические методы. Генерация случайных чисел. 15 с.) или методами, изложенными в [13-16]. Для определения монотонности функций от каждой искомой величины необходимо выполнить дифференцирование и определить знак, соответствующей частной производной.

Аппаратная и программная реализация инфокоммуникационных систем постоянно совершенствуется и вместе с ней совершенствуются, усложняются системы диагностики, поскольку требуется контролировать все большее число показателей. В связи с этим не редким явлением стала подмена причинно-следственных связей при возникновении отказов.

Для установления реальной причины отказа, необходимо выделять коды ошибок системы диагностики, которые были вызваны отклонениями от нормального функционирования инфокоммуникационной системы, но не внесены в перечень кодов ошибок и в реестр параметров контроля и диагностики.

Такую работу необходимо выполнять с целью дальнейшей корректировки и усовершенствования систем диагностики. Вопросы оценивания параметров инфокоммуникационной системы и системы диагностики актуальны сами по себе в различных прикладных задачах, поэтому полученные в работе результаты представляют интерес для широкого круга технических специальностей.

Литература

1. Шерстнева О.Г., Шерстнева А.А. Анализ сети связи с учетом показателей надежности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2020. № 73. С. 52-58.

2. Wasserman L. All of Statistics. New York, Springer, 2004, 433 p.
3. Zain Aalabdain Al Namer. Systematization of approaches to the development of quality systems indicators and network services reliability // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2021. №5, pp. 58-61.
4. Карганов В.В. Классы и показатели эффективности работы современных телекоммуникационных систем и сетей, способы их тарификации // Сборник трудов конференции «Высокие технологии и инновации в науке». Санкт-Петербург, 2019. С. 124-133.
5. Колемаев В.А., Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. М.: ИНФРА-М, 1997. 302 с.
6. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Mathematical model of the receiving path of digital communication lines // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2021, №5. С. 52-57.
7. He J., Zhang T., Zhang Z., Yu T., Zhang Y. Efficient Dynamic Correspondence Network // IEEE Transactions on Image Processing, vol. 33, 2024, pp. 228-240.
8. Zang Y., Fiondella L. A Network Reliability Analysis Method for Complex Systems based on Complex Network Theory // Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Tucson, AZ, USA, 2022, pp. 1-6.
9. Liu X., Liu C. An Empirical Analysis of Applied Statistics and Probability Statistics based on Computer Software // 2020 International Conference on Big Data and Social Sciences (ICBDSS), Xi'an, China, 2020, pp. 69-71.
10. Štěpánek L., Habarta F., Malá I., Marek L. Let's Estimate all Parameters as Probabilities: Precise Estimation Using Chebyshev's Inequality, Bernoulli Distribution, and Monte Carlo Simulations // 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS), Warsaw, Poland, 2023, pp. 1223-1227.
11. Liu D.-x. Reliability Analysis and Optimization of Computer Communication Network Based on Machine Learning Algorithm // International Conference on Frontiers of Artificial Intelligence and Machine Learning (FAIML), Hangzhou, China, 2022, pp. 42-46.
12. Wen Q., Machida F. Bayesian Network Reliability Modeling for Three-version Machine Learning Systems // 53rd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks - Supplemental Volume (DSN-S), Porto, Portugal, 2023, pp. 214-216.
13. Шерстнева А.А. Прогнозирование тренда данных телетрафика. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2021660813, 1.07.2021.
14. Шерстнева А.А. Оценка параметров инфокоммуникационной системы. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2021660651, 29.06.2021.
15. Sherstneva A., Sherstneva O. Communication Network Analysis Based on Reliability Parameters // International Ural Conference on Electrical Power Engineering, Magnitogorsk, Russian Federation, 2021, pp. 189-193.
16. Шерстнева А.А., Шерстнева О.Г. Преобразование параметров надежности с использованием параметрического метода // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. № 6. С. 25-30.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FUNCTIONING OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR COMMUNICATION EQUIPMENT AND NETWORKS

ALINA A. SHERSTNEVA

SPbSUT, St. Petersburg, Russia, shers7neva@gmail.com

OLGA G. SHERSTNEVA

SibSUTIS, Novosibirsk, Russia, o.g.sherstneva@ya.ru

KEYWORDS: *infocommunication systems, diagnostics, availability factor, mathematical model, diagnostic error, reliability, reliability indicators.*

ABSTRACT

Introduction. When monitoring the functioning of both infocommunication networks as whole and individual network elements the diagnostic system records all stochastic events related to their performance. The negative consequences of these events are failures, complete or partial, malfunctions, software failures, errors caused by both external factors and internal system processes. To integrate the reliability parameters of the network a complex indicator is used – the availability factor. It includes single indicators that characterize only one property of the reliability of network functioning. **Methods:** For calculating a complex indicator, it is necessary to take into account the fact that the diagnostic system as an independent system is also subject to both external and internal influences. This means parameters assessing

the reliability of its operation and the likelihood of erroneously made decisions to restore conditionally inoperative network elements should be included as single indicators in a comprehensive assessment of the network's readiness to provide communication services. Erroneously made decisions by the automatic diagnostic system are corrected in the process of performing restoration work by conducting additional, more in-depth testing methods. **Results:** The article reveals analytical dependencies of the value of complex reliability indicators on the probabilities of errors in the diagnostic system. Mathematical models of the functioning of a network object are presented and analytical expressions are calculated for the case of completely reliable and partially unreliable operation of the diagnostic system. The resulting graphs of the dependence of probabilities and a diagram for assessing the probability of errors in the diagnostic system are shown.

REFERENCES

1. O.G. Sherstneva, A.A. Sherstneva, "Analysis of the communication network taking into account reliability indicators," *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2020, No. 73, pp. 52-58.
2. L. Wasserman, "All of Statistics. New York, Springer," 2004. 433 p.
3. Zain Aalabdain Al Namer, "Systematization of approaches to the development of quality systems indicators and network services reliability," *T-Comm*, 2021. No. 5, pp. 58-61.
4. V.V. Karganov, "Classes and performance indicators of modern telecommunication systems and networks, methods of their tariffs," *Sat.tr. conf "High technologies and innovations in science"*. Saint Petersburg, 2019, pp. 124-133.
5. V.A. Kolemaev, V.N. Kalinina, "Probability theory and mathematical statistics," textbook. Moscow: INFRA-M, 1997, 302 p.
6. V.G. Dovbnya, D.S. Koptev, "Mathematical model of the receiving path of digital communication lines," *T-comm*, 2021. No. 5, pp. 52-57.
7. J. He, T. Zhang, Z. Zhang, T. Yu and Y. Zhang, "Efficient Dynamic Correspondence Network," *IEEE Transactions on Image Processing*, 2024, vol. 33, pp. 228-240.
8. Y. Zang and L. Fiondella, "A Network Reliability Analysis Method for Complex Systems based on Complex Network Theory," *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2022, Tucson, AZ, USA, pp. 1-6.
9. X. Liu and C. Liu, "An Empirical Analysis of Applied Statistics and Probability Statistics based on Computer Software," 2020 International Conference on Big Data and Social Sciences (ICBDSS), 2020, Xi'an, China, pp. 69-71.
10. L. Stepanek, F. Habarta, I. Mala and L. Marek, "Let's Estimate all Parameters as Probabilities: Precise Estimation Using Chebyshev's Inequality, Bernoulli Distribution, and Monte Carlo Simulations," *18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS)*, Warsaw, Poland, 2023. pp. 1223-1227.
11. D. -x. Liu, "Reliability Analysis and Optimization of Computer Communication Network Based on Machine Learning Algorithm," *International Conference on Frontiers of Artificial Intelligence and Machine Learning (FAIML)*, Hangzhou, China, 2022, pp. 42-46.
12. Q. Wen, F. Machida, "Bayesian Network Reliability Modeling for Three-version Machine Learning Systems," *53rd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks - Supplemental Volume (DSN-S)*, Porto, Portugal, 2023, pp. 214-216.
13. A.A. Sherstneva, "Forecasting the trend of telegraphic data," Certificate of registration of the computer program No. 2021660813, 1.07.2021.
14. A.A. Sherstneva, "Evaluation of the parameters of the infocommunication system," Certificate of registration of the computer program No. 2021660651, 06.29.2021.
15. A. Sherstneva, O. Sherstneva, "Communication Network Analysis Based on Reliability Parameters," *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2021, pp. 189-193.
16. A. A. Sherstneva, O. G. Sherstneva, "Conversion of reliability parameters using the parametric method," *T-Comm*, Moscow, 2022, No. 6, pp. 25-30.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Alina A. Sherstneva, Candidate of Tech. Sciences, Associated professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Department of Infocommunication Systems, Saint Petersburg, Russia

Olga G. Sherstneva, Candidate of Tech. Sciences, Associated professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Department of Electrical Communication, Novosibirsk, Russia

For citation: *Sherstneva A.A., Sherstneva O.G. Methodology for assessing the functioning of a diagnostic system for communication equipment and networks. H&ES Reserch. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 20-26. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-20-26 (In Rus)*



doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-27-34

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАЩИЩЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

ЖУК**Александр Павлович¹****СТОГНИЙ****Кирилл Витальевич²****АННОТАЦИЯ**

Актуальность: повышение требований к качеству фото и видео информации, а также увеличение сфер, в которых такая информация начинает использоваться повсеместно накладывает ограничение на методы, используемые для защищенной передачи такой информации по каналам связи. Поскольку актуальность фото и видео информации при определенных обстоятельствах быстро снижается, то по этой причине отсутствует необходимость в использовании сложных криптографических методов с большой длиной ключа. В связи с этим на практике используются альтернативные методы защиты информации, основой которых являются матричные преобразования.

Введение: маскирование информации, как метод её защиты связан с решением различных задач, а именно генерацией маскированных структур, их передачей между пользователями, хранение, а также использование для последующего восстановления исходного вида информации. Проанализированы и исследованы известные методы защиты информации на основе её маскирования (трансформации) по показателям степени защищённости и вычислительной сложности. **Цель:** целью исследования является анализ существующих методов трансформации изображений для защищённой передачи в информационных системах, а также сравнение их характеристик. **Результат:** описаны основные особенности существующих методов маскирования изображений с использованием матричных преобразований, указаны основные достоинства и недостатки рассмотренных методов трансформации изображений. Известные методы оценены по параметрам вычислительной сложности и степени защищённости. Обоснована необходимость дальнейшего исследования в данной области с целью ее развития и устранения выявленных недостатков.

Практическая значимость: показано, что рассматриваемые методы могут быть использованы в системах с ограниченными вычислительными возможностями. Предсказано, что возможным вариантом усовершенствования стрип-метода является встраивание в него алгоритма генерации и стохастической смены ортогональных матриц.

Сведения об авторах:

¹ к.т.н, профессор, профессор ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", г. Ставрополь, Россия

² аспирант ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", г. Ставрополь, Россия, kirill.stogniy@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансформация изображений, защита информации, конечные поля, кватернионы, матричные преобразование, ортогональные матрицы

Для цитирования: Жук А.П., Стогний К.В. Исследование методов трансформации изображений для защищённой передачи в информационных системах // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 27-34. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-27-34

Введение

С учетом развития интернет и телекоммуникационных технологий количество фото и видео информации стремительно растет, а также используется в новых различных областях человеческой деятельности, от охранных систем и видеоконференций до развлекательных сетевых сервисов, в каждой из которых требования к такой информации могут быть различны. При этом одной из основных проблем в области передачи информации является защита целостности и конфиденциальности передаваемых данных.

Особое развитие наблюдается в области беспроводной передачи данных. В них риск несанкционированного доступа к информации особенно актуален, особенно в рамках работы данной сети в условиях открытого IP-канала, где, помимо прочего, существуют ограничения, связанные с вычислительными мощностями сетевого оборудования.

Из этого вывод, заключающийся в том, что использование трудоемких вычислений, связанных с шифрованием информации, особенно в случае высоких требований к качеству данной информации, а также тому факту что актуальность данной информации быстро снижается, является нецелесообразным и излишним, а в некоторых случаях является невозможным.

Поэтому в данной работе рассматриваются и исследуются альтернативные методы защиты информации, основанные на маскировании информации с учетом специфики оборудования, протоколов сети и требований к качеству информации:

- Трансформация изображений при помощи матриц в конечном поле $GF(2)$.
- Трансформация изображений методом кватернионов.
- Трансформация изображений с использованием стрип-метода.

Маскирование информации, как метод её защиты связан с решением различных задач, а именно генерацией маскированных структур, их передачей между пользователями, хранение, а также использование для последующего восстановления исходного вида информации.

Трансформация изображений при помощи матриц в конечном поле $GF(2)$

Вопросы трансформации изображений с использованием матриц в конечных полях были описаны в работе [1]. Было предложено использование необособленных матриц в поле $GF(2)$ (конечное поле или поле Галуа порядка 2) с элементами равными 0 или 1.

Конечное поле представляет собой конечное множество, на котором определены произвольные операции в соответствии с аксиомами поля. Обозначается как $GF(q)$, где q – число элементов поля [2].

Трансформация изображений осуществляется при помощи операции XOR (сложение по модулю 2) и в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$Z = MP,$$

где M – матрица в поле $GF(2)$; P – исходное изображение; Z – замаскированное изображение.

Обратная трансформация осуществляется следующим способом:

$$P = M^{-1}Z,$$

где M^{-1} – матрица, обратная матрице M .

Стоит отметить что умножение матриц в поле $GF(2)$ выполняется согласно стандартным правилам, а деление матриц осуществляется путем умножения одной матрицы на обратную матрицу второй.

Также для матриц в поле $GF(2)$ справедливы следующие утверждения:

1. Результатом операции умножения в поле $GF(2)$ для двух квадратных матриц $M1$ и $M2$ размерности (n, n) имеющих определитель равный 1 будет другая матрица в поле $GF(2)$ определитель которой равен 1.

2. Любая перестановка строк или столбцов матрицы в поле $GF(2)$ не изменит ее определитель. У матрицы, полученной в результате подобного преобразования, ранг циклической группы не изменится.

3. Замена любой строки матрицы на линейную комбинацию сложения по модулю 2 любой другой строки данной матрицы не поменяет определитель матрицы. Ранг циклической группы у матрицы, полученной в результате подобного преобразования, изменится.

При помощи матриц в поле $GF(2)$ можно решить ряд задач, аналогичных тем, которые решаются при помощи модульной арифметики. По аналогии с протоколом Диффи-Хеллмана можно формировать надежные секретные ключи и на их основе передавать секретные сообщения. Это обосновывается следующими факторами:

1. Задача возведения матрицы в степень, даже очень большую, является простой. Сделать это можно за счет алгоритма, схожего с тем, который используется для расчета остатка от числа при его возведении в большую степень;
2. Задача вычисления обратной матрицы M^{-1} является простой. Требуется решить систему уравнений, порядок которой равен n^2 ;
3. Задача вычисления ранга группы состоящей из степеней матрицы сводится к задаче перебора. При этом нет алгоритмов, выполняющих эту задачу за полиномиальное время.

Такой способ защиты сообщений превосходит по скорости выполнения аналогичные методы, основанные на остатке от деления. В случае использование матрицы очень большого ранга, 10^{40} и более, задача вычисления матрицы путем перебора окажется очень сложной. Для большего увеличения степени защиты всего сообщения или отдельных его фрагментов можно выполнить шифрование при помощи двух или даже трех различных матриц. Однако даже использование одной матрицы будет давать высокий уровень защищенности, так как найти матрицу в поле $GF(2)$ порядка M методом перебора потребует $2^{M \cdot M}$ операций.

Для измерения вычислительной сложности трансформации изображения данным методом были использованы матрицы в поле $GF(2)$ порядков кратных 7. На рисунке 1 показан график зависимости времени выполнения трансформации фрагмента изображения от порядка матрицы.



На графике отображены дополнительные асимптотики для наглядности результатов. Как показывает график вычислительная сложность трансформации изображения при помощи матрицы порядка n в поле $GF(2)$ равна $O(n \cdot \log(n))$.

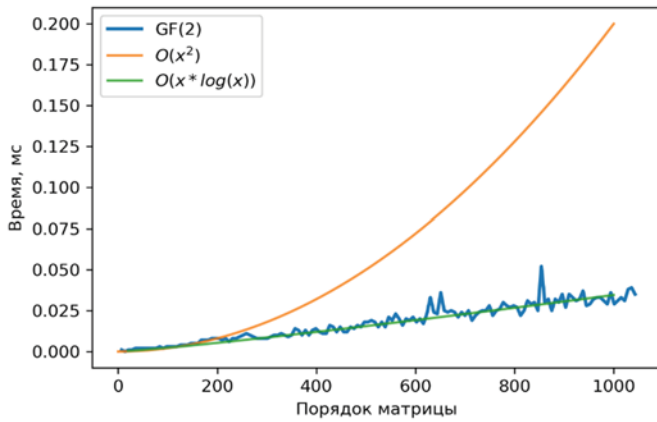


Рис. 1. Зависимость времени трансформации изображения от порядка матрицы

Из достоинств метода можно отметить использование логических, а не арифметических алгоритмов обработки, что значительно ускоряет процесс трансформации, а также относительно низкую вычислительную сложность метода в целом. Помимо этого, программные и аппаратные реализации алгоритма совместимы с корректирующими кодами, что позволяет защитить информацию как от помех в канале связи, так и от несанкционированного доступа. Также использование вычислений в конечных полях позволяет добиться высокой достоверности изображения в процессе обратной трансформации, так как отсутствие ошибок округления гарантирует точность преобразований [3].

Основным недостатком этого метода является высокая сложность нахождения матриц с определителем равным 1 в поле $GF(2)$ с элементами $\{0, 1\}$ [4].

Трансформация изображений методом кватернионов

Известен метод маскирования (трансформации) изображений методом кватернионов. Кватернион – это гиперкомплексное число порядка 4, которое состоит из двух частей – векторной и скалярной. При этом векторная часть может быть представлена как обычный вектор в трехмерном пространстве. Записывается кватернион следующим образом

$$q = w + xi + yj + zk,$$

где w, x, y, z – действительная часть кватерниона; i, j, k – мнимая часть.

Мнимая часть кватерниона должна обладать следующими свойствами [5]

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1,$$

$$ij = -ji = k,$$

$$jk = -kj = i,$$

$$ki = -ik = j.$$

Также существуют другие способы представления кватерниона. Один из них основан на представлении кватерниона в виде транспонированного вектора

$$q = [w, x, y, z]^T.$$

Другой способ основан на представлении кватерниона в виде композиции его частей, скалярной и векторной (w и \vec{v} соответственно)

$$q = (w, \vec{v}) = \left(w, [x, y, z]^T \right).$$

Сумма двух кватернионов равна сумме их соответствующих коэффициентов

$$q_1 + q_2 = (w_1 + w_2) + (x_1 + x_2)i + (y_1 + y_2)j + (z_1 + z_2)k.$$

Произведение двух кватернионов более сложное, из-за антикоммутативности мнимой части при операции произведения

$$q_1 q_2 = \left(w_1 w_2 - \vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2, w_1 \vec{v}_2 + w_2 \vec{v}_1 + \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \right).$$

В данном случае « \cdot » обозначает скалярное произведение, а « \times » – векторное произведение.

Также отметим и другие свойства кватернионов: сопряжение q^* , норма $\|q\|$ и обратный кватернион q^{-1} от кватерниона q

$$q^* = w - xi - yj - zk,$$

$$\|q\| = \sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2},$$

$$q^{-1} = \frac{q^*}{\|q\|^2}.$$

В случае единичного кватерниона, модуль которого равен 1, существует следующее отношение $q^{-1} = q^*$.

Кватернионы могут быть интерпретированы как обозначение ориентации пространства и вращения объектов в этом пространстве. В таком случае кватернион определяется как

$$q = w + (x, y, z) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right),$$

где v – единичный вектор.

В таком случае произведение qvq^{-1} является вращением вектора v на угол α вокруг оси, заданной вектором v .

Для трансформации изображений при помощи кватернионов в начале необходимо сгенерировать два кватерниона. Один кватернион будет являться ключом $q = [w, x, y, z]^T$, а вторым само изображение или его фрагмент $P = [0, a, b, c]^T$, где $[a, b, c]^T$ является изображением или его фрагментом. Тогда произведением таких кватернионов будет являться вращение кватерниона с данными вокруг кватерниона ключа

$$P_{rot} = qPq^{-1},$$

где P_{rot} – полученный в результате вращения кватернион, являющийся пространственным отображением вектора данных $[a, b, c]^T$.

Операцию умножения кватернионов можно легко распараллелить, что особенно выгодно в связи с ее многократным использованием в процессе трансформации изображений [6].

Метод можно оптимизировать путем преобразования векторного компонента кватерниона P в матричный компонент, содержащий значения пикселей фрагмента изображения, что позволит хранить в нем больше данных, а следовательно, сократить количество операций

$$P = \begin{pmatrix} a \\ 0, \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} \end{pmatrix} \rightarrow B = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Процесс трансформации изображения для метода кватернионов с новым матричным кватернионом B выглядит следующим образом

$$B_{rot} = qBq^{-1}, \quad (2)$$

$$B = q^{-1}B_{rot}q, \quad (3)$$

где B_{rot} – повернутый кватернион B .

Пример процесса трансформации изображения представлен на рисунке 2. Предполагается что целью является маскирование случайного изображения в серых тонах, представленное пикселями со значениями в диапазоне 0-255. На первом этапе пиксели изображения группируются в матрицы B_i , на втором этапе происходит преобразования этих матриц в кватернионы, на третьем этапе выполняется вращение кватернионов по формуле (2) для трансформации фрагмента изображения.

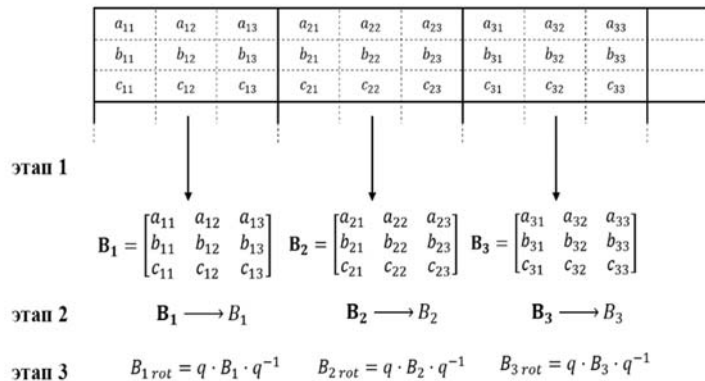


Рис. 2. Трансформация изображение с использованием метода кватернионов

Степень защищенности метода трансформации изображения при помощи кватернионов может быть увеличена при помощи внедрения связей между соседними блоками данных. Для этого необходимо вычислить случайную матрицу IM . Размер этой матрицы должен совпадать с размером матриц B .

Далее выполняется побитовое двоичное сложение (XOR) матриц IM и B_1 в результате чего получается матрица B_{mod} имеющая тот же порядок что и матрица B_1 . Далее выполняется произведение матрицы B_{mod} с кватернионом-ключом согласно формуле (2), результатом которой будет матрица B_{rot} . На следующем шаге происходит тоже самое, но матрица IM заменяется на матрицу B_{rot} , вычисленную на предыдущем шаге.

Однако стоит учитывать, что, в связи с особенностями операции побитового двоичного сложения, матрица B_{mod} будет состоять из чисел типа float (число с плавающей запятой). Согласно стандарту IEEE-754 число с плавающей запятой представлено как бит знака, биты порядка и биты мантиссы. При этом в результате побитового сложения элементов матриц B и B_{rot} невозможно добиться сложения всех соответствующих битов. Это приводит к появлению ошибок при выполнении операций.

В работе [7] отмечено, что диапазон точности числа типа float равен $1.2 \cdot 10^{-38} \dots 3.4 \cdot 30^{38}$. Основная проблема возникает в процессе обратной трансформации изображения по формуле (3). При выполнении вычислений на стороне получателя невозможно добиться в точности тех же значений чисел с плавающей запятой, что были на стороне отправителя. Однако такие ошибки можно минимизировать. Так, в случае использования изображения в серых тонах ошибки не приводят к изменениям заметным для человеческого глаза и составляют максимум ± 3 значения пикселя даже на участках с однородным цветом.

Сложность подбора ключа для третьей стороны зависит от коэффициентов кватерниона-ключа и равна 2^N , где N – длина кватерниона-ключа в битах.

Время выполнения операции для трансформации фрагмента изображения по формуле (2) зависит от порядка матрицы при оптимизации метода по формуле (1). График зависимости порядка матрицы от времени выполнения операции трансформации для метода кватернионов представлен на рисунке 3.

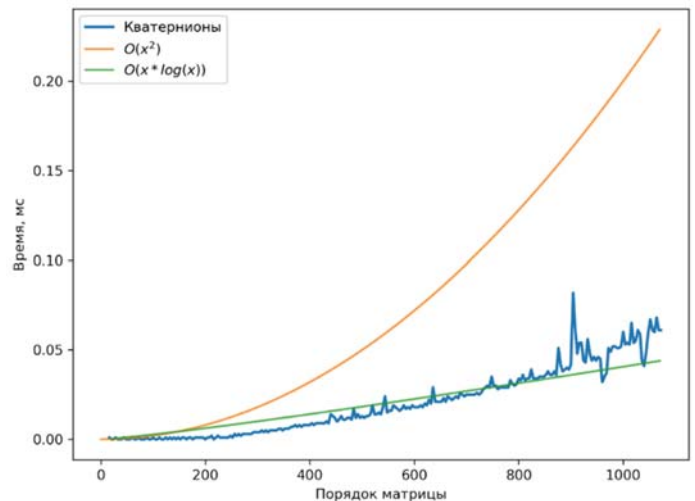


Рис. 3. Зависимость времени трансформации изображения от порядка матрицы для метода кватернионов

Трансформация изображения с использованием стрип-метода

Стрип-метод [8] представляет собой использование матричных преобразований для передачи изображения по каналу, на котором возможны помехи. Идея метода заключается в перемешивании фрагментов изображения за счет чего, во-первых, возможные ошибки при передаче распределяются на все изображение, что приводит к их нивелированию, а, во-вторых, перемешанное изображение сильно отличается от оригинального, что позволяет использовать данный метод в том числе и для защищенной передачи. Важно чтобы выбранная для трансформации изображения матрица была квадратной, а также точно вычислима обратная матрица. Основная проблема состоит в том, что для матриц больших порядков абсолютно точное вычисление обратной матрицы не представляется возможным. Поэтому для данной задачи наиболее подходящими являются ортогональные матрицы.

Матрица называется ортогональной если выполняется условие

$$M_n^T M_n = I_n,$$

где M_n – ортогональная матрица; M_n^T – транспонированная матрица M_n ; I_n – единичная матрица; n – порядок матрицы [9].

Особенность ортогональных матриц заключается в том, что для них нет необходимости в вычисление обратных матриц, поскольку они обладают свойством $A_n^T = A_n^{-1}$, а транспонирование матрицы является простой и быстрой операцией.

Ортогональные матрицы не имеют теоретических ограничений, связанных с их порядком или количеством, однако их вычисление является трудоемким. Установка различных ограничений на параметры таких матриц помогает преодолеть эти трудности. Но, в то же время, такой подход снизит количество классов вычисляемых матриц, а также потребует систематизации алгоритмов их вычисления.

Хорошо изученными и удобными для выполнения операций ортогональными матрицами являются матрицы Адамара. Элементами этих матриц могут быть два числа: 1 и -1, это значит, что матрица имеет 2 уровня. Данные матрицы существуют не на всех порядках. Существует гипотеза, согласно которой матрицы Адамара существуют на порядках $4k$ для всех целых значений k . Данная гипотеза не доказана, но найдено большое количество k , для которых матрица Адамара существует [10].

Самый простой способ вычисления матриц Адамара заключается в использовании произведения Кронекера на двух уже найденных матрицах Адамара. При этом, результатом умножения двух матриц Адамара порядков n и m будет матрица Адамара порядка nm [11].

Для надежной защиты передаваемых изображений целесообразно использовать двухстороннюю модификацию стрип-метода, при котором фрагменты изображений сильно перемешиваются.

Двухстороннее стрип-преобразование имеет следующий вид

$$Z = A_1 P A_2,$$

где A_1, A_2 – ортогональные матрицы Адамара; P – исходное изображение; Z – маскированное изображение.

Помимо использования ортогональных матриц для трансформации изображений существует возможность использования квази-ортогональных матриц. Квази-ортогональные матрицы схожи с ортогональными и получаются в результате нормирования столбцов матрицы. При этом происходит уменьшение максимального по модулю элемента до $m < 1$ для порядков $n > 1$ [12].

Среди квази-ортогональных матриц, которые можно использовать для трансформации изображений можно выделить матрицы Адамара-Мерсенна, или просто матрицы Мерсенна. Их особенность состоит в том, что, по мере увеличения порядка матриц Мерсенна, значения уровней матриц стремятся к значениям уровней у матриц Адамара. Матрицы Мерсенна существуют на соседних с матрицами Адамара порядках, принадлежащих последовательности $4k - 1$ [11]. Уровни матриц Мерсенна равны 1 и $-b$, где $b = 1/2$ при $n = 3$, и для остальных случаев $b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q - 4}$, где $q = n + 1$ – порядок матрицы Адамара. Для матриц Мерсенна выполняется следующее условие

$$M_n^T M_n = \mu I,$$

где

$$\mu = \frac{(n+1) + (n-1)b^2}{2}.$$

Существуют различные алгоритмы вычисления различных ортогональных и квази-ортогональных матриц, которые продолжают активно изучаться и развиваться [13-18], позволяя получать все больше различных вариаций матриц на одном порядке, некоторые из которых обладают полезными алгоритмическими особенностями. Примером таких матриц могут служить симметричные матрицы, то есть такие матрицы, у которых элементы симметричны относительно главной диагонали. Их особенность состоит в том, что как для хранения, так и для умножения с такими матрицами используется меньше вычислительных ресурсов [19].

Среди класса квази-ортогональных матриц, которые можно использоваться для трансформации изображений также существуют матрицы Эйлера и матрицы Ферма, которые существуют на порядках равных $4k - 2$ и $4k + 1$ соответственно. Для вычисления матриц Эйлера может использоваться следующий порядок действий.

В начале используется базовая матрица Мерсенна третьего порядка

$$M_3 = \begin{pmatrix} a & -b & a \\ -b & a & a \\ a & a & -b \end{pmatrix}.$$

Для преобразования матрицы Мерсенна в матрицу Эйлера используется следующая формула

$$E_n = \begin{pmatrix} M_{n/2} & M_{n/2} \\ M_{n/2} & -M_{n/2} \end{pmatrix},$$

где $M_{n/2}$ – матрица Мерсенна, порядка вдвое меньше, чем полученная матрица Эйлера.

Затем можно вычислить новую матрицу Мерсенна используя ранее полученную матрицу Эйлера

$$M_{n+1} = \begin{pmatrix} -\lambda & e^T \\ e & E_n \end{pmatrix},$$

где $\lambda = -a$ – собственное число;

$$e – \text{собственный вектор матрицы } E_{2n}^* = \begin{pmatrix} M_{n/2} & M_{n/2} \\ M_{n/2} & M_{n/2}^* \end{pmatrix}.$$

Матрица $M_{n/2}^*$ является матрицей Мерсенна соответствующего порядка, в которой элементы a и $-b$ взаимно заменены.

Данную последовательность действий можно выполнять дальше, получая новые матрицы Мерсенна и Эйлера. Можно сказать, что в результате подобных вычислений получается цепочка матриц $M_3 \rightarrow E_6 \rightarrow M_7 \rightarrow E_{14} \rightarrow M_{15} \dots$. За счет этого можно значительно расширить базис квази-ортогональных матриц, которые можно использовать для задач трансформации изображений [20].

В итоге мы имеем не сложную вычислительную схему, позволяющую находить и использовать матрицы, схожие с матрицами Адамара, но на других порядках и с вещественным значением одного из уровней, меняющимся при изменении порядка. Это вещественное значение может быть использовано как ключ, и, в таком случае, сложность его перебора будет равна 2^N , где N – длина ключа в битах. Количество вычислений необходимых для подбора самой матрицы порядка n , будет равно $2^n \cdot n! / 2$.

Для измерения вычислительной сложности трансформации изображения данным методом были использованы матрицы Мерсенна порядков кратных 7. На рис. 4 показан график зависимости время выполнения трансформации от порядка матрицы n , который обозначен переменной x . Как показывает график вычислительная сложность трансформации изображения стрип-методом при помощи матрицы порядка n равна приблизительно $O(n^3)$.

Главным достоинством стрип-метода является возможность использования матриц различных видов: матриц Адамара, Эйлера, других ортогональных или квази-ортогональных матриц, порядки которых вместе покрывают значительную часть множества натуральных чисел, особенно кратных традиционным разрешениям изображений. Также возможность использовать матрицы, обладающие иррациональным уровнем, обеспечивает более высокую степень безопасности. Помимо этого, использование матриц Адамара и близких к ним квази-ортогональных матриц позволяет нейтрализовать точечные помехи, возникающие в коммутативных каналах при передаче фото и видео информации.

Из недостатков стрип-метода отметим его высокую вычислительную сложность, из чего следует, что необходима большая вычислительная мощность для его реализации, а

также оптимизированные решения для использования данного метода применительно к изображениям больших размеров в системах реального времени. Одним из возможных способов оптимизации вычислений стрип-методом является использование лишь симметричных матриц.

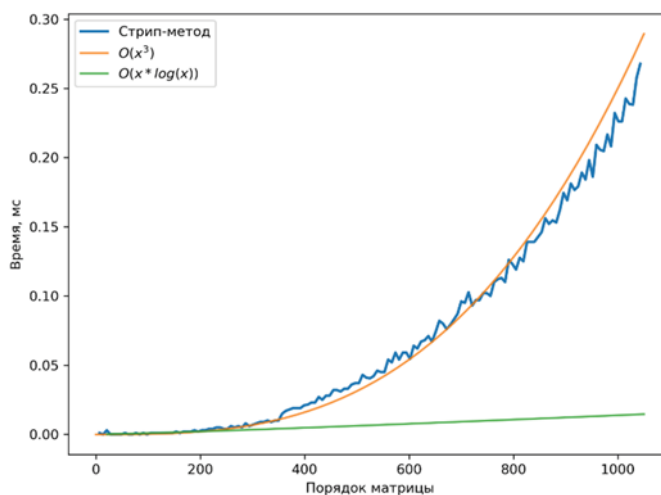


Рис. 4. Зависимость времени трансформации изображения от порядка матрицы стрип-методом

Поскольку достоинством стрип-метода является возможность использования матриц различных видов, увеличение количества которых обеспечивает повышение защищённости данного метода трансформации изображений. Поэтому возможным вариантом его усовершенствования является встраивание в данный метод алгоритма генерации и стохастической смены ортогональных матриц.

Заключение

В работе проанализированы основные современные методы трансформации изображений для защищённой передачи в информационных системах. Исследованы основные особенности каждого метода и оценены их показатели: степень защищённости и вычислительная сложность. Установлено, что самым надежным и гибким методом является стрип-метод, а самым лучшим с точки зрения вычислительной сложности является метод матриц в поле $GF(2)$. Показано, что возможным вариантом усовершенствования стрип-метода является встраивание в данный метод алгоритма генерации и стохастической смены ортогональных матриц.

Литература

1. Ерош И.Л., Сергеев М.Б., Филатов Г.П. О защите цифровых изображений при передаче по каналам связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 20-22.
2. Молдовян А.А., Молдовян Д.Н., Молдовян Н.А. Новый подход к разработке алгоритмов многомерной криптографии // Вопросы кибербезопасности. 2023. № 2(54). С. 52-64. DOI:10.21681/2311-3456-2023-2-52-64.
3. Мухин В.Б. Защита изображений на основе преобразования Мёбиуса на конечных гауссовых полях // Сборник научных работ XI



Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», (п. Нижний Архыз, 27 сентября – 01 октября 2022 г.). Ростов-на-Дону, 2022. С. 166-171. DOI:10.18522/syssyn-2022-32.

4. *Eroch I.L., Sergeev M.B.* Fast encryption of various types of messages // *Mechanical Engineering*. 2007. Vol. 51. No. 1, pp. 1-10. DOI:10.3311/pp.me.2007-1.04.

5. *Huang Ch., Li Zh., Liu Yu* Quaternion-based weighted nuclear norm minimization for color image restoration // *Pattern Recognition*. 2022. Vol. 128. Article id. 108665. DOI:10.1016/j.patcog.2022.108665.

6. *Трещев И.А.* О подходе к построению параллельного алгоритма вычисления произведения в алгебре кватернионов // *Тенденции развития науки и образования*. 2023. № 97. Часть 12. С. 137-141. DOI:10.18411/trnio-05-2023-681

7. *Kahan W.* IEEE Standard 754 for Binary Floating-Point Arithmetic. 1997. Pp. 1–30. DOI:10.1109/IEEESTD.2019.8766229.

8. *Мироновский Л.А., Слаев В.А.* Стрип-метод преобразования изображений и сигналов. Монография. СПб: Политехника. 2006. 163 с.

9. *Сергеев А.М., Гордеев М.В.* О научном и практическом интересе к ортогональным матрицам и преобразованиям с ними // *Сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции «EUROPEAN RESEARCH»* (Пенза, 07 ноября 2020 г.). Пенза, 2020. С. 44-49.

10. *Сергеев А.М.* Обоснование перехода гипотезы Адамара в теорему // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2021. Т. 64. № 2. С. 90-96.

11. *Востриков А.А.* Матричные витражи и регулярные матрицы Адамара // *Информационно-управляющие системы*. 2021. № 5(114). С. 2–9. DOI:10.31799/1684-8853-2021-5-2-9.

12. *Большакова Ю.А., Боярская О.С.* Сравнительный анализ матричных методов защиты изображений // *Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика»* (Уфа, 14 января 2020 г.). Уфа, 2020 С. 24-35.

13. *Сергеев А.М.* Анализ реализаций метода Скарпи при вычислении матриц Адамара высоких порядков симметричных структур // *Сборник научных статей по материалам Всероссийской научной*

конференции «Наука, технологии, общество - НТО-2021» (Красноярск, 29–31 июля 2021 г.). Красноярск, 2021. С. 104-110. DOI:10.47813/dnit-nto.2021.104-110.

14. *Сергеев М.Б., Балонин Ю.Н., Фролов Д.В.* Получение матриц Мерсенна с помощью сложных полей Галуа // *Сборник докладов Третьей Международной научной конференции «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах 23»* (Санкт-Петербург, 10–17 апреля 2023 г.). Санкт-Петербург, 2023. С. 213-216. DOI:10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-213-216.

15. *Балонин Н.А., Себерри Д., Сергеев М.Б.* Задачи разрешимые и неразрешимые. Алгоритм Прокруста получения матриц семейства Адамара 2 // *Информационно-управляющие системы*. 2023. № 1(122). С. 2-16. DOI:10.31799/1684-8853-2023-1-2-16.

16. *Балонин Ю.Н.* Поиск симметричных ортогональных матриц Адамара с тремя блоками (Пропусков) до 188 порядка включительно // *Международная научная конференция: сборник докладов «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах 21»* (Санкт-Петербург, 14-22 апреля 2021 г.). Санкт-Петербург, 2021. С. 92–96. DOI:10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-92-96.

17. *Балонин Н.А., Сергеев А.М.* Матрицы Адамара как результат произведения Скарпи без циклического смещения блоков // *Информационно-управляющие системы*. 2022. № 3(118). С. 2-8. DOI:10.31799/1684-8853-2022-3-2-8.

18. *Балонин Ю.Н., Востриков А.А., Куртяник Д.В., Сергеев А.М.* Обогащение набора последовательностей в задаче поиска блоков симметричных матриц Адамара // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 1(97). С. 187-199.

19. *Сергеев А. М.* Простые числа и симметрии квазиортогональных циклических матриц Мерсенна // *Тезисы докладов I Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве»* (Санкт-Петербург, 10-11 ноября 2021 г.). Санкт-Петербург, 2021. С. 14-15.

20. *Balonin N.A., Sergeev M.B.* Quasi-Orthogonal Local Maximum Determinant Matrices // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 6, pp. 285-293. DOI:10.12988/ams.2015.4111000.

RESEARCH OF IMAGE TRANSFORMATION METHODS FOR SECURE TRANSFER IN INFORMATION SYSTEMS

ALEXANDER. P. ZHUK,
Stavropol, Russia

KIRILL.V. STOGNIY,
Stavropol, Russia, kirill.stogniy@mail.ru

ABSTRACT

Relevance: increasing requirements to the quality of photo and video information, as well as the increase in the areas in which such information begins to be used everywhere imposes a limitation on the methods used for the secure transmission of such information over communication channels. Since the relevance of photo and video information is rapidly decreasing under certain circumstances, for this reason there is no need to use complex cryptographic methods with large key lengths.

KEYWORDS: *image transformation, information security, finite fields, quaternions, matrix transformation, orthogonal matrices.*

Therefore, alternative methods of information protection are used in practice, which are based on matrix transformations. Introduction: masking of information as a method of its protection is associated with the solution of various problems, namely the generation of masked structures, their transfer between users, storage, and use for subsequent recovery of the original type of information. The known methods of information protection based on its masking (transformation) are analysed and investigated in terms of the degree of protection and computational

complexity. **Purpose:** the study aims to analyse existing methods of image transformation for secure transmission in information systems, as well as to compare their characteristics. **Results:** the main features of the existing methods of image masking using matrix transformations are described, the main advantages and disadvantages of the considered methods of image transformation are indicated. The considered methods are evaluated according to the parameters of computational com-

plexity and security degree. The necessity of further research in this area is substantiated in order to develop it and eliminate the identified drawbacks. **Practical relevance:** It is shown that the considered methods can be used in systems with limited computational capabilities. It is predicted that a possible improvement to the strip method is the incorporation of the algorithm of generation and stochastic change of orthogonal matrices into it.

REFERENCES

1. I.L. Eroch, M.B. Sergeev, G.P. Filatov, "Protection of images during transfer via communication channels," *Information and control systems*. 2014. No. 5, pp. 20-22. (In Rus)
2. A.A. Moldovyan, D.N. Moldovyan, N.A. Moldovyan, "A new approach to the development of multidimensional cryptography algorithms," *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2023. No. 2(54), pp. 52-64. DOI:10.21681/2311-3456-2023-2-52-64. (In Rus)
3. V.B. Mnuhin, "Zashhita izobrazhenij na osnove preobrazovaniya Mjobiуса na konechnyh gaussovyh poljah," *Collection of scientific papers of the XI All-Russian Scientific Conference "System Synthesis and Applied Synergetics"*, n. Nizhny Arkhыз, on September 27 - October 01, Rostov-on-Don, 2022, pp. 166-171. DOI:10.18522/syssyn-2022-32. (In Rus)
4. I.L. Eroch, M.B. Sergeev, "Fast encryption of various types of messages," *Mechanical Engineering*. 2007. Vol. 51. No. 1, pp. 1-10. DOI:10.3311/pp.me.2007-1.04.
5. Ch. Huang, Zh. Li, Yu Liu, "Quaternion-based weighted nuclear norm minimization for color image restoration," *Pattern Recognition*. 2022. Vol. 128. Article id. 108665. DOI:10.1016/j.patcog.2022.108665.
6. I.A. Treshchev, "On the approach to construction of a parallel algorithm for calculating the product in the algebra of quaternions," *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2023. No. 97. Part. 12, pp. 137-141. DOI:10.18411/trnio-05-2023-681. (In Rus)
7. W. Kahan, "IEEE Standard 754 for Binary Floating-Point Arithmetic," 1997, pp. 1-30. DOI:10.1109/IEEESTD.2019.8766229.
8. Mironovskij L.A. Strip-metod preobrazovaniya izobrazhenij i signalov [Strip method of image and signal conversion]. Monografija. SPb: Politehnika [Monograph. St. Petersburg: Polytechnic]. 2006. 163 p. (In Rus)
9. Sergeev A.M., Gordeev M.V. O nauchnom i prakticheskom interese k ortogonal'nym matritsam i preobrazovaniyam s nimi [About scientific and practical interest in orthogonal matrices and to transformations with them]. Sbornik statey XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "EUROPEAN RESEARCH" [Collection of Articles of the XXIX International Scientific and Practical Conference "EUROPEAN RESEARCH", Penza, on November 07, 2020]. Penza, 2020. Pp. 44-49. (In Rus)
10. Sergeev A.M. Justification of the transition of the Hadamard hypothesis to the theorem. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]. 2021. vol. 64. No 2. Pp. 90-96. (In Rus)
11. Vostrikov A.A. Matrix vitrages and regular Hadamard matrices. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and control

- systems]. 2021. No. 5(114). Pp. 2-9. DOI:10.31799/1684-8853-2021-5-2-9. (In Rus)
12. Yu.A. Bol'shakova, O.S. Boyarskaya, "Comparative analysis of matrix methods for image protection," *Collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference "Actual problems of science and technology"*, Ufa, on January 14, 2020. Ufa, 2020 Pp. 24-35. (In Rus)
13. A.M. Sergeev, "Analysis of implementations of the Scarpi method for calculating high orders Hadamard matrices of symmetric structures," *Collection of scientific articles on the materials of the All-Russian scientific conference "Science, technology, society"*, Krasnoyarsk, on July 29-31, 2021. Krasnoyarsk, 2021, pp. 104-110. DOI:10.47813/dnit-nto.2021.104-110. (In Rus)
14. M.B. Sergeev, Yu.N. Balonin, D.V. Frolov, "Obtaining Mersenne matrices using complex Galois Fields," *Collection of papers of the Third International Scientific Conference "Information processing, transmission and protection in computer systems 23"*, Saint Petersburg, on April 10-17, 2023. Saint Petersburg, 2023, pp. 213-216. DOI:10.31799/978-5-8088-1824-8-2023-3-213-216. (In Rus)
15. N.A. Balonin, D. Seberri, M.B. Sergeev, "Solvable and unsolvable problems. Using procrustes analysis algorithm for obtaining a family of Hadamard matrices," *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2023. No. 1(122), pp. 2-16. DOI:10.31799/1684-8853-2023-1-2-16. (In Rus)
16. Yu.N. Balonin, "Search for symmetric orthogonal Hadamard matrices with three blocks (propuses) up to order 188 inclusive," *International scientific conference: collection of papers "Processing, transmission and protection of information in computer systems 21"*, Saint Petersburg, on April 14-22, 2021. Saint Petersburg, 2021, pp. 92-96. DOI:10.31799/978-5-8088-1557-5-2021-92-96. (In Rus)
17. N.A. Balonin, A.M. Sergeev, "Hadamard matrices as a result of Scarpi product without cyclic shifts," *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2022. No. 3(118), pp. 2-8. DOI:10.31799/1684-8853-2022-3-2-8. (In Rus)
18. Ju.N. Balonin, A.A. Vostrikov, D.V. Kurtjanik, A.M. Sergeev, "Enrichment of a sequences set in the problem of blocks of symmetric Hadamard matrices searching," *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2023. No. 1(97), pp. 187-199. (In Rus)
19. A.M. Sergeev, "Prime numbers and symmetries of quasi-orthogonal cyclic Mersenne matrices," *Theses of papers of the I International Forum "Mathematical methods and models in high-tech production"*, Saint Petersburg, on November 10-11, 2021]. Saint Petersburg, 2021, pp. 14-15. (In Rus)
20. N.A. Balonin, M.B. Sergeev, "Quasi-Orthogonal Local Maximum Determinant Matrices," *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. No. 6, pp. 285-293. DOI:10.12988/ams.2015.4111000.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Alexander. P. Zhuk, Phd, full professor, professor in FSAEI HE "North-Caucasus Federal University", Stavropol, Russia

Kirill.V. Stogniy, postgraduate student in FSAEI HE "North-Caucasus Federal University", Stavropol, Russia

For citation: Zhuk A.P., Stogniy K.V. Research of image transformation methods for secure transfer in information systems. H&ES Reserch. 2024. Vol. 16. No 2. P. 27-34. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-27-34 (In Rus)

АНАЛИЗ СКВОЗНОЙ ЗАДЕРЖКИ В ТРАНСПОРТНОМ СЕГМЕНТЕ FRONTHAUL СЕТЕЙ 4G/5G НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ TSN

РОСЛЯКОВ
Александр Владимирович¹

ГЕРАСИМОВ
Вячеслав Васильевич²

АННОТАЦИЯ

Введение: Одной из характерных особенностей построения мобильных сетей 4G/5G является пространственное разделение функциональных блоков. Для связи этих блоков используются соответствующие сегменты транспортной сети xHaul. Одним из них является передний сегмент Fronthaul, который соединяет удаленное радиооборудование с оборудованием их управления. Поток данных стандартных радиointерфейсов CPRI/eCPRI в этом сегменте предъявляют строгие требования к качеству обслуживания и прежде всего к задержкам.

Методы: Для удовлетворения этих требований было предложено использовать в сегменте Fronthaul мостовую сеть Ethernet на базе технологии чувствительных ко времени сетей TSN (Time Sensitive Networking), которая обеспечивает детерминированные задержки, надежную доставку пакетов и высокую точность синхронизации узлов в сети. В стандарте IEEE 802.1CM описан профиль сетей TSN, определяющий функции, опции, конфигурации, значения по умолчанию, протоколы и процедуры мостов, станций и локальных сетей, необходимые для построения транспортного сегмента Fronthaul. В статье представлена методика определения максимальных сквозных задержек трафика стандартных радиointерфейсов CPRI/eCPRI в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G, построенном на базе технологии TSN, в соответствии с требованиями стандарта IEEE 802.1CM. **Результаты:** Выделены две основные компоненты сквозной задержки – задержки в мостах TSN и задержки в каналах xEthernet. Для высокоприоритетных потоков трафика радиointерфейсов CPRI/eCPRI в мостах приведены характерные случаи взаимовлияния потоков, поступающих одновременно на разные входные порты. Приведен пример численного расчета, который позволил определить при заданной граничной сквозной задержке передачи высокоприоритетного трафика допустимую физическую длину сегмента Fronthaul.

Сведения об авторах:

¹ д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, arosl@mail.ru

² аспирант кафедры сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия, slavon131@bk.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *мобильные сети 4G/5G, транспортный сегмент Fronthaul, радиointерфейсы CPRI/eCPRI, чувствительная ко времени сеть TSN, стандарт IEEE 802.1CM, сквозная задержка*

Для цитирования: Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 35-43. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-35-43

Введение

С момента своего изобретения почти 50 лет назад сетевая технология Ethernet постоянно развивалась для удовлетворения все более растущих требований к скорости передачи, от классической 10 Мбит/с в начале 80-х годов до 400 Гбит/с на сегодняшний день с планами на будущее до 800 Гбит/с и 1,6 Тбит/с (рис. 1).

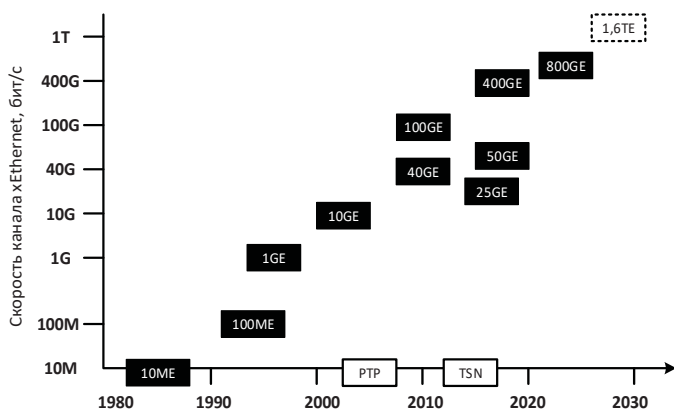


Рис. 1. Хронология изменения скорости технологии Ethernet

Однако изначально технология Ethernet не была рассчитана на обеспечение строгих гарантий синхронизации и времени доставки данных в сети. В этой связи следует отметить появление в 2002 году стандарта IEEE 1588, описывающего протокол точного времени PTP (Precision Time Protocol), который гарантирует высокую степень синхронизации времени в сети Ethernet для точной передачи данных (до 1 микросекунды). Следствием этого явилось создание в 2012 году технологии чувствительных ко времени сетей TSN (Time Sensitive Networking) [1], позволившей использовать сети Ethernet для коммуникаций, мониторинга и управления в реальном масштабе времени со строгими гарантиями синхронизации и качества передачи кадров данных для автономных и других подключенных систем. Первоначально использовавшаяся в аудио/видеосистемах, технологию TSN начали внедрять в сотовые сети 4G/5G и в ближайшие годы она станет ключевым фактором для промышленной автоматизации/Индустрии 4.0, Интернета вещей IoT (Internet of Things), промышленного Интернета вещей IIoT, автомобильных, аэрокосмических и других приложений [2].

Чтобы облегчить широкое внедрение технологии TSN в различных отраслях, рабочая группа IEEE 802.1 разработала ряд профилей, определяющих функции, параметры, протоколы и процедуры построения сетей TSN для конкретного применения, что упрощает их взаимодействие и развертывание. Так уже разработаны профили TSN для сетей аудио-видео-моста AVB (IEEE 802.1BA), переднего сегмента Fronthaul транспортной сети (IEEE 802.1CM-2018) и промышленной автоматизации (IEC/IEEE 60802). Планируется создание профилей TSN для бортовой сети Ethernet в автомобиле (IEEE P802.1DG) и сетей поставщиков услуг (IEEE P802.1DF) [3].

Особенностью работы мостовых сетей TSN является необходимость предварительного планирования совместной

работы мостов сети для гарантированного качества обслуживания трафика. Сущность данного планирования заключается в составлении временного расписания работы шлюзов моста GCL (Gate Control List), в соответствии с которым определяются моменты времени начала и длительности передачи на выходные порты кадров Ethernet, поступивших во входные порты моста.

Основной проблемой при составлении такого расписания является необходимость учета совместной работы мостов на маршруте передачи данных в сети для выполнения ограничений на сквозные задержки. Эти ограничения применительно к транспортному сегменту Fronthaul мобильных сетей 4G/5G, построенному на базе технологии TSN, приведены в стандарте IEEE 802.1CM [4]. Однако имеющиеся публикации зарубежных [5-13] и отечественных [14-16] авторов не содержат методики оценки максимальной сквозной задержки в мостовой сети Fronthaul, что и определяет актуальность ее разработки.

Технология TSN

Чувствительные ко времени сети TSN (Time-Sensitive Networking) – это набор открытых стандартов, разрабатываемых специальной целевой группой, входящей в рабочую группу IEEE 802.1 [3]. Это означает, что стандарты TSN в первую очередь предназначены для сетей Ethernet IEEE 802.3 и поэтому используют все преимущества стандартной технологии Ethernet, такие как гибкость, повсеместное использование и экономичность. Стандарты TSN можно рассматривать как набор дополнительных инструментов технологии Ethernet, которые можно разделить на четыре основные группы (рис. 2) [1]:

- 1) формирование трафика – мостовая сеть TSN регулирует совместную передачу трафика различного типа через мосты с соответствующей гарантией времени;
- 2) управление сетевыми ресурсами – сеть TSN планирует работу конечных устройств пользователей и сетевых узлов (мостов TSN) для передачи трафика с заданным качеством;
- 3) строгая синхронизация работы узлов сети – в сети TSN используется единый источник времени, от которого синхронизируются все сетевые элементы;
- 4) гарантированная надежность доставки данных – сеть TSN обеспечивает передачу нескольких копий одних и тех же кадров Ethernet по непересекающимся путям.

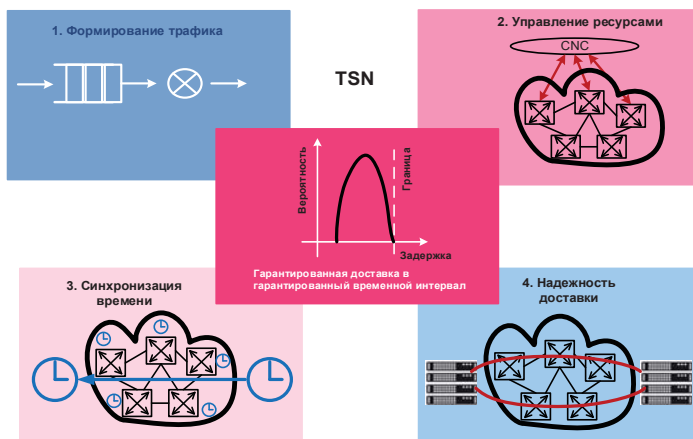


Рис. 2. Базовые механизмы технологии TSN

Используя эти механизмы, сеть TSN гарантирует минимальную задержку для критических данных с помощью различных методов организации очередей и формирования трафика и резервируя сетевые ресурсы для критического трафика. Следует отметить, что сеть TSN может также передавать трафик стандартного Ethernet без гарантий качества обслуживания (Best Effort).

Планирование работы мостов TSN осуществляется на основе стандарта IEEE 802.1Qbv [3] (рис. 3). Каждый выходной порт моста имеет 8 очередей с разными приоритетами обслуживания и поступающие потоки кадров из входных портов Ethernet поступают в свои очереди в соответствии с присвоенными им приоритетами. Каждая очередь имеет логический шлюз (обозначенный через G на рис. 3). Работа этих шлюзов описывается заранее спланированным временным расписанием GCL (Gate Control List) их открытия. Когда в фиксированный интервал времени t_i в соответствующем элементе столбца расписания GCL записано значение 1, это означает, что шлюз соответствующей очереди открыт и поток может быть передан в выходной порт моста. А если значение элемента расписания равно 0, то это означает, что шлюз закрыт в течение данного интервала времени. Расписание управления шлюзами имеет период реализации, поэтому каждый шлюз будет открываться/закрывается циклически в соответствии с этим периодом.

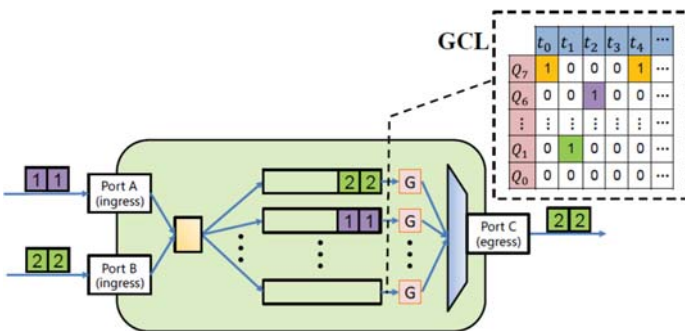


Рис. 3. Принцип работы моста TSN по расписанию GCL

Технология TSN широко используется в конвергентных сетях Ethernet с потоковой передачей аудио/видео информации и потоками данных управления в реальном времени для реализации различных бортовых сетей (аэрокосмических, автомобильных и др.) или сетей управления промышленными объектами [1]. В семействе стандартов TSN имеются также так называемые профили, которые определяют набор инструментов TSN и описывают их использование в конкретной предметной области. Один из таких профилей для использования технологии TSN при реализации переднего транспортного сегмента Fronthaul в мобильных сетях 4G/5G приведен в стандарте IEEE 802.1CM [4].

Сегмент Fronthaul на базе TSN

Одной из характерных особенностей построения мобильных сетей 4G/5G является пространственное разделение традиционной базовой станции на ряд функциональных блоков.

Для связи этих блоков используются соответствующие сегменты транспортной сети xHaul [18-20]. Одним из них является передний сегмент Fronthaul, который соединяет удаленные радиомодули RRU (Remote Radio Unit) с базовым блоком сети мобильной связи BBU (Base Band Unit). В стандарте IEEE 802.1CM [4] функциональные блоки распределенной базовой станции называются радиооборудованием RE (Radio Equipment) и блоком управления радиооборудованием REC (Radio Equipment Control) в сетях 4G или аналогично eCPRI Radio Equipment (eRE) и eCPRI Radio Equipment Control (eREC) – в сетях 5G. Как правило, блок eREC/REC, выполняющий функции обработки основной полосы частот BBU (Base Band Unit), располагается в удобно доступном месте, географически отделенном от блока eRE/RE, содержащим радиоантенну и соединенным с eREC/REC через транспортный сегмент Fronthaul (рис. 4).

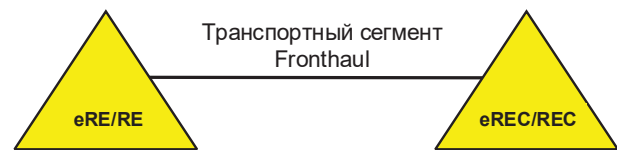


Рис. 4. Функциональные блоки базовой станции и транспортный сегмент Fronthaul в сетях 4G/5G (источник: IEEE 802.1CM)

Сегмент Fronthaul на физическом уровне реализуется в виде соединений «точка-точка» (P2P) с использованием «темного» оптоволокна, систем спектрального уплотнения WDM или радиорелейных линий РРЛ. Для реализации сегмента Fronthaul может быть использована также сеть с мостовым соединением на базе технологии TSN [4, 14], в этом случае eRE/RE и eREC/REC являются конечными станциями, каждая из которых подключена к входному порту граничного моста (рис. 5).

В дополнение к двухточечному соединению мостовая сеть TSN способна при необходимости обеспечивать многоточечное и корневое многоточечное соединения Fronthaul между eRE/RE и eREC/REC. Мостовая сеть Fronthaul может использоваться для передачи и для другого вида трафика (например, трафика промышленного интернета вещей IIoT), если выполняются требования по качеству его обслуживания.

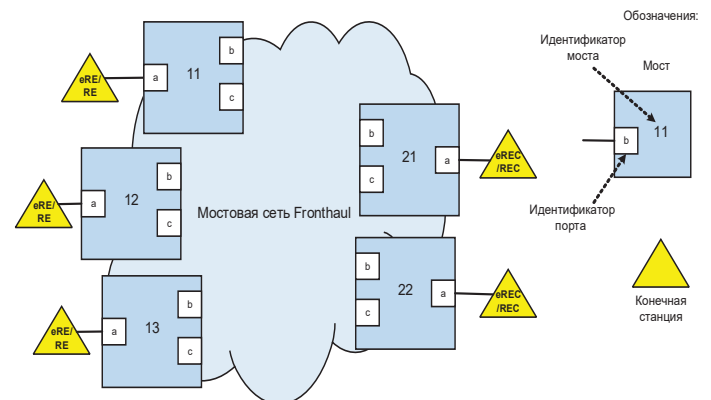


Рис. 5. Мостовая сеть Fronthaul на базе технологии TSN (источник: IEEE 802.1CM)

Сегмент Fronthaul должен обеспечивать минимальные задержки передачи данных, требует жесткой синхронизации частоты и фазы передаваемых сигналов, а также должен обладать большой полосой пропускания. Требования к характеристикам сегмента Fronthaul приведены в стандарте IEEE 802.1CM [4] (табл. 1).

Таблица 1

Требования к характеристикам сегмента Fronthaul

Характеристики Fronthaul	Данные пользователя		Данные контроля и управления C&M		Данные синхронизации	
	CPRI	eCPRI	CPRI	eCPRI	CPRI	eCPRI
Сквозная задержка	100 мкс	100 мкс (высокий приоритет) 1 мс (средний приоритет)	Не определено	1 мс (средний приоритет) 100 мс (низкий приоритет)	-	-
Вероятность потерь кадров	10^{-7}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-7} (средний приоритет) 10^{-6} (низкий приоритет)	-	-
Абсолютная ошибка временной синхронизации	-	-	-	-	От 20 до 30 нс (в зависимости от категории А+, А, В или С и случая 1 или 2)	

(источник: IEEE 802.1CM)

Сквозная задержка трафика в мостовой сети Fronthaul

Маршрут передачи трафика в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN, проходящий через N мостов, два из которых являются граничными, а остальные – транзитными, включает $(N-1)$ канал передачи данных xEthernet между мостами (рис. 6).

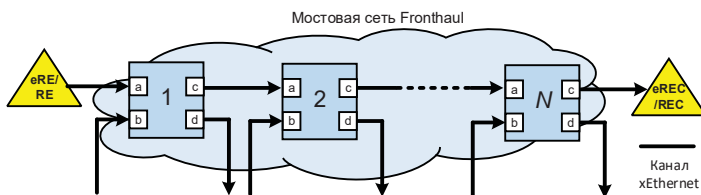


Рис. 6. Маршрут передачи трафика в мостовой сети Fronthaul

Будем считать, что окончательное оборудование RE/eRE и CRE/eCRE сегмента Fronthaul находится в непосредственной близости от граничных мостов TSN 1 и N , поэтому задержка передачи данных на этих участках Fronthaul практически равна нулю и при дальнейших расчетах не учитывается.

Тогда в общем случае максимальную одностороннюю сквозную задержку кадра рассматриваемого k -го потока трафика в сегменте Fronthaul на базе TSN T_{E2E}^k можно определить по формуле:

$$T_{E2E}^k = \sum_{i=1}^N T_{\text{мост}i}^k + \sum_{j=1}^{N-1} T_{\text{канал}j}^k,$$

где $T_{\text{мост}i}^k$ – максимальная задержка кадра k -го потока в i -ом мосту; $T_{\text{канал}j}^k$ – задержка кадра k -го потока в j -ом канале xEthernet; N – общее количество мостов TSN на пути передачи трафика k -го потока в сегменте Fronthaul.

Задержка на одном сетевом переходе от моста к мосту измеряется от момента поступления последнего бита кадра Ethernet k -го потока в порт n исходящего моста А до момента поступления последнего бита этого кадра в порт m входящего моста В. Эта задержка передачи кадра k -го потока в j -ом канале xEthernet между двумя смежными мостами на пути передачи трафика в сегменте Fronthaul зависит от типа среды передачи в канале и физической длины канала:

$$T_{\text{канал}j}^k = D_j / V_{\text{среда}j},$$

где D_j – физическая длина линии связи j -го канала xEthernet в сети Fronthaul к следующему мосту; $V_{\text{среда}j}$ – скорость распространения сигнала в физической среде j -го канала xEthernet.

Если скорость распространения сигнала в радиоканале можно считать равной скорости света 3×10^5 км/с, то в оптоволоконном канале она составляет порядка 69% от скорости света в вакууме. Следовательно, 1 км радиоканала вносит задержку чуть более 3,3 мкс, а оптического волокна – около 5 мкс.

Основная проблема определения задержки кадра в мосту состоит в том, что в выходной порт могут поступать кадры из разных входных портов (рис. 4), и они создают дополнительную задержку обслуживания кадра рассматриваемого потока. Максимальная задержка кадра в мосту зависит от его приоритета относительно кадров других приоритетов. Рассчитаем максимальную задержку моста в наихудшем случае для периодических потоков данных трафика класса CBR с наивысшим приоритетом (в стандарте IEEE 802.1CM [4] такие потоки называются «золотыми»), например, информацию вызова мобильной связи в OFDM-форме в сегменте Fronthaul.

Максимальная задержка в i -ом мосту $T_{\text{мост}i}^{\text{max}}$ для кадров k -го потока с наивысшим приоритетом определяется формулой:

$$T_{\text{мост}i}^k = T_{\text{внутри}i} + T_{\text{очередь}i}^k + T_{\text{кадр}i}^{\text{max}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{внутри}i}$ – внутренняя задержка пересылки данных с промежуточным хранением в i -ом мосту; $T_{\text{очередь}i}^k$ – задержка кадра k -го потока в очереди i -го моста; $T_{\text{кадр}i}^{\text{max}}$ – время передачи кадра Ethernet k -го потока с наивысшим приоритетом максимального размера. Эту задержку можно определить по формуле:

$$T_{\text{кадр}i}^{\text{max}} = L_{\text{кадр}i}^{\text{max}} / V_{\text{xEthernet}j},$$

где $L_{\text{кадр}i}^{\text{max}}$ – максимальный размер кадра k -го потока с учетом преамбулы Pre (Preamble), разделителя начала кадра SFD (Start Frame Delimiter) и межкадрового интервала IPG (Inter



Packet Gap); $V_{xEthernet_j}$ – со скорость передачи j -го выходного порта xEthernet моста.

Во внутреннюю задержку пересылки данных в i -ом мосту с промежуточным хранением информации $T_{внутри_i}$ входят все элементы задержки, являющиеся следствием внутренней обработки кадра в мосту, такие как:

- время, необходимое для прохождения кадра от входного порта моста к выходному порту, при условии, что выходные очереди пусты;

- разница между моментом времени, когда кадр стал доступным для передачи в порту, и моментом времени, когда порт готов передать этот кадр; например, в случае, когда уровень MAC/PHY моста перешел в режим энергосбережения, может возникнуть задержка при переключении порта обратно в нормальный режим работы;

- разница, если таковая имеется, в задержке, возникающей у кадра, который поступает в пустую очередь, по сравнению с задержкой, возникающей у кадра, который должен быть поставлен в очередь;

- время, добавляемое (вычитаемое) при удлинении (сокращении) кадра из-за добавления (удаления) заголовков кадров, таких как Q-метки или MACSec-метки;

- время, необходимое для шифрования кадра MACSec.

Задержка кадра в очереди моста TSN происходит из-за взаимного влияния различных кадров Ethernet между собой как одного приоритета, так и разных приоритетов. Эта задержка для кадра k -го потока трафика в i -м мосту может быть разделена на две составляющих:

$$T_{очередь_i}^k = T_{общ_i}^k + T_{собст_i}^k,$$

где $T_{общ_i}^k$ – задержка кадра k -го потока в общей очереди i -го моста; $T_{собст_i}^k$ – задержка кадра k -го потока в собственной очереди входящего потока в i -м мосту.

Задержка кадра в общей очереди $T_{общ_i}^k$ вызвана тем, что кадр k -го потока был выбран для передачи до того, как он стал доступен для передачи, плюс задержка, вызванная поставленными в очередь кадрами из всех потоков трафика Fronthaul с более высоким приоритетом, чем k .

Наихудшей задержкой в общей очереди для потока с более высоким приоритетом является время передачи кадра Ethernet максимального размера с более низким приоритетом по сравнению с рассматриваемым k -м:

$$T_{общ_i}^k = T_{кадр_{max}}^{низкий}.$$

Если рассматриваемый k -ый поток имеет наивысший приоритет, то отсутствует задержка в общей очереди, т.к. нет трафика с более высоким приоритетом. Если оператор мобильной сети устанавливает другому трафику, например, трафику обслуживанию сети, тот же или более высокий приоритет, чем потокам трафика CPRI/eCPRI, тогда данный трафик способствует наихудшему варианту ожидания в собственной очереди потока или задержке в общей очереди выходного порта моста, которую необходимо учитывать при расчетах.

Задержка кадра в собственной очереди $T_{собст_i}^k$ вызвана другими кадрами трафика того же приоритета, что и рассмат-

риваемый кадр. Примеры данной задержки показаны на рисунках 7 и 8. Кадры 2, 5 и 8 принимаются на порт a , кадры 3 и 6 принимаются на порт b , а кадры 1, 4, 7 и 9 принимаются на порт c мостов 11 и 12.

Все кадры передаются в мостах через выходной порт d . Каждый поток трафика Fronthaul представляет собой периодический поток с постоянной скоростью передачи данных CBR с одним и тем же временным окном. Все поступающие кадры, показанные на каждом рисунке, находятся в одном и том же временном окне. Кадры i и g принадлежат одному потоку, т.е. данный поток включает в себя два кадра в одном временном окне. Все остальные потоки включают по одному кадру в рассматриваемом временном окне. Скорость передачи данных каждого порта xEthernet одинакова. Кадры поступают пачками на входные порты и пачки прибывают примерно в одно и то же время. Мосты 11 и 12 принимают кадры в порядке увеличения их номеров.

Порядок передачи зависит от реализации моста и от того, как разрешаются условия конфликтов между кадрами, как описано ниже. Наблюдаем кадр с номером 8. Если бы не было кадров, прибывающих ни на порт b , ни на порт c , то кадр 8 был бы передан без задержки постановки в очередь, т.е. кадры 2 и 5 не вызывают задержки постановки в очередь для кадра 8, поскольку они передается до приема кадра 8.

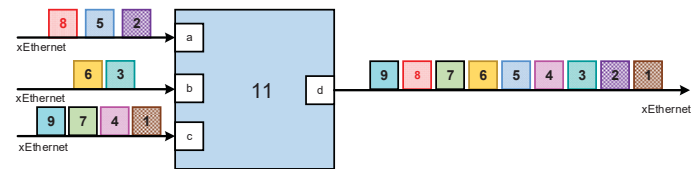


Рис. 7. Пример задержки в собственной очереди при гарантированном порядке обслуживания портов

Обычно реализация моста ориентирована на справедливое распределение полосы пропускания для разных классов трафика, например, мост может гарантировать, что кадры, предназначенные для одного и того же выходного порта, передаются в порядке их приема. Мост 11 обеспечивает такую гарантию, поэтому кадры передаются в порядке поступления, как показано на рисунке 7. В этом случае оба кадра, принятые портом b , т.е. кадры 3 и 6, могут быть переданы перед кадром 8. Кроме того, все кадры до кадра 8, полученные портом c , т.е. кадры 1, 4 и 7, также могут быть переданы до кадра 8. Поэтому в худшем случае пять кадров могут вызвать задержку в собственной очереди для кадра 8.

Порядок передачи кадров, полученных через один и тот же порт моста TSN, определяется стандартом IEEE 802.1Q. Однако он не определяет порядок передачи кадров, полученных на разных портах, это зависит от реализации моста. Без такой гарантии может случиться так, что кадр 9, поступивший после кадра 8, будет передан раньше, как показано на рисунке 8, т.е. шесть кадров из других очередей вызовут задержку кадра 8 в собственной очереди.

Таким образом в самом худшем случае каждый кадр, полученный приблизительно в одно и то же время на разных входных портах, чем наблюдаемый кадр, и предназначенный для того же выходного порта, может вызвать задержку

наблюдаемого кадра в его собственной очереди, что должно учитываться при расчетах задержки кадра в мосту.

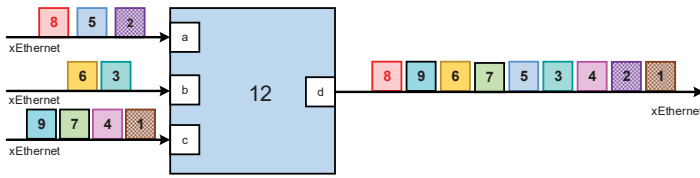


Рис. 8. Пример задержки в собственной очереди при негарантированном порядке обслуживания портов

Часть задержки в собственной очереди потока, назовем ее «верной», происходит в случае, когда кадры, принадлежащие к одному классу трафика и предназначенные для одного и того же выходного порта, поступают на разные входные порты примерно в одно и то же время. Рисунок 9 иллюстрирует ситуацию верной задержки, например, между кадрами 2, 3 и 1. Кадр 3 ставится в очередь и передается первым, затем кадр 2; кадр 1 передается последним из этих трех кадров. Кадры 5, 6 и 4 также находятся в ситуации верной задержки, как и кадры 8 и 7. На рисунке 9 показан пример, когда мост 11 гарантирует, что данный кадр будет передан раньше, чем кадр, полученный позже, тогда как на рисунке 10 приведен пример, когда мост 12 не обеспечивает такой гарантии.

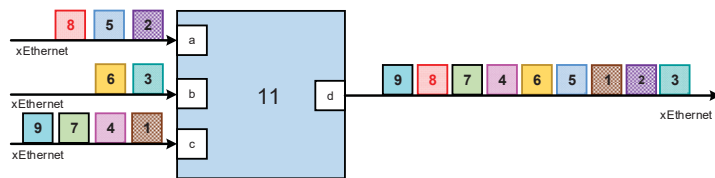


Рис. 9. Пример верной задержки при гарантированном порядке обслуживания портов

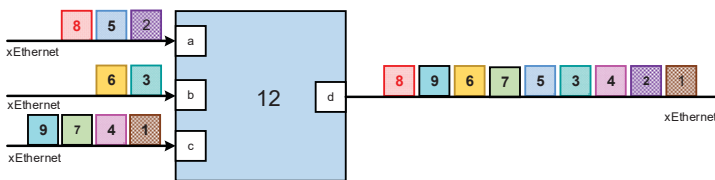


Рис. 10. Пример верной задержки при негарантированном порядке обслуживания портов

Как видно из сравнения рисунков 8 и 10, проще учитывать случаи верной задержки как часть задержки в собственных очередях потоков, чем определять их по отдельности при расчете задержки в мосту для наихудшего случая.

Кадры нескольких потоков наивысшего приоритета, полученные в одном и том же входном порту моста, не вызывают задержку кадров других потоков в собственной очереди, если номинальная скорость передачи данных выходного порта, агрегирующего эти потоки, больше или равна:

а) пропускной способности, необходимой для принятого трафика потоков с наивысшим приоритетом, предназначенных для агрегирующего выходного порта и

б) номинальной скорости передачи данных входного порта, трафик которого агрегируется.

Если высокоприоритетные потоки, обслуживаемые общим выходным портом p , поступают по N_p входным портам, то они вносят задержку в собственной очереди каждого высокоприоритетного потока, т.е. для высокоприоритетных потоков входного порта j необходимо учитывать трафик мешающих высокоприоритетных потоков (N_p-1) -входных портов, передающих трафик на общий выходной порт p . Общее количество агрегированных высокоприоритетных потоков, поддерживаемых различными входными портами (кроме входного порта наблюдаемого потока), и определяет наихудшую задержку в очереди для кадра наблюдаемого потока. То есть сумма $M_{i,p}$ -потоков для (N_p-1) -портов дает количество мешающих потоков в наихудшем случае, которые могут вызвать задержку кадра в собственной очереди потока.

В общем случае данные одного временного окна высокоприоритетного потока k могут переноситься в W_k -кадрах Ethernet, однако часто $W_k=1$. При расчете задержки кадра в собственной очереди в худшем случае необходимо учитывать максимальный размер кадра Ethernet $T_{\text{кадр_max}}^k$. При этом необходимо учитывать, что высокоприоритетные потоки имеют задержку в собственной очереди только из-за других высокоприоритетных потоков, если в соответствующем классе трафика есть только высокоприоритетные потоки.

Таким образом, максимальная задержка кадров потоков с наивысшим приоритетом в собственной очереди, полученных по входному порту j и поступающих на выходной порт p , может быть рассчитана по формуле:

$$T_{\text{собст}}^{i,p} = T_{\text{кадр_max}}^k \times \sum_{i \neq j}^{N_p} \sum_{k=1}^{M_{i,p}} Z_k^{i,p}, \quad (2)$$

где N_p – количество входных портов, которые могут принимать мешающие кадры потоков с наивысшим приоритетом, передаваемых на выходной порт p ;

$M_{i,p}$ – количество потоков с наивысшим приоритетом, передаваемых с входного порта i на выходной порт p ;

$Z_k^{i,p}$ – максимальное количество кадров высокоприоритетного потока k между входным портом i и выходным портом p , которые могут быть сгруппированы вместе в одном временном окне, прежде чем они будут получены входным граничным портом мостовой сети Fronthaul.

Необходимо учитывать, что если в соответствующем классе трафика есть только высокоприоритетные потоки, то они имеют задержку в собственной очереди моста только из-за других высокоприоритетных потоков.

Пример численного расчета

Рассмотрим пример расчета максимальной сквозной задержки в сегменте Fronthaul на базе мостовой сети TSN (рис. 11). Исследуемый сегмент сети содержит 4 моста с номерами 11, 12, 13 и 14. В мосты включаются источники трафика ИТ_{*i*} и получатели трафика ПТ_{*i*}. В мосты 11 и 12 включены только источники трафика, в мост 13 – только получатель трафика, в мост 14 – источники и получатели, а мосты 12 и 13 являются еще и транзитными для соответствующих потоков. Каждый источник ИТ отправляет данные соответствующему получателю ПТ. ИТ₁ имеет только один поток данных с высоким приоритетом для ПТ₁, тогда как все остальные ИТ имеют по

два потока данных с высоким приоритетом. Кроме того, каждый ИТ имеет поток данных с низким приоритетом для своего ПТ.

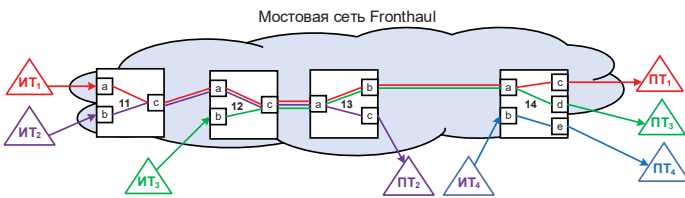


Рис. 11. Пример мостовой сети Fronthaul на базе технологии TSN

Рассмотрим поток между ИТ₁ и ПТ₁, так как он имеет наибольшее расстояние с точки зрения количества сетевых переходов, а, следовательно, в нем будет наибольшая задержка передачи трафика. При максимальной полезной нагрузке данных пользователя 1500 байт максимальный размер кадра xEthernet, который помечен меткой IEEE 802.1Q C-VLAN, составляет 1522 байта для потоков как с высоким, так и с низким приоритетами. Пусть каждый двухточечный канал Ethernet имеет скорость передачи данных 10 Гбит/с. Предположим, что внутренняя обработка данных с промежуточным хранением в мосту $T_{внутри}$ в наихудшем случае составляет 6 мкс для каждого моста. В рассматриваемом примере скорость передачи каждого потока высокоприоритетных данных принята равной 1,5 Гбит/с.

Рассмотрим анализ задержек в мостовой сети Fronthaul на базе технологии TSN для случая профиля А, определенном в стандарте IEEE 802.1CM [4]. Особенностью этого профиля реализации Fronthaul является использование в мостах очередей со строгими приоритетами без каких-либо расширенных функций, например вытеснения кадра. В этом случае задержка данных с высоким приоритетом в мосту в наихудшем случае может быть определена в соответствии с (1).

В выражениях (1) и (2) используется максимальный размер кадра Ethernet высокоприоритетного потока $L_{кадр,max}^k$, который, кроме полезной нагрузки 1500 байт и метки C-VLAN 22 байта, включает преамбулу Pre, разделитель начального кадра SFD и межкадровый интервал IPG, и в сумме равен 1542 байтам. Для канала Ethernet 10 Гбит/с время передачи такого кадра составляет $t_{кадр}^{max} = 1,2336$ мкс.

Максимальная задержка кадра рассматриваемого k -го потока в собственной очереди $T_{собст,i}^k$ варьируется от моста к мосту. Так на основании (2) для моста 11 задержка рассматриваемого высокоприоритетного потока от ИТ₁ равна $T_{собст,11}^{ИТ1} = 2 \times t_{кадр}^{max} = 2,4672$ мкс, поскольку высокоприоритетные данные, предназначенные для выходного порта c , поступают на два входных порта a и b , и в худшем случае оба кадра, полученные в порту b , могут задерживать кадр, полученный в порту a , как показано на рисунке 12.

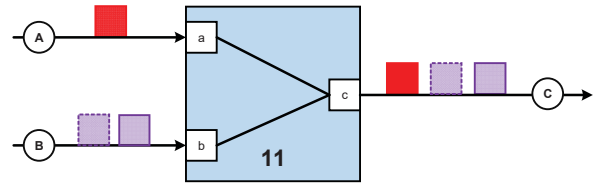


Рис. 12. Задержка высокоприоритетного потока ИТ₁ в собственной очереди в мосту 11

Аналогичная задержка рассматриваемого потока в мосту 12 равна $T_{собст,12}^{ИТ1} = 2 \times t_{кадр}^{max} = 2,4672$ мкс, поскольку оба кадра, полученные в порту d , могут быть переданы портом e раньше, чем кадр, полученный в порту c , как показано на рисунке 13.

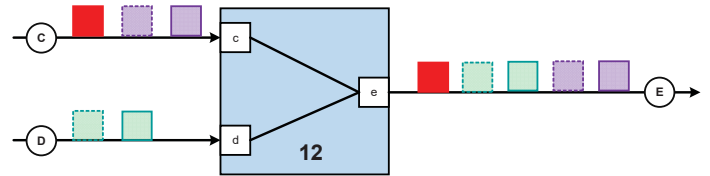


Рис. 13. Задержка высокоприоритетного потока ИТ₁ в собственной очереди в мосту 12

В мосту 13 нет собственных очередей для потоков, потому что он имеет только один входной порт, т.е. $T_{собст,13}^{ИТ1} = 0$.

Только один поток данных с высоким приоритетом предназначен для каждого выходного порта моста 14, следовательно у потоков в этом мосту также нет собственных очередей, т.е. $T_{собст,14}^{ИТ1} = 0$.

Согласно (2), задержка в общей очереди определяется временем передачи кадра трафика с более низким приоритетом максимального размера, который также составляет 1522 байта, таким образом, $T_{общ,i}^k = t_{кадр}^{max} = 1,2336$ мкс. Максимальные задержки в каждом мосту и суммарная сквозная задержка рассматриваемого потока во всех мостах сети для наихудшего случая приведены в таблице 2.

Таблица 2

Задержки в мостовой сети Fronthaul с Профилем А

Номер моста	11	12	13	14	Сквозная
Максимальная задержка, мкс	10,9344	10,9344	8,4672	8,4672	38,8032

Таким образом, если бюджет сквозной задержки в сегменте Fronthaul для данных с наивысшим приоритетом составляет 100 мкс, то суммарная задержка передачи в каналах Ethernet между мостами в рассматриваемом примере будет составлять 61,1968 мкс. В этом случае при использовании оптоволоконных линий связи для реализации сегмента Fronthaul расстояние между мостом 11, подключенным к ИТ₁, и мостом 14, подключенным к ПТ₁, не должно превышать 12 км.

Заключение

Сквозные задержки в сегменте Fronthaul, построенном на базе технологии чувствительных ко времени сетей TSN, при передаче трафика различного вида в сетях 4G/5G регламентируются стандартом IEEE 802.1CM. Для высокоприоритетного трафика радиointерфейсов CPRI/eCPRI они не должны превышать 100 мкс. Обеспечение таких малых задержек зависит от двух основных факторов – от физической длины сегмента Fronthaul и задержек в очередях мостов, которые определяются заранее спланированными временными расписаниями GCL работы выходных портов мостов TSN Ethernet.

Таким образом предложенная методика расчета односторонних сквозных задержек в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN может использоваться на практике как при анализе, так и при синтезе расписания GCL. В случае анализа при заданном расписании работы мостов находятся задержки в них и с учетом граничных сквозных задержек в сегменте Fronthaul определяются допустимые задержки в каналах xEthernet, которые позволяют найти допустимую физическую длину сегмента. При синтезе расписания GCL, когда известна физическая длина сегмента Fronthaul, производится выбор длительности временного окна открытия выходных портов мостов и порядка передачи на них потоков трафика различных приоритетов из входных портов с учетом соблюдения ограничений на сквозные задержки на основе рассчитанных значений задержек в мостах.

В дальнейшем планируется рассмотреть методику определения сквозных задержек передачи трафика Fronthaul с более низким приоритетом, обслуживаемого в мостовой сети TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя CBS (Credit Based Shaping) [1].

Литература

1. Росляков А.В., Сударева М.Е., Мамошина Ю.С., Герасимов В.В. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени // Информационные технологии, 2021. Т. 19. №2. С. 187-201.
2. Росляков А.В. СЕТЬ 2030: архитектура, технологии, услуги. – М.: ООО «ИКЦ «Колос-с», 2022. 278 с.
3. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество, 2021. № 4 (1006). С. 29-33.
4. IEEE Std 802.1CM-2018. IEEE Standard for local and metropolitan area networks. Time-Sensitive Networking for Fronthaul. 2018. 62 p.

5. Pérez G.O., López D.L., Hernández J.A. 5G New Radio Fronthaul Network Design for eCPRI-IEEE 802.1CM and Extreme Latency Percentiles // IEEE Access. 2019. Vol. 7, pp. 82218-82230.

6. Bhattacharjee S., Katsalis K., Arouk O., Schmidt R., Wang T., An X., Bauschert T., Nikaiein N. Network Slicing for TSN-Based Transport Networks // IEEE Access. 2021. Vol. 9, pp. 62788-62809.

7. Chinchilla-Romero L., Prados-Garzon J., Ameigeiras P., Muñoz P., Lopez-Soler J.M. 5G Infrastructure Network Slicing: E2E Mean Delay Model and Effectiveness Assessment to Reduce Downtimes in Industry 4.0 // Sensors. 2022, 22, 229, pp. 1-29.

8. Pérez G.O., Hernández J.A., López D.L. Fronthaul network modeling and dimensioning meeting ultra-low latency requirements for 5G // IEEE/OSA Journal of optical communications and networking, 2018. Vol.10. No.6, pp. 573-581.

9. Gowda A., Hernández J.A., Larrabeiti D., Kazovsky L. Delay analysis of mixed fronthaul and backhaul traffic under strict priority queueing discipline in a 5G packet transport network // Trans Emerging Tel Tech. 2017. N28: e3168, pp. 1-9.

10. Bhattacharjee S., Schmidy R., Katsalis K., Changy C.-Y., Bauschert T., Nikaiein N. Time-Sensitive Networking for 5G Fronthaul Networks // IEEE International Conference on Communications (ICC). 2020, pp. 1-7.

11. Chitimalla D., Kondepu K., Valcarengi L., Tornatore M., Mukherjee B. 5G Fronthaul – Latency and Jitter Studies of CPRI over Ethernet // Journal of Optical Communications and Networking. 2017. Vol. 9. No. 2, pp. 1-10.

12. Atiq M.K., Muzaffar R., Seijo Ó., Val I., Bernhard H.-P. When IEEE 802.11 and 5G Meet Time-Sensitive Networking // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2021. Vol. 3, pp. 14-36.

13. Kumar U., Gupta A. Fundamentals of 5G: Emphasis on fronthaul and TSN protocols. 2021. 114 p.

14. Тупаков В.С., Яковлев Т.А. Особенности построения Anyhaul сетей 5G RAN // Вестник АГТУ, 2020. №1 (69). С. 38-43.

15. Лихтциндер Б.Я. Особенности TSN // Вестник связи, 2021. №7. С. 32–41.

16. Лихтциндер Б.Я. Сети Ethernet с детерминированными задержками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. Том 30, №3. С. 81-97.

17. Берёзкин А.А., Паршин А.А., Парфенов Д.Д., Киричек Р.В. Анализ стандартов сетей, синхронизируемых по времени, для управления роботизированными системами в режиме реального времени // Электросвязь, 2023. №6. С. 20-31.

18. Коган С. Стандартизация решений и сегментирование транспортного уровня сети 5G // Первая миля, 2021. №2. С. 40-47.

19. Богданова Е., Шишков К. Сегменты транспортной сети 5G // Connect, 2020. №5-6. С. 84-87.

20. Коган С. Транспортная оптическая инфраструктура для 5G // Connect, 2020. №5-6. С. 74-80.



ANALYSIS OF END-TO-END DELAY IN FRONTHAUL TRANSPORT SEGMENT OF 4G/5G NETWORKS BASED ON TSN TECHNOLOGY

ALEKSANDER V. ROSLYAKOV

PSUTI, Samara, Russia, arosl@mail.ru

VIYCHESLAV V. GERASIMOV

PSUTI, Samara, Russia, slavon131@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. One of the characteristic features of building 4G/5G mobile networks is the spatial division of a traditional base station into a number of functional blocks. To connect these blocks, the corresponding segments of the xHaul transport network are used. One of these is the Fronthaul, which connects remote radio equipment to their control equipment. Data flows of standard CPRI/eCPRI radio interfaces in this segment impose strict requirements on quality of service and, above all, on delays. **Methods:** To meet these requirements, it was proposed to use a switched Ethernet network in the Fronthaul segment based on TSN (Time Sensitive Networking) technology, which provides deterministic delays, reliable packet delivery and high accuracy of synchronization of nodes in the network. The IEEE 802.1CM standard defines a TSN

KEYWORDS: 4G/5G mobile networks, Fronthaul transport segment, CPRI/eCPRI radio interfaces, time-sensitive networking TSN, standard IEEE 802.1CM, end-to-end delay.

profile that defines the features, options, configurations, defaults, protocols, and procedures of bridges, stations, and LANs necessary to construct a Fronthaul transport segment. **Results:** The article presents a methodology for determining end-to-end traffic delays of standard CPRI/eCPRI radio interfaces in the Fronthaul segment of 4G/5G networks, built on the basis of TSN technology, in accordance with the requirements of the IEEE 802.1CM standard. Two main components of end-to-end delay are identified: delays in TSN bridges and delays in xEthernet links. For high-priority traffic flows of CPRI/eCPRI radio interfaces in bridges, typical cases of mutual influence of flows arriving simultaneously at different input ports are given. An example of a numerical calculation is given, which made it possible to determine the permissible physical length of the Fronthaul segment for a given maximum end-to-end delay.

REFERENCES

1. A.V. Roslyakov, M.E. Sudareva, Yu.S. Mamoshina, V.V. Gerasimov, "TSN – time-sensitive Ethernet networks," *Infocommunication technologies*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 187-201.
2. A.V. Roslyakov, NETWORK 2030: architecture, technology, services, ICC Kolos-s, 2022, 278 p.
3. A.V. Roslyakov, V.V. Gerasimov, Yu.S. Mamoshina, and M.E. Sudareva, "Standardization of time-synchronized TSN networks," *Standards and Quality*, 2021, no. 4 (1006), pp. 29-33.
4. IEEE Std 802.1CM-2018. IEEE Standard for local and metropolitan area networks. Time-Sensitive Networking for Fronthaul, 2018, 62 p.
5. G.O. Perez, D.L. Lopez and J.A., "Hernandez 5G New Radio Fronthaul Network Design for eCPRI-IEEE 802.1CM and Extreme Latency Percentiles," *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82218-82230.
6. S. Bhattacharjee, K. Katsalis, O. Arouk, R. Schmidt, T. Wang et al., "Network Slicing for TSN-Based Transport Networks," *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 62788-62809.
7. L. Chinchilla-Romero, J. Prados-Garzon, P. Ameigeiras, P. Muñoz and J.M. Lopez-Soler, "5G Infrastructure Network Slicing: E2E Mean Delay Model and Effectiveness Assessment to Reduce Downtimes in Industry 4.0," *Sensors*, 2022, 22, 229, pp. 1-29.
8. G.O. Perez, J.A. Hernandez and D.L. Lopez, "Fronthaul network modeling and dimensioning meeting ultra-low latency requirements for 5G," *IEEE/OSA Journal of optical communications and networking*, 2018, vol.10, no.6, pp. 573-581.
9. A. Gowda, J.A. Hernandez, D. Larrabeiti and L. Kazovsky, "Delay analysis of mixed fronthaul and backhaul traffic under strict priority queuing discipline in a 5G packet transport network," *Trans Emerging Tel Tech*, 2017, n 28: e3168, pp. 1-9.
10. S. Bhattacharjee, R. Schmidty, K. Katsalis, C.-Y. Changy, T. Bauschert and N. Nikaeiny, "Time-Sensitive Networking for 5G Fronthaul Networks," *IEEE International Conference on Communications*, 2020, pp. 1-7.
11. D. Chitimalla, K. Kondepu, L. Valcarengi, M. Tornatore and B. Mukherjee, "5G Fronthaul - Latency and Jitter Studies of CPRI over Ethernet," *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 1-10.
12. M.K. Atiq, R. Muzaffar, O. Seijo, I. Val and H.-P. Bernhard, "When IEEE 802.11 and 5G Meet Time-Sensitive Networking," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2021, vol.3, pp. 14-36.
13. U. Kumar and A. Gupta, "Fundamentals of 5G: Emphasis on fronthaul and TSN protocols", 2021, 114 p.
14. V.S. Tipakov and T.A. Yakovlev, "Features of building Anyhaul networks 5G RAN," *Vestnik svyazi*, 2020, no. 1 (69), pp. 38-43.
15. B.Ya. Lichtzinder, "Features of TSN," *Vestnik svyazi*, 2021, no. 7, pp. 32-41.
16. B.Ya. Lichtzinder, "Ethernet networks with deterministic delays," *Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences"*, 2022, v. 30, no. 3, pp. 81-97.
17. A.A. Berezkin, A.A. Parshin, D.D. Parfenov and R.V. Kirichek, "Analysis of time-synchronized network standards for real-time control of robotic systems," *Elektrosvyaz*, 2023, no. 6, pp. 20-31.
18. S. Kogan, "Standardization of solutions and segmentation of the transport layer of the 5G network," *First Mile*, 2021, no. 2, pp. 40-47.
19. E. Bogdanova and K. Shishkov, "Segments of the 5G transport network," *Connect*, 2020, no. 5-6, pp. 84-87.
20. S. Kogan, "Transport optical infrastructure for 5G," *Connect*, 2020, no. 5-6, pp. 74-80.



МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ И АППАРАТНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

ПЕТРОВ
Алексей Юрьевич¹

АННОТАЦИЯ

Введение: разделение программных и аппаратных ресурсов является одним из ключевых вопросов для современных вычислительных сетей. Последние разработки в сфере архитектур авионики, такие как Интегрированная модульная архитектура второго поколения, требует новых методов построения распределенных аппаратных и программных средств. **Цель исследования:** целью исследования является сравнение современных методов разделения программных и аппаратных ресурсов в вычислительных сетях, а также анализ наиболее эффективных механизмов работы этих алгоритмов. **Методы:** проблема разделения ресурсов в сети была смоделирована в виде задачи разбиения графа. Особое внимание было уделено изучению эвристических методов оптимизации, используемых для получения приближенного значения при больших объемах данных. Были изучены и проанализированы генетический алгоритм, метод роя частиц, алгоритм муравьиной колонии, алгоритм нечеткой кластеризации, метод многоуровневого разбиения графов, а также метод имитации отжига. Для наиболее системного подхода к анализу была построена сравнительная таблица методов, отражающая эффективность алгоритмов по некоторым параметрам. **Результаты:** создание гибридных алгоритмов обладает наибольшей перспективностью в сфере вычислительных сетей. Стоит отметить высокий потенциал таких методов как, метод GA-PSO и SA-PSO. **Практическая значимость:** представленная концепция совмещения разных алгоритмов разрабатывается для современных архитектур авионики и комплексов бортового оборудования для поддержки параллельного решения задач и их перемещение на критически важные приложения. **Обсуждение:** применение подобных принципов при создании других гибридных алгоритмов успешно продемонстрировали себя на практике и получили высокую оценку специалистов.

Сведения об авторе:

¹ аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Санкт-Петербург, Россия, PAlexeq1998@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *методы разделения, аппаратные и программные ресурсы, эвристические алгоритмы, разбиение графа, критерии эффективности*

Для цитирования: Петров А.Ю. Методы разделения программных и аппаратных ресурсов для современных вычислительных сетей // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 44-50. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-44-50



Введение

Разделение прикладных задач современных сетей на программные и аппаратные ресурсы является одной из ключевых проблем при оптимизации скорости, задержки, мощности и других характеристик вычислительной сетей.

Эффективное распределение системных ресурсов определяет верное соответствие выполнения задач через программные и аппаратные компоненты. Разделение используемых в сети ресурсов способствует достижению баланса между ограничениями и выполнением требуемых задач.

Так в ведущих странах мира сейчас активно разрабатывается новая архитектура авионики, получившая название «Интегрированная модульная архитектура второго поколения (ИМА-НП)». Она требует новых концепций и методов построения, распределенных аппаратных и программных средств. Программная организация должна поддерживать распределенное параллельное решение задач, перемещение задач для концентрации ресурсов на критических приложениях и поддержки отказоустойчивости на системном уровне [0, 2, 3].

При разработке ИМА-НП и подобной ей архитектур появляется потребность в использовании методов разделения ресурсов. Стоит задача провести анализ существующих подходов к разделению ресурсов и методов, которыми это достигается. Необходимо найти наиболее применимый метод для решения задачи обеспечения распределенных вычислений.

В работе будет сделан акцент на программное разделение ресурсов, так как современные архитектуры авионики, примеров которых является ИМА-НП, строятся в первую очередь на основе определённого программного обеспечения, а уже впоследствии разворачиваются на конкретном аппаратном комплексе с учетом его особенностей. Тем не менее методы, используемые при аппаратном разделении ресурсов, также будут рассмотрены, потому что они могут содержать механизмы, которые можно эффективно применить в программном.

Методы разделения программных и аппаратных ресурсов

Существуют различные методы оптимизации, которые применяются в задачах автоматизации процесса распределения системных ресурсов. Эти методы могут быть классифицированы на точные и эвристические [4]. При выборе метода на текущем этапе основными критериями являются объем данных для обработки, а также достаточная точность получаемых результатов.

Точные методы направлены на получения глобального оптимального решения. Такие точные алгоритмы, как метод ветвей и границ [5] или целочисленное программирование [6], наиболее приспособлены для работы с небольшими графами, состоящими из нескольких десятков узлов.

Эвристические методы используются для получения приближенного решения, поэтому они применяются при работе с большими объемами данных. Эвристические методы можно разделить на два типа - конструктивные и итерационные [7]. Конструктивные алгоритмы, например, алгоритм нечеткой кластеризации, создают сравнительно небольшое множество

решений, доводя его до завершения через добавление компонентов к начальному решению. Итерационные алгоритмы, такие как алгоритм моделируемого отжига, метод роя частиц, алгоритм муравьиной колонии, получают решение как предел последовательности приближений, вычисляемых в ходе процесса итераций [7].

Проблему разделения ресурсов в вычислительной сети можно смоделировать как задачу по разделению графа. Разбиение графов считается одной из важнейших проблем при разработке СБИС и распределении в них нагрузки, что добавляет актуальности проблеме поиска эффективного метода оптимизации ресурсов. Этот процесс представляет собой сокращению графа до меньшего графа через разделения набора узлов на взаимоисключающие группы [8].

Обзор существующих решений

Генетический алгоритм или Genetic Algorithm (GA) — это итерационный алгоритм эволюционной оптимизации, берущий за основу дарвиновской естественной оценке и отборе. Метод GA это сравнительно небыстрый алгоритм, который функционирует через внесение незначительных изменений по ходу решения, пока не будет достигнуто наилучшего результата.

В начале все вершины заданного графа, составляя популяцию, упорядочиваются по возрастанию локальных степеней, составляя популяцию. Составив пары вершин, вычисляем для них оценку связности на основании числа связей между вершинами. По полученным оценкам для создания «нового поколения», отбираем те пары, значение оценки связности которых превышает или равно 0. Если таких пар не было найдено, то возможно два варианта решения задачи – либо происходит выбор пар с наименьшей отрицательной оценкой связности, либо, если создание пар из двух вершин более невозможно, создаются группы из трех [9]. Фактически происходит полный перебор вариантов решений, если количество вершин для анализа относительно малое. Генетические операторы используются для сокращения числа перебираемых пар при увеличении числа вершин.

Основными генетическими операторами являются оператор отбора, оператор кроссинговера, оператор мутации, оператор инверсии. Их суть заключается в обеспечении возможности развития и улучшения получаемых новых популяций, вводя дополнительные параметры в этапы метода. Применение или улучшение генетических операторов помогает создать генетический алгоритм, который лучше подходит для решения задачи с конкретными параметрами.

Высокая скорость данного алгоритма достигается благодаря сосредоточенности только на информации о допустимых значениях параметров целевой функции. Генетический алгоритм избегает попадания к попаданию в локальные экстремумы за счет работы сразу с несколькими точками пространства поиска. Недостатками данного алгоритма являются непостоянная эффективность при получении оптимального решения и высокая требовательность к вычислительным ресурсам [10, 11].

Метод роя частиц или Particle swarm optimization (PSO) – это итерационный алгоритм, который базируется на принци-

пах интеллекта роя, использующего социально-психологические и социально-биологические принципы. Этот метод основан на генерации популяции возможных решений, который называются частицами. Согласно заданной при формировании задачи формуле, они перемещаются в пространстве. Изменения траектории перемещения происходят в зависимости от условий поиска, а также при их приближении к наилучшему положению [12].

В пространстве задачи поиска наилучшей оптимизации каждая частица называется агентом. Она обладает памятью, которая содержит информацию о положении частицы относительно лучшего решения и о ее глобальном положении в пространстве других частиц. По ходу движения частицы для нее вычисляется значение целевой функции, основываясь на котором, частица и совершает движение. Также каждая частица передает информацию о своем положении и о наилучшем для нее решении своим соседям, что и соотносится с понятием роя, движение которого происходит сообща [13].

Метод роя частиц достаточно прост в реализации, а также имеет значительную гибкость при совмещении с другими алгоритмами, что подтверждает его универсальность. Как недостаток стоит выделить зависимость выбираемых коэффициентов и оценки получаемого решения.

Алгоритм муравьиной колонии или Ant Colony Optimization (ACO) – это эвристический алгоритм, основанный на моделировании поведения муравьиной колонии. Муравей, совершая движение по случайному направлению выпускает специальное химическое вещество, называемое феромоном. Другие муравьи в поисках кратчайшего маршрута, основываясь на опыте предыдущих членов колонии, двигаются по этим феромонам. В итоге возникает коллективное поведение, при котором большинство муравьев предпочитают наиболее короткие пути, что способствует созданию еще большего количества феромонов на оптимальных путях, делая их наиболее «привлекательными» для новых муравьев [14].

Эта стратегия легко проецируется на задачу разбиения графа. Определяем число агентов, равняющихся числу вершин графа, и формируем граф поиска решений. Каждое ребро графа обладает начальным значением феромоны. На каждой итерации агент, проходя определенный маршрут, «помечает» его феромоном, чтобы при проходе следующего агента, тот мог воспринимать опыт предыдущего. Со временем на ребрах происходит «испарение» феромона, предотвращая использование одних и тех же маршрутов. Итерации выполняются до получения наилучшего возможного решения [15, 16].

Алгоритм муравьиной колонии основан на популяции, благодаря чему легко реализуется параллельно. Его легко можно комбинировать с другими эвристическими алгоритмами. Вместе с тем метод ACO сложен в реализации требует значительных временных затрат для вычисления решения. При неверно заданных параметрах его скорость дополнительно понижается, а качество получаемого решения ухудшается.

Алгоритм нечеткой кластеризации или Fuzzy C-Means (FCM) представляет собой конструктивный алгоритм оптимизации. FCM – наиболее эффективный метод кластеризации согласно многим исследованиям. Он превосходит другие алгоритмы кластеризации, такие как методы иерархическую

кластеризацию и алгоритм *-mean* и иерархическую кластеризацию.

Основная задача FCM – минимизировать объективную функцию, учитывая сходство между элементами и центрами кластеров. Алгоритм нечеткой кластеризации базируется на нечетком поведении, он позволяет получить естественную технику кластеризацию с весами принадлежности, имеющими естественную интерпретацию [17, 18].

Алгоритм FCM направлен на поиск матрицы прототипов и матрицы степеней принадлежности, которые минимизируют объективную функцию приспособленности. Обновление прототипов происходит с помощью определенной функции, которая минимизирует объективную функцию. Обновление степеней принадлежности происходит согласно функции уровня нечеткости кластера. Хорошее разбиение достигается, когда степень принадлежности сходится к 0 или 1. Однако алгоритм FCM чувствителен к начальным значениям и может попадать в локальный оптимум, что снижает его эффективность [19].

Метод Многоуровневого разбиения графов или Multi Level Graph Partitioning (MLGP) – метод, впервые описанный в работе Лиландом Р. и Хэндриксон Б., которая касалась непосредственно разделению графов. Процесс работы MLGP можно глобально разделить на несколько этапов – огрубление графа, анализ и разбиение на части, снятие грубости и уточнение.

Применяя к начальному графу огрубление, создается новый граф путем уменьшения количества вершин через объединение вершин и сворачивание ребер. При каждом повторном огрублении создаются пары совпадающих вершин и ребер без общих вершин для последующего объединения. В основе огрубления лежит алгоритм паросочетания из тяжелых ребер (Heavy Edge Matching, HEM) [20]. Перебирая в случайном порядке каждую вершину графа, происходит сопоставление идущих от них ребер на предмет максимального веса [21].

После огрубления задача происходит начальное разбиение, огрубленный граф анализируется алгоритмами и впоследствии получает грубое разбиение. В качестве алгоритма можно применять алгоритм первой подгонки. Его суть заключается в упорядочивании машины по убыванию максимальной мощности и вершин по убыванию веса. Далее каждой вершине выдается список машин, при условии, что первой назначается машина с достаточной мощностью, которая уменьшается с весом этой вершины [22].

На заключительном этапе выполняется алгоритм уточнения грубого разбиения, включающий два цикла. Первый внешний смещает вершины для достижения лучшего среза, завершая проход при невозможности улучшения полученного разбиения. Второй внутренний цикл итеративно ищет вершину с наибольшим выигрышем для перемещения. Алгоритм завершается, когда нет возможности найти более подходящее перемещение. После этого цикл начинается сначала до момента соблюдения дополнительных условий или до момента перемещения всех вершины. Значительному сокращению периода выполнения при сохранении качества финального решения способствует оптимальный выбор соответствующих условий.



Достоинством MLGP является потенциальная возможность за оптимальное время работать с крупными частями графа через стягивания ребер в вершины путем локальной оптимизации.

Метод имитации отжига или Simulated Annealing (SA) – итерационный алгоритм оптимизации, был адаптирован из Алгоритма поиска ближайшего соседа. Но в отличие от NNA, выбирающего лучшее решение в окрестности, SA ищет худшее в соответствии с некоторой функцией вероятности. Суть алгоритма SA заключается в выборе решения, связанного с перемещением вершины с некоторой вероятностью, зависящей от параметров – выигрыша при перемещении и температуры [23].

Вершина с положительным выигрышем двигается в часть, не имеющую достаточной емкости с вероятностью, зависящей от количества свободного места. За сходимость алгоритма к правильному решению отвечает температура. Задавая параметры начальной температуры нужно, чтобы доля принятых переходов вверх по склону при начальной температуре была равна параметру начальной вероятностью принятия [24]. Для снижения температуры следует использовать функцию охлаждения до момента достижения остановки алгоритма.

Условием остановки является наступление замороженного состояния, что служит маркером для прекращения поиска дальнейшего решения. Альтернативными условиями остановки может являться достижение некоторого заранее определенного температурного порога или преодоление заданного количества эпох во время цикла [25]. При использовании алгоритма SA стоит иметь в виду случайный характер этого метода, который может получать разные итоговые решения. Благодаря этому повторное выполнение алгоритма может улучшить полученный ранее ответ, но также стоит учитывать потенциальные временные затраты на дополнительные вычисления.

Алгоритм имитации отжига относительно прост в реализации, а также универсален в применении для большого количества комбинаторных задач. Тем не менее, учитывая случайный характер метода, для настройки параметров и достижения оптимального решения могут потребоваться многократные запуски тестов. Параметры от задачи к задаче могут значительно отличаться, благодаря чему тестирование является обязательным этапом при использовании метода SA.

Метод KLSA это гибридный алгоритм, сочетающий преимущества двух более ранее описанных мною методов. Он был выбран для обзора для демонстрации преимущества гибридного подхода к созданию новых алгоритмов, заключающемуся в вычленении наиболее перспективных механизмов изученных ранее алгоритмов и в объединении их в новой разработке, оптимально применяющей полученные механизмы [26].

Метод KLSA объединяет в себе алгоритмы SA и MLKL, интегрируя достоинства SA при самом грубом разбиении. Глобально гибридный метод копирует алгоритм MLKL, но с внедрением одного полезного новшества. В отличие от уточнения на основе KL-подобного алгоритма метод SA благодаря своему случайному фактор анализирует большее про-

странство решений, даже несмотря на увеличенное время вычислений. Использование механизмов SA для поиска лучшего решения только при грубом разбиении нивелирует дополнительные вычислительные и временные затраты, так как в масштабах работы всего алгоритма это ведет к улучшению процесса.

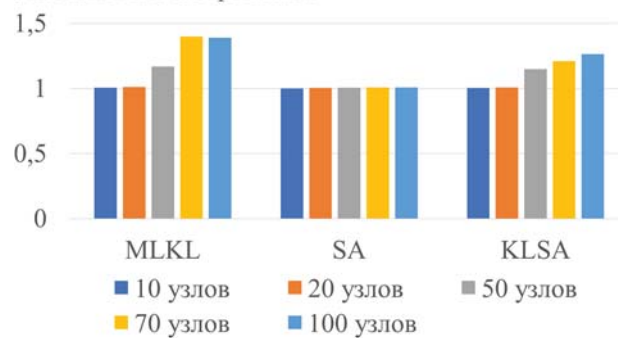
Сравнение алгоритмов

Для сравнения изученных алгоритмов были дополнительно исследованы результаты работ, проведенные Де Турка Ф., Вербергом Т., и Дюета Б при проектировании гибридного метода KLSA [26, 27], а также работа Мхадби И., Отмана С.Б. и Сауда С.Б. посвященная алгоритму FCM-PSO [28].

Исследование по KLSA было проведено для решения проблемы бинарного разбиения с учетом различных графов задач от 100 до 1000 узлов. Каждый алгоритм был выполнен 10 раз, всегда принимались лучшие решения. При сравнении вычисления разреза графа результаты брались относительно оптимального решением целочисленного линейного программирования (Integer Linear Programming, ILP) [29, 30]. Тесты были скомпиллированы в среде Matlab и выполнялись на процессоре Intel Celeron (2,16 ГГц) [26].

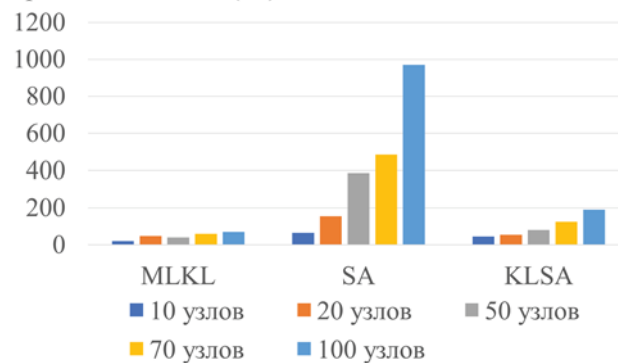
При работе над алгоритмом FCM-PSO были сгенерированы тестовые графы, содержащие разные размеры узлов. Весовые коэффициенты узлов находились в диапазоне от 1 до 100. Было создано 100 графов и весов машин для графа каждого размера. Все вычисления проводились на процессоре Intel Xeon L5420 (2,5 ГГц) [28].

Отношение разреза графа относительно ILP решения



a)

Время выполнения (мс)



b)

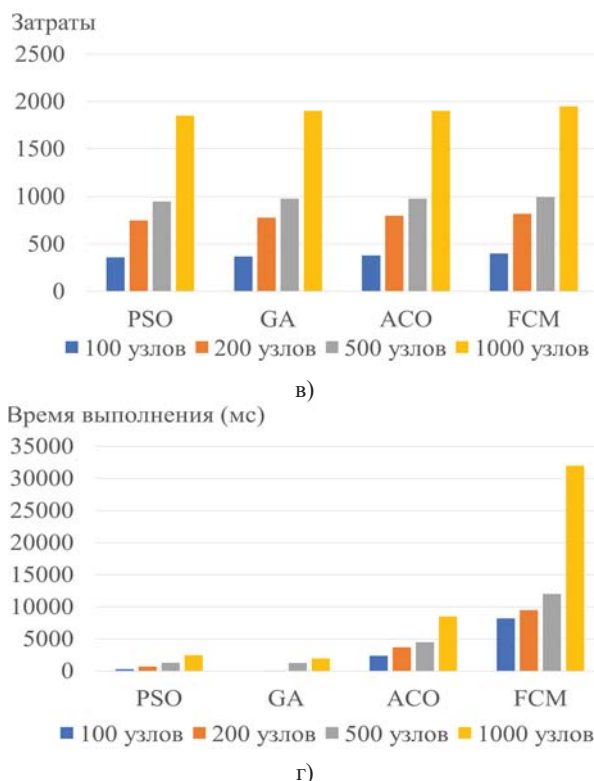


Рис. 1. Результаты сравнения методов:

- а) Сравнение результирующего разреза графа относительно решения ILP; б) Сравнение времени на разбиение графа; в) Сравнение процента затрат; г) Сравнение времени на разбиение графа

Графики на рисунке 1 доказывают, что не существует универсального алгоритма. Каждый метод сбалансирован, если он обладает сравнительно высокой скоростью выполнения, это компенсируется значительными вычислительными затратами на его реализацию или качеством получившегося результата. При анализе методов стоит в первую очередь основываться на выборе критериев необходимых в выбранной сфере применения.

Таблица 1

Сравнение методов разделения ресурсов по критериям

Методы Параметры оценки	FCM	PSO	GA	SA	ACO	MLKL
Сложность реализации	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Высокая
Гибкость при совмещении с другими алгоритмами	Неадаптивный	Адаптивный	Неадаптивный	Неадаптивный	Адаптивный	Адаптивный
Применение	Специализированный	Специализированный	Универсальный	Универсальный	Специализированный	Специализированный
Зависимость эффективности от настройки параметров	Зависимый	Зависимый	Свободный	Зависимый	Зависимый	Свободный

В таблице 1 представлена сравнительная таблица, показывающая эффективность каждого изученного метода по важным критериям.

Заключение

Каждый метод разделения программных ресурсов обладает преимуществами и недостатками. Тем не менее наибольшей эффективности можно добиться путем совмещения механизмов разных алгоритмов в одном методе. Этот подход доказывается немалым количеством исследований по созданию гибридных алгоритмов. Метод KLSA выгодно объединяет в себе алгоритмы SA и MLKL, эффективно комбинируя их достоинства в конкретных задачах.

Для выбора оптимального алгоритма следует учитывать его универсальность применения и гибкость в совмещении с другими методами. В этом контексте, перспективным кажется использование метода GA-PSO или SA-PSO, который сочетает гибким метод роя частиц с высокой эффективностью генетического алгоритма и метода имитации отжига.

Сочетание метода может привести к эффективному результату, который лучше подходит для использования в современных вычислительных сетях. Этот метод может быть применен в Интегрированной модульной архитектуре второго поколения, где количество узлов на борту самолета превышает 1000. Для этого необходимо создание новых научных методов или алгоритмов решения этой задачи.

Литература

1. Чуйнов Г.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №3 (140). С. 55-62.
2. Vanderleest S.H., Matthews D.C. Incremental Assurance of Multi-core Integrated Modular Avionics (IMA) // IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Antonio, 2021, С. 1-9. doi: 10.1109/DASC52595.2021.9594404
3. Eveleens R.L.C. Integrated Modular Avionics Development Guidance and Certification Considerations // National Aerospace Laboratory NLR. Amsterdam, 2006. 19 с.
4. Martins J., Ning A. Engineering Design Optimization. Cambridge. Cambridge University Press. 650 с. doi:10.1017/9781108980647
5. Дыбская В.В. Проектирование системы распределения в логистике // М.: ИНФРА-М, 2023. 235 с. doi: 10.12737/24760 ISBN 978-5-16-012614-2
6. Chatha K.S., Vemuri R. Hardware-software partitioning and pipelined scheduling of transformative applications // IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems. 2002. № 3. С. 193-208. doi: 10.1109/TVLSI.2002.1043323.
7. Arató P., Mann Z.A., Orban A. Algorithmic aspects of hardware/software partitioning // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. №10. 2005. С. 136-156. doi:10.1145/1044111.1044119
8. Евстигнеев В.А. Применение теории графов в программировании М.: Наука, 1985. 352 с.
9. Pavai G., Geetha T.V. New crossover operators using dominance and co-dominance principles for faster convergence of genetic algorithms // Soft Computing 23. 2019. С. 3661–3686. doi: 10.1007/s00500-018-3016-1
10. Coley D.A. An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers. NJ, World Scientific. 1998. 225 с.



11. *Chun-Fung Li J., Zimmerle D.* Flexible networked rural electrification using leveled interpolative genetic algorithm // *Energy and AI*. №10. 2022. doi:10.1016/j.egyai.2022.100186
12. *Ovat F.A., Anyandi A.J.* The particle swarm optimization algorithm application // *Global Journal of Engineering and Technology Advances*. № 3. 2020. 6 c.
13. *Mason K., Duggan J., Howley E.* A Meta Optimization Analysis of Particle Swarm Optimization Velocity Update Equations for Watershed Management Learning // *Applied Soft Computing*. №62. 2018. C. 148-161. doi:10.1016/j.asoc.2017.10.018
14. *Wang G., Kastner R.* Application partitioning on programmable platforms using the ant colony optimization // *DBLP*. 2006. 19 c.
15. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. №4. 2006. C. 28-39. doi:10.1109/MCI.2006.329691
16. *Han Z., Wang Y., Tian D.* Ant colony optimization for assembly sequence planning based on parameters optimization // *Frontiers of Mechanical Engineering* volume 16. 2021. C. 393-409. doi:10.1007/s11465-020-0613-3
17. *Sheshasayee A., Sharmila P.* Comparative study of fuzzy C means and K means algorithm for requirements clustering // *Scientific Programming*. 2014, № 7. C. 853-857.
18. *Syeda T.B., Syed M., Syed M.H.* K-means and Fuzzy c-means Algorithms Comparison using KNIME // *The 6th International Conference on Next Generation Computing*. 2020. C. 4.
19. *Pérez-Ortega J., Rey-Figueroa C.D., Roblero-Aguilar S.S., Almanza-Ortega N.N., Zavala-Díaz C., García-Paredes S., Landero-Nájera V.* POFCM: A Parallel Fuzzy Clustering Algorithm for Large Datasets // *Mathematics* 2023. №11. 2023. C. 4. doi:10.3390/math11081920
20. *García J.L.G., Yahyapour R., Tchernykh A.* Graph Partitioning for FEM Applications: Reducing the Communication Volume with DSHEM // *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. Dublin, 2019. C. 779-786. doi:10.1109/HPCS48598.2019.9188124
21. *Hendrickson B., Leland R.* A multilevel algorithm for partitioning graphs // *ACM/IEEE conference on Supercomputing (CDROM)*. 1995. 15 c. doi:10.1109/SUPERC.1995.242799
22. *Ushijima-Mwesigwa H., Hyman J.D., Hagberg A.* Multilevel Graph Partitioning for Three-Dimensional Discrete Fracture Network Flow Simulations // *Math Geosci* 53. 2021. C. 1699-1724 doi:10.1007/s11004-021-09944-y
23. *Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P.* Optimization by simulated annealing. New York, №220. 1983. C. 671-680. doi:10.1126/science.220.4598.671
24. *Туровский Я.А., Адаменко А.А.* Сравнительный анализ эволюционного метода с использованием "изолятов" и метода имитации отжига при обучении искусственных нейронных сетей // *Программная инженерия*. №4. 2018. C.185-190. doi:10.17587/prin.9.185-190
25. *Jing Y., Kuang J., Du J., Hu B.* Application of improved simulated annealing optimization algorithms in hardware/software partitioning of the reconfigurable system-on-chip // *Communications in Computer and Information Science*. № 405. 2014. C.532-540. doi:10.1007/978-3-642-53962-6_48
26. *Verbelen T., De Turck, Dhoedt B.* Graph partitioning algorithms for optimizing software deployment in mobile cloud computing // *Future Generation Computer Systems*. №2. 2013. 26 c. doi:10.1016/j.future.2012.07.003
27. *Yue Z., Edwards K.D., Sluder C.S., Som S.* Prediction of Cyclic Variability and Knock-Limited Spark Advance (KLSA) in Spark-Ignition (SI) Engine // *Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. №2. 2018. C.10. doi:10.1115/ICEF2018-9605
28. *Mhadhbi I., Othman S.B., Ali M.M.* An efficient technique for Hardware/Software partitioning process in codesign // *Scientific Programming*. 2016. 12 c. doi:10.1155/2016/6382765
29. *Cynthia O.U., Nvene S.* An Optimal Model and Production Planning in Upholstery by Linear Integer Programming // *Asian Journal of Probability and Statistics*. №22. 2023. C. 19-32. doi:10.9734/ajpas/2023/v22i1474
30. *Bredereck R., Kaczmarczyk A., Knop D., Niedermeier R.* High-Multiplicity Fair Allocation: Lenstra Empowered by N-fold Integer Programming // *ACM Conference on Economics and Computation (EC '19)*. New York, 2019. C. 505–523. doi:10.1145/3328526.3329649

METHODS FOR SOFTWARE AND HARDWARE PARTITIONING FOR MODERN COMPUTING NETWORKS

ALEXEY YU. PETROV
 Saint-Petersburg, Russia,
 PAlexeq1998@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction: Introduction: separation of software and hardware resources is one of the key issues for modern computing networks. Recent developments in avionics architectures, such as the second generation Integrated Modular Architecture, require new methods to build distributed hardware and software. **Purpose:** the aim of the research is to compare modern methods of partitioning software and hardware resources in computing networks, as well as to analyze the most effective mechanisms of these algorithms. **Methods:** the resource partitioning problem in a network was modeled as a graph partitioning problem. Particular attention has been paid to the study of heuristic optimization methods used to obtain an approximation for large amounts of data. Genetic algorithm, particle swarm method, ant colony algorithm, fuzzy clustering algorithm, multilevel graph partition-

KEYWORDS: *partitioning methods, hardware and software resources, heuristic algorithms, graph partitioning, performance criteria.*

ing method, and simulated annealing method were studied and analyzed. For the most systematic approach to the analysis, a comparative table of methods was constructed, reflecting the performance of the algorithms on some parameters. **Results:** hybrid algorithms are the most promising in the field of computational networks. It is worth noting the high potential of methods such as, GA-PSO and SA-PSO. **Practical relevance:** the presented concept of combining different algorithms is developed for modern architectures of avionics and airborne equipment complexes to support parallel problem solving and their relocation to critical applications. **Discussion:** the application of similar principles in the creation of other hybrid algorithms has been successfully demonstrated in practice and has been highly appreciated by experts.

REFERENCES

1. G.A. Chuyanov, V.V. Kosyanchuk, N.I. Selvesyuk, "Prospects for the development of on-board equipment systems based on integrated modular avionics," *Izvestia SFU. Technical science*. 2013. No. 3 (140), pp. 55-62.
2. S.H. Vanderleest, D.C. Matthews, "Incremental Assurance of Multicore Integrated Modular Avionics (IMA)," *IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. San Antonio, 2021, pp. 1-9. doi: 10.1109/DASC52595.2021.9594404
3. R.L.C. Eveleens, "Integrated Modular Avionics Development Guidance and Certification Considerations," National Aerospace Laboratory NLR. Amsterdam, 2006. 19 p.
4. J. Martins, A. Ning, "Engineering Design Optimization," Cambridge. Cambridge University Press. 650 p. doi:10.1017/9781108980647
5. V.V. Dybskaya, "Design of a distribution system in logistics." Moscow: INFRA-M, 2023. 235 p. doi: 10.12737/24760 ISBN 978-5-16-012614-2
6. K.S. Chatha, R. Vemuri, "Hardware-software partitioning and pipelined scheduling of transformative applications," *IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems*. 2002. No. 3, pp. 193-208. doi: 10.1109/TVLSI.2002.1043323.
7. P. Arato, Z.A. Mann, A. Orban, "Algorithmic aspects of hardware/software partitioning," *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*. No.10. 2005, pp. 136-156. doi:10.1145/1044111.1044119
8. V.A. Evstigneev, "Application of graph theory in programming," Moscow: Nauka, 1985. 352 p.
9. G. Pavai, T.V. Geetha, "New crossover operators using dominance and co-dominance principles for faster convergence of genetic algorithms," *Soft Computing*, No. 23. 2019, pp. 3661-3686. doi: 10.1007/s00500-018-3016-1
10. D.A. Coley, "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers," NJ, World Scientific. 1998. 225 p.
11. J. Chun-Fung Li, D. Zimmerle, "Flexible networked rural electrification using levelized interpolative genetic algorithm," *Energy and AI*. No.10. 2022. doi:10.1016/j.egyai.2022.100186
12. F.A. Ovat, A.J. Anyandi, "The particle swarm optimization algorithm application," *Global Journal of Engineering and Technology Advances*. No. 3. 2020. 6 p.
13. K. Mason, J. Duggan, E. Howley, "A Meta Optimization Analysis of Particle Swarm Optimization Velocity Update Equations for Watershed Management Learning," *Applied Soft Computing*. No.62. 2018, pp. 148-161. doi:10.1016/j.asoc.2017.10.018
14. G. Wang, R. Kastner, "Application partitioning on programmable platforms using the ant colony optimization," DBLP. 2006. 19 p.
15. M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle, "Ant colony optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*. No.4. 2006, pp. 28-39. doi: 10.1109/MCI.2006.329691
16. Z. Han, Y. Wang, D. Tian, "Ant colony optimization for assembly sequence planning based on parameters optimization," *Frontiers of Mechanical Engineering*. Vol. 16. 2021, pp. 393-409. doi:10.1007/s11465-020-0613-3
17. A. Sheshasayee, P. Sharmila, "Comparative study of fuzzy C means and K means algorithm for requirements clustering," *Scientific Programming*. 2014. No. 7, pp. 853-857.
18. T.B. Syeda, M. Syed, M.H. Syed, "K-means and Fuzzy c-means Algorithms Comparison using KNIME," The 6th International Conference on Next Generation Computing. 2020, pp. 4.
19. J. Perez-Ortega, C.D. Rey-Figueroa, S.S. Roblero-Aguilar, N.N. Almanza-Ortega, C. Zavala-Diaz, S. Garcia-Paredes, V. Landero-Najera, "POFCM: A Parallel Fuzzy Clustering Algorithm for Large Datasets," *Mathematics* 2023. No.11, pp. 4. doi:10.3390/math11081920
20. J. L. G. Garcia, R. Yahyapour, A. Tchernykh, "Graph Partitioning for FEM Applications: Reducing the Communication Volume with DSHEM," *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. Dublin, 2019, pp. 779-786. doi:10.1109/HPCS48598.2019.9188124
21. B. Hendrickson, R. Leland, "A multilevel algorithm for partitioning graphs," *ACM/IEEE conference on Supercomputing (CDROM)*. 1995. 15 p. doi:10.1109/SUPERC.1995.242799
22. H. Ushijima-Mwesigwa, J.D. Hyman, A. Hagberg, "Multilevel Graph Partitioning for Three-Dimensional Discrete Fracture Network Flow Simulations," *Math Geosci*. No. 53. 2021, pp. 1699-1724 doi:10.1007/s11004-021-09944-y
23. S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," New York. No. 220. 1983, pp. 671-680. doi:10.1126/science.220.4598.671
24. Ya.A. Turovsky, A.A. Adamenko, "Comparative analysis of the evolutionary method using "isolates" and the simulated annealing method when training artificial neural networks," *Software Engineering*. No. 4. 2018, pp. 185-190. doi:10.17587/prin.9.185-190
25. Y. Jing, J. Kuang, J. Du, B. Hu, "Application of improved simulated annealing optimization algorithms in hardware/software partitioning of the reconfigurable system-on-chip," *Communications in Computer and Information Science*. No. 405. 2014, pp. 532-540. doi:10.1007/978-3-642-53962-6_48
26. T. Verbelen, De Turck, B. Dhoedt, "Graph partitioning algorithms for optimizing software deployment in mobile cloud computing," *Future Generation Computer Systems*. No.2. 2013. 26 p. doi:10.1016/j.future.2012.07.003
27. Z. Yue, K.D. Edwards, C.S. Sluder, S. Som, "Prediction of Cyclic Variability and Knock-Limited Spark Advance (KLSA) in Spark-Ignition (SI) Engine," *Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. No.2. 2018, pp.10. doi:10.1115/ICEF2018-9605
28. I. Mhadhbi, S.B. Othman, M.M. Ali, "An efficient technique for Hardware/Software partitioning process in codesign," *Scientific Programming*. 2016. 12 p. doi:10.1155/2016/6382765
29. O.U. Cynthia, S. Nvene, "An Optimal Model and Production Planning in Upholstery by Linear Integer Programming," *Asian Journal of Probability and Statistics*. No.22. 2023, pp. 19-32. doi:10.9734/ajpas/2023/v22i1474
30. R. Bredereck, A. Kaczmarczyk, D. Knop, R. Niedermeier, "High-Multiplicity Fair Allocation: Lenstra Empowered by N-fold Integer Programming," *ACM Conference on Economics and Computation (EC '19)*. New York, 2019, pp. 505-523. doi:10.1145/3328526.3329649

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Alexey Yu. Petrov, Postgraduate student, Southwest State University, Kursk, Russia



КОНЦЕПЦИЯ ВОЗДУШНОЙ КОМПОНЕНТЫ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТАКТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СКРЫТОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

ЯСИНСКИЙ

Сергей Александрович¹

СОКОЛОВ

Виктор Михайлович²

АННОТАЦИЯ

Введение: Появление современных беспилотных летательных аппаратов, относящихся к классу микродронов и конвертопланов, открывает широкие возможности для их применения в качестве инструмента ведения скрытого наблюдения в различных условиях оперативной обстановки. Анализ известных источников показал, что в настоящее время для ведения наблюдения в органах внутренних дел применяются разрозненные, не образующие единую интегрированную многоцелевую систему и не обеспечивающие скрытое наблюдение в ближней зоне беспилотные комплексы, относящиеся как правило к летательным аппаратам самолетного и мультироторного типа. Подобный подход не позволяет организовать непрерывное скрытое наблюдение за объектом, представляющим оперативный интерес. **Цель исследования:** Разработка концепции воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел, позволяющего организовать непрерывное скрытое наблюдение как за движущимися, так и за стационарными объектами, в том числе находящимися внутри помещения в ближней зоне наблюдения. **Результаты:** Разработана концепция воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел, в составе которого комплексно применяются малозаметный тактический комплекс ближнего радиуса действия на основе микродронов вертолетного типа и беспилотные системы среднего и дальнего радиуса действия на основе конвертопланов. Микродроны FLIR Black Hornet 3 выполняют роль малозаметного тактического комплекса скрытого наблюдения в ближней зоне, а конвертопланы "ДИАМ 6" и "ДИАМ 20К" позволят обеспечить непрерывное скрытое наблюдение в средней и дальней зоне в условиях интенсивного перемещения объекта. **Обсуждение:** Для координации ведения наблюдения в дальней зоне, а также для резервирования технических средств с целью обеспечения непрерывного наблюдения за объектом воздушная компонента мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения может быть ситуативно интегрирована в информационный контур многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха.

Сведения об авторах:

¹Доктор технических наук, доцент, ведущий специалист ЗАО "Институт телекоммуникаций", г. Санкт-Петербург, Россия, yasinsky777@mail.ru

²Кандидат технических наук, доцент кафедры Информационной безопасности Санкт-Петербургского Университета МВД России, г. Санкт-Петербург, Россия, compas-tfc@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Министерство внутренних дел Российской Федерации, органы внутренних дел, тактический комплекс скрытого воздушного наблюдения, Black Hornet 3, микродрон, конвертоплан.

Для цитирования: Ясинский С.А., Соколов М.В. Концепция воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 2. С. 51-59. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-51-59

Введение

В рамках данной статьи предложена концепция создания воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел. В состав разрабатываемого перспективного тактического комплекса скрытого наблюдения предлагается включить малозаметный тактический комплекс ближнего действия на основе микродронов вертолетного типа, который будет дополнен беспилотными системами среднего и дальнего радиуса действия на основе конвертопланов.

В статье «Возможности применения БПЛА при решении оперативных задач ОВД России» [1] Ю.В. Малова и С.А. Фокина рассматривается возможность применения беспилотных летательных аппаратов в органах внутренних дел для сбора информации об объекте оперативной заинтересованности при подготовке оперативно-розыскных и иных мероприятий, а также для рекогносцировки местности и получения данных о расположении помещений, транспортных средств и возможных путей отхода при подготовке операции по задержанию. Однако, на наш взгляд, утверждение авторов о том, что «При использовании БПЛА самолетного типа контроль за передвижением объекта оперативной заинтересованности может быть осуществлен максимально дистанционно и, как следствие, конспиративно» не всегда справедливо.

В отличие от разрозненных беспилотных комплексов, применяющихся для ведения наблюдения в органах внутренних дел в настоящее время, предложенный тактический комплекс скрытого наблюдения для органов внутренних дел позволяет организовать непрерывное скрытое наблюдение как за движущимися, так и за стационарными объектами, в том числе находящимися внутри помещения в ближней зоне наблюдения.

Новизна подхода, предложенного в статье, заключается в комплексном подходе к построению воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел на основе микродронов вертолетного типа ближнего радиуса действия и конвертопланов среднего и дальнего радиуса действия.

В настоящее время, одним из основных направлений развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является уменьшение массогабаритных параметров в рамках концепции MAV (micro air vehicle). Наряду со стратегическими беспилотными летательными аппаратами, бурно развивается сегмент малозаметных тактических микродронов, которые могут использоваться одним человеком в звене отделение – взвод. К основным преимуществам микродронов относятся малая масса и размеры (запуск и транспортировка доступны одному человеку), низкая радиолокационная (малая эффективная площадь рассеяния радиоволн), инфракрасная, оптическая и акустическая заметность, способность осуществлять управляемый полет на предельно малых высотах, дальность действия до 10 км, а также длительность полета до двух часов, что является достаточной продолжительностью полета для выполнения целевых функций. Кроме того, в качестве достоинств микродронов можно отметить высокий уровень унификации оборудования, что позволяет использовать один пульт для управления несколькими комплексами, быстроту

развертывания и удобство транспортировки. Конечно же микродроны не лишены недостатков. Основным недостатком использования микродронов остается наличие электромагнитного излучения, которое может служить демаскирующим фактором [2-5].

Тактический комплекс скрытого наблюдения в ближней зоне на основе микродрона FLIR Black Hornet 3

Микродроны выполняют роль малозаметного тактического комплекса скрытого наблюдения в ближней зоне. В качестве примера современного серийного микродрона можно привести FLIR Black Hornet 3 из состава персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS производства компании FLIR Systems. Следует отметить, что серийное производство микродронов Black Hornet было начато еще в 2012 году норвежской компанией Prox Dynamics в интересах министерства обороны Великобритании. Позже, в ноябре 2016 года, компания Prox Dynamics была приобретена компанией FLIR Systems, которая в 2021 году вошла в состав компании Teledyne Technologies [3, 6-9].

Основной задачей персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS является обеспечение ведения скрытого мультиспектрального наблюдения, в том числе внутри помещений и вне зоны покрытия GPS, позволяющего вывести ситуационную осведомленность лица, принимающего решение на качественно новый уровень. Пример использования персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS представлен на рисунке 1 [9, 10].



Рис. 1. Пример использования персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS

Персональная разведывательная система PD-100 FLIR Black Hornet PRS (Black Hornet 3), производство которой началось в июне 2018, а первый контракт на поставку был заключен в январе 2019 года, является третьим поколением самой миниатюрной серийно выпускаемой беспилотной системы ближнего радиуса действия. Данная система используется на уровне отделения или взвода.

В настоящее время персональная разведывательная система PD-100 FLIR Black Hornet PRS нашла применение в



более чем 30 странах мира, среди которых Индия, Австралия, Германия, Нидерланды, Дания, Греция, Малайзия, Индонезия, Ирландия, Новая Зеландия, Алжир, Марокко, Норвегия, Великобритания (Бригада разведывательных сил в лагере Бастион в Афганистане), США (Корпус морской пехоты), Франция, Испания, Польша, Южная Африка, Украина и Турция. К сентябрю 2016 года система PD-100 FLIR Black Hornet PRS появилась на вооружении девятнадцати стран НАТО. На Украине дроны Black Hornet 3 впервые были использованы в ноябре 2022 года [4, 5, 9-13].

Отметим, что именно персональная разведывательная система PD-100 FLIR Black Hornet PRS с дронами Black Hornet 3 была захвачена Вооруженными силами Российской Федерации у террористов, действовавших в Новой Таволжанке Белгородской области в июне 2023 года [10-12, 14, 15].

Состав персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS, захваченной ВС РФ в июне 2023 года на территории Белгородской области представлен на рисунке 2 [14, 16-18].

К сожалению, подробная информация о структуре персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения в настоящее время недоступна. Однако, компоненты данной системы могут быть идентифицированы путем проведения анализа аналогичной персональной разведывательной системы второго поколения PD-100 PRS BLACK HORNET 2 [19].



Рис. 2. Состав персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS, захваченной ВС РФ в июне 2023 года

Исходя из общности систем второго и третьего поколения, можно утверждать, что в состав персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS (рис. 2) входят два разведывательных микродрона вертолетного типа FLIR Black Hornet 3 (1 и 2), контроллер, состоящий из базовой станции (5), джойстика для управления дроном одной рукой (6) и монитора с диагональю 15 сантиметров для вывода видеопотока с камер дрона (3), внешняя антенна (4), используемая для достижения максимальной дальности, а также тактическая система для переноски комплекса. В базовой станции находится приемник GPS, собственная антенна и два микродрона FLIR Black Hornet 3.

Вес персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения в полной комплектации (рис. 2) составляет 1,3 кг. Стоимость комплекта составляет 80 000 долларов США [4, 6, 10].

Дополнительно, исходя из описания системы PD-100 PRS BLACK HORNET 2 [19], может поставляться тренировочный симулятор для подготовки к практическому использованию персональной разведывательной системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения.

Внешний вид микродрона FLIR Black Hornet 3 персональной разведывательной системы Black Hornet PRS представлен на рисунках 3 и 4 [10].



Рис. 3. Внешний вид микродрона FLIR Black Hornet 3



Рис. 4. Микродрон FLIR Black Hornet 3 в полете

Микроминиатюрный одновинтовой дрон вертолетного типа FLIR Black Hornet 3 обладает низкой радиолокационной, инфракрасной, оптической и акустической заметностью. Black Hornet 3 отличается от более ранней модификации Black Hornet 2 рядом программных и аппаратных доработок, в том числе усовершенствованной конструкцией несущего винта с большим диаметром, увеличенной дальностью действия и скоростью, а также полностью модульной конструкцией с возможностью быстрой замены съемного аккумулятора и модулей полезной нагрузки, что позволяет гибко адаптировать дрон к выполнению различных задач.

Съемная аккумуляторная батарея предназначена для питания горизонтального и вертикального винтов дрона. FLIR Black Hornet 3 может быть использован для ведения скрытого наблюдения на короткой дистанции за неподвижными и

подвижными объектами как на открытой местности, так и в помещениях [3, 4, 6, 9, 10, 18].

Тактико-технические характеристики дрона FLIR Black Hornet 3 представлены в таблице 1 [4, 6, 9, 10, 13, 20].

Таблица 1

Тактико-технические характеристики дрона FLIR Black Hornet 3

Характеристика	Значение
Диаметр ротора, мм	123
Общая длина, мм	168
Общий вес, г	33
Вес комплекта, кг	1,3
Масса полезной нагрузки, г	до 19
Максимальная продолжительность полета, мин	25
Максимальное расстояние FPV удаления, км	2
Максимальная скорость горизонтального полета, км/ч	21
Передача данных	Цифровое зашифрованное соединение, мощная динамическая, скачкообразная перестройка частот для уверенной работы за пределами прямой видимости
Режимы полета	Авто/ручное, зависание и наблюдение, полет по точкам, автовозврат (принудительный/при потере сигнала)
Ветроустойчивость, м/с	7,7, с порывами до 10
Температурный диапазон, °C	от -10 до +43

Микродрон Black Hornet 3 оснащен управляемой видеокамерой высокого разрешения (HD) и тепловизионной камерой с датчиком FLIR Lepton, выполненных в виде съемных модулей. Видеокамера обеспечивает ведение видеонаблюдения в режиме реального времени и получение высококачественных фотографий высокой четкости. Видеокамера также оснащена оптическим zoom, управление которым осуществляется с помощью органов управления базовой станции. Тепловизионная камера FLIR Lepton обеспечивает ведение круглосуточного всепогодного скрытого наблюдения за объектом. Тактико-технические характеристики видеокамеры и тепловизионной системы дрона FLIR Black Hornet 3 представлены в таблице 2 [4, 6, 9, 10].

Таблица 2

Тактико-технические характеристики видеокамеры и тепловизионной системы дрона FLIR Black Hornet 3

Характеристика	Значение
Видеокамера	
Тип	Заменяемая
Разрешение видео, пикс	640 x 480
Разрешение фото, пикс	1600 x 1200
Тепловизор	
Тип	Заменяемая
Разрешение видео, пикс	160 x 120
Разрешение фото, пикс	160 x 120

Изображение, полученное с помощью сенсоров, передается по зашифрованной цифровой линии передачи данных с режимом скачкообразной перестройки частот на расстояние до 2 км [10].

Единственным недостатком мультиспектральной бортовой системы наблюдения является, на наш взгляд, отсутствие видеоаналитики, являющейся незаменимой системой поддержки принятия решения в условиях современных специальных операциях, отличающихся крайне высокой динамикой. Видеопоток дрона может транслироваться на сервер видеоаналитики с последующей передачей как на планшеты должностных лиц, принимающих решение, так и на информационные устройства личного состава подразделения, принимающего непосредственное участие в специальной операции.

Основные функциональные особенности дрона FLIR Black Hornet третьего поколения отражены на рисунке 5 [6, 10].

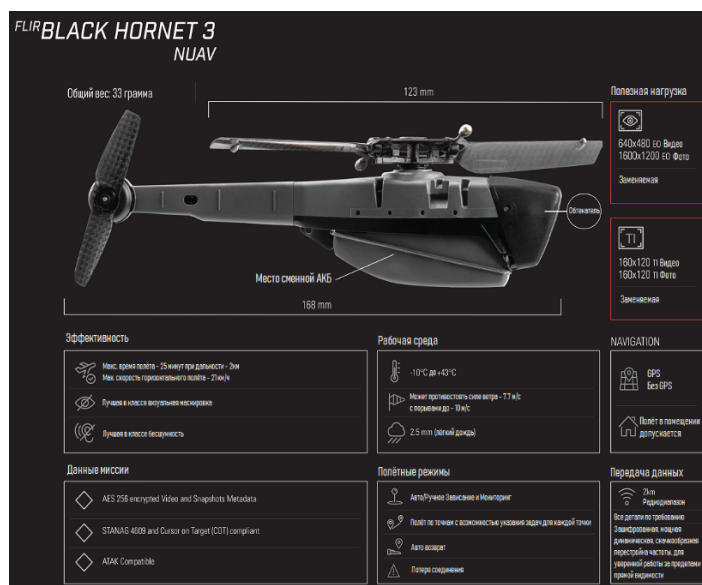


Рис. 5. Основные особенности дрона FLIR Black Hornet третьего поколения

Наряду с тактико-техническими характеристиками, к основным функциональным особенностям дрона FLIR Black Hornet третьего поколения могут быть отнесены [4, 9, 10]:

1. Новая модульная конструкция, которая благодаря возможности быстрой замены бортовой полезной нагрузки и аккумуляторной батареи обеспечивает гибкое использование дрона для выполнения различных задач.
2. Возможность осуществления полета в автоматическом и ручном режимах в условиях отсутствия покрытия глобальных навигационных систем (GPS), что позволяет дрону вести наблюдение внутри здания.
3. Возможность эксплуатации в ветренную, с порывами ветра до 10 м/с, погоду и в условиях легкого дождя.
4. Возможность управления дроном одной рукой посредством контроллера и монитора, входящих в состав системы PD-100, как в режиме ручного управления, так и по заданному маршруту, то есть по выбранным оператором точкам геолокации. Автовозврат при потере управления.



5. Легкая интеграция в Android Tactical Assault Kit (АТАК) используемый для обеспечения сетей непосредственно на поле боя и распространения информации среди всех участников в армии США.

6. Компактная система ношения, малое время развертывания и простое управление.

7. Требуется минимального обучения для уверенного обращения.

Отечественные разработки в сфере ультралегких беспилотных летательных аппаратов

Одним из признаков выбора правильного направления в исследованиях, направленных на создание концепции воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел, являются научные работы [4, 5, 20] посвященные различным аспектам разработки и применения ультралегких беспилотных летательных аппаратов в Вооруженных Силах Российской Федерации, а также информация о разработке разведывательного микробеспилотника для оснащения боевой экипировки военнослужащего третьего поколения «Ратник» [13, 21, 22].

Как справедливо утверждают Ю.В. Малов и С.А. Фокин в статье «Возможности применения БПЛА при решении оперативных задач ОВД России» [1] применение беспилотного летательного аппарата «...в качестве активного инструмента подготовки заключительной фазы реализации оперативной разработки – задержания, практически полностью повторяет принцип использования таких систем войсковыми подразделениями специального назначения». Следовательно, анализ разработок в области создания разведывательного микробеспилотника для оснащения боевой экипировки военнослужащего третьего поколения «Ратник» в данной статье является обоснованным.

В научных работах [4, 5, 20] сформулированы подробные тактико-технические требования к перспективному ультралегкому беспилотному летательному аппарату для ВС РФ, а также подчеркивается целесообразность и актуальность проведения научных исследований в области разработки миниатюрных беспилотных летательных аппаратов, как компонента экипировки военнослужащих.

По информации из открытых источников [21, 22] микробеспилотник для оснащения боевой экипировки военнослужащего третьего поколения «Ратник» будет представлять собой умную систему воздушной разведки на базе мультироторного сверхлегкого беспилотного летательного аппарата с радиусом действия в пределах одного километра и массой до 1,5 кг. Компания «Ростех», которая является разработчиком данного аппарата, предполагает оснастить летательный аппарат уникальной системой позиционирования и управления, которая позволит вести разведку в условиях интенсивной радиоэлектронной борьбы.

Однако, в появившейся позже статье С.В. Губанова «Применение беспилотных летательных аппаратов класса «мини» в единой системе управления тактического звена» [13] в качестве возможного элемента боевой экипировки «Ратник» рассматривается не мультироторный дрон массой до 1,5 кг, а впервые представленный на форуме «Армия-2020»

микродрон компании «Кронштадт» масса которого составляет 180 грамм (рис. 6) [23].



Рис. 6. Микродрон компании «Кронштадт»

Очевидно, что включение недорогого «карманного беспилотника» в состав экипировки военнослужащего или сотрудника органов внутренних дел позволит, как и в случае с системой PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения, обеспечить качественно новый уровень ситуационной осведомленности должностных лиц, что обеспечит, в свою очередь, принятие обоснованного решения.

Поскольку в настоящее время на снабжении ВС РФ отсутствуют комплексы с БЛА мини класса, которые могли бы быть включены в состав комплекта индивидуальной боевой экипировки для ведения воздушной разведки в тактическом звене [20], в состав воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел предлагается включить персональную разведывательную систему PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения.

Безусловно, микробеспилотник из состава боевой экипировки военнослужащего третьего поколения «Ратник» после проведения испытаний и начала серийного производства может быть использован в воздушной компоненте мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел в качестве тактической системы скрытого наблюдения ближнего радиуса действия. Несомненно, захват системы PD-100 FLIR Black Hornet PRS третьего поколения позволит российским производителям микродронов ускорить разработку отечественного микробеспилотника.

Комплекс скрытого наблюдения в средней и дальней зоне на основе конвертопланов «ДИАМ 6» и «ДИАМ 20К»

В рамках концепции воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения для органов внутренних дел, предложенной в данной статье, тактический комплекс скрытого наблюдения в ближней зоне на основе микродрона FLIR Black Hornet 3 сопряжен с

Таблица 3

Основные тактико-технические характеристики
 «ДИАМ 20К»

Массо-габаритные характеристики:	
Максимальная взлетная масса, кг	до 29
Размах крыла, мм	4000
Длина, мм	2000
Масса полезной нагрузки, кг	до 3,5
Скоростные характеристики:	
Максимальная скорость полета м/с (км/ч)	40 (144)
Крейсерская скорость полета м/с (км/ч)	22-24 (80-90)
Тактические характеристики:	
Максимальная продолжительность полета, часов	10
Максимальная дальность полета, км	800
Максимальная высота полета, м	4000
Режим взлета	вертикальный
Режим посадки	вертикальный
Ограничения по скорости ветра, не более, м/с	15
Температурный диапазон окружающей среды, С	от -30 до +40

конвертопланами «ДИАМ 6» и «ДИАМ 20К», позволяющими обеспечить непрерывное скрытое наблюдение в недоступной для микродрона средней и дальней зоне, в том числе в условиях интенсивного и нерегулярного перемещения объекта.

В качестве комплекса, обеспечивающего скрытое наблюдение на открытой местности в средней зоне может быть выбран конвертоплан «ДИАМ 6», действующий на дальности до 60 км, а для ведения наблюдения в дальней зоне (до 800 км) – конвертоплан «ДИАМ 20К». Выбор беспилотного летательного аппарата, построенного по схеме конвертоплана, обусловлен уникальным сочетанием преимуществ летательных аппаратов, выполненных по самолетной и мультироторной схемам. Классический конвертоплан является летательным аппаратом вертикального взлета и посадки, который в полете движется как самолет с опорой на фиксированное крыло. Корпус летательного аппарата при этом остается в горизонтальном положении.

По сравнению с БПЛА самолетного типа, конвертоплану не нужны пусковые устройства, он способен взлетать и садиться на неподготовленную площадку, а также способен зависать в одной точке. В то же время, по сравнению с БПЛА мультироторного типа конвертоплан обладает большей скоростью, продолжительностью и дальностью полета.

Рассмотрим в качестве примера беспилотную авиационную систему (БАС) «ДИАМ 20К» (рис. 7) производства ООО «ДИАМ-АЭРО» [24-26]. Основным предназначением БАС «ДИАМ 20К», который успешно прошел лётные испытания в 2022 году, является выполнение фото-, видео-, тепловизионной и мультиспектральной съёмки, а также воздушного лазерного сканирования.



Рис. 7. Беспилотная авиационная система «ДИАМ 20К»

Для одновременного размещения нескольких модулей полезной нагрузки в корпусе БАС «ДИАМ 20К» предусмотрены два отсека. К модулям полезной нагрузки, которыми может быть оснащен конвертоплан, относятся фотоаппарат высокого разрешения, система видеонаблюдения, мультиспектральная камера, тепловизионная камера, а также специальный бокс для доставки грузов. Основные тактико-технические характеристики БАС «ДИАМ 20К» представлены в таблице 3 [24-26].

Еще одним неоспоримым преимуществом БАС «ДИАМ 20» является наличие мощного бортового комплекса связи. Конвертоплан оборудован системой связи, которая работает по радиоканалу с дальностью управления до 100 км в прямой радиовидимости.

Радиоканал дополнительно дублируется каналом сотовой сети стандарта GSM, который работает в зоне покрытия сотовых операторов. Кроме того, с 2021 года все конвертопланы серии «ДИАМ 20» будут оснащены спутниковой системой связи Iridium, что обеспечит связь с беспилотником во всех точках мира. Также все БВС серии «ДИАМ 20» оснащены дополнительной системой защиты от подавления сигнала GPS.

Для координации ведения наблюдения в дальней зоне, а также для резервирования технических средств с целью обеспечения непрерывного наблюдения за объектом воздушная компонента мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения может быть ситуативно интегрирована в информационный контур многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легкого воздуха в органах внутренних дел [27, 28].

Заключение

В статье разработана концепция воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел. Построение воздушной компоненты данного комплекса предполагает комплексное применение микродронов вертолетного типа и беспилотных систем среднего и дальнего радиуса действия на основе конвертопланов. Микродроны вертолетного типа FLIR Black Hornet 3 выполняют роль малозаметного тактического комплекса скрытого наблюдения в ближней зоне, а конвертопланы «ДИАМ 6» и «ДИАМ 20К» позволят обеспечить скрытое наблюдение в средней и дальней зоне, в том числе в условиях интенсивного перемещения объекта.

Комплексное использование разнотипных беспилотных летательных аппаратов в составе воздушной компоненты мультиспектрального тактического комплекса скрытого наблюдения органов внутренних дел, предложенного в



данной статье, обеспечит ведение непрерывного устойчивого скрытого наблюдения за объектом, представляющим оперативный интерес, и позволит вывести ситуационную осведомленность лица, принимающего решение на качественно новый уровень.

В свою очередь высокий уровень ситуационной осведомленности лица, принимающего решение создаст условия для принятия обоснованного решения даже в условиях резко меняющейся оперативной обстановки.

Литература

1. Малов Ю.В., Фокин С.А. Возможности применения БПЛА при решении оперативных задач ОВД России // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Деятельность оперативных подразделений: теория и практика». Ленинградская область: Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2022. С. 102-106.

2. Дремлюга Г.П., Мазулин Г.А. Микро-беспилотные летательные аппараты (микро БПЛА) // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2018. № 1(14). С. 46-55.

3. Полянин К.С., Гордиенко В.С. Разведывательные беспилотные летательные аппараты // Аллея науки. 2017. Т. 2, № 12. С. 248-255.

4. Шудра В.А., Сатин Б.В., Прус Ю.И., Степанов С.В. Особенности применения ультралегких беспилотных летательных аппаратов в вооруженном конфликте в Сирии // Научный резерв. 2020. № 1(9). С. 8-17.

5. Новак К.В., Олешко В.С., Старикова И.О., Тофоров М.С. Анализ комплексов с беспилотными летательными аппаратами, применяемых силами специальных операций Соединенных Штатов Америки // Труды МАИ. 2017. № 94. С. 5.

6. Ананьев А.Д. Миниатюрный разведывательный БПЛА Black Hornet // Актуальные исследования. 2021. №23 (50). С. 17-19. [Электронный ресурс]. URL: <https://apni.ru/article/2568-miniatiurnij-razvedivatelnyj-bpla-black-horne>

7. Беспилотный летательный аппарат PD-100 Black Hornet Nano. Сайт интернет-журнала «ВОЕННОЕ ОБОЗРЕНИЕ». [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/63016-bespilotnyy-letatelnyy-apparat-pd-100-black-hornet-nano-velikobritaniya.html>

8. Teledyne FLIR Defense поставит 1000 комплектов БЛА «Блэк Хорнет 3» ВС Украины. Сайт Центра анализа мировой торговли оружием (ЦАМТО). [Электронный ресурс]. URL: <https://armstrade.org/pages/main/about/index.shtml>

9. Сайт Army Technology (англ.) Verdict Media Limited 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/#catfish>

10. Сайт онлайн журнала о дронах DronoMania.ru. [Электронный ресурс]. URL: https://dronomania.ru/professionalnye/flir-black-hornet-prs.html?utm_referrer=https://ru.wikipedia.org/

11. Wikipedia. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Black_Hornet_Nano#cite_note-13

12. Wikipedia. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_Hornet_Nano

13. Губанов С.В. Применение беспилотных летательных аппаратов класса «мини» в единой системе управления тактического звена // Военная Мысль. 2023. № 7. С. 72-80.

14. Вальченко С. Российский спецназ взял в качестве трофея уникальный комплекс с мини-дронами. Электронное периодическое издание «МК.ru». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mk.ru/politics/2023/06/10/rossiyskiy-specnaz-vzyal-v-kachestve-trofeya-unikalnyy-kompleks-s-minidronami.html>

15. Валагин А. У границ Белгородской области захвачен миниатюрный вертолет-разведчик Black Hornet. Интернет-портал «Российской газеты». [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2023/06/07/reg-cfo/u-granic-belgorodskoj-oblasti-zahvachen-miniatiurnyj-vertolet-razvedchik.html>

16. Телеграмм-канал «Старше Эдды». [Электронный ресурс]. URL: <https://t.me/s/vysokygovorit>

17. Телеграмм-канал «Два майора». [Электронный ресурс]. URL: https://t.me/s/dva_majors

18. Телеграмм-канал «Colonelcassad». [Электронный ресурс]. URL: https://t.me/s/boris_rozhin

19. FLIR. Personal reconnaissance system. [Электронный ресурс]. URL: https://web.archive.org/web/20180811134413/https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/black-hornet-brochure_us.pdf

20. Цариченко С.Г., Антохин Е.А., Воронин Л.Л., Жданов С.С. Основные требования к комплексам с беспилотными летательными аппаратами, предназначенным для включения в состав боевой экипировки военнослужащих // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. Т. 9, № 4. С. 252-259.

21. Алексеева Н., Таран И. «Без риска потерь личного состава»: на что будут способны новые армейские беспилотники. Сайт канала RT. [Электронный ресурс]. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/603554-drony-razrabotki-oborona>

22. В России начата разработка микробеспилотника «Ратник» для экипировки. Сайт канала RT. [Электронный ресурс]. URL: <https://russian.rt.com/russia/news/603286-rosteh-bespilotnik-razrabotka>

23. Сайт журнала «Военное обозрение». [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/176258-jekipirovku-ratnik-dopolnjat-nano-bespilotnikom.html>

24. Сайт центра стратегических разработок в гражданской авиации. Материалы ООО «ДИАМ-АЭРО». [Электронный ресурс]. URL: https://aviacenter.org/f/razrabotka_i_proizvodstvo_mnogocelevyh_bespilotnyh_sistem.pdf

25. Профессиональная онлайн-платформа по подготовке специалистов беспилотной авиации. Материалы ООО «ДИАМ-АЭРО». [Электронный ресурс]. URL: <https://uavprof.com/wp-content/uploads/2021/04/КОНВЕРТОПЛАН.pdf>

26. Сайт ИА «Оружие России». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki-grazhdanskiy-konvertoplan-kompanii-aeromaks-proshyel-lyetnye-ispytaniya/>

27. Грачёв Ю.А., Соколов В.М., Мельников Н.М., Локтионов О.В. Применение перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легкого воздуха в органах внутренних дел // Научное обозрение в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 52-65.

28. Соколов В.М., Кежов А.А., Нишанбаев Ж.Т. Применение гибридного беспилотного летательного аппарата с переменной плавучестью в органах внутренних дел // Материалы межведомственной научно-практической конференции «Оперативно-розыскная деятельность в современных условиях» (Санкт-Петербург, 22-23 июня 2023 г.). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет МВД России, 2023. С. 167-173.

THE CONCEPT OF THE AERIAL COMPONENT OF A MULTISPECTRAL TACTICAL COVERT SURVEILLANCE COMPLEX OF INTERNAL AFFAIRS BODIES

SERGEI A. JASINSKII

St. Petersburg, Russia, yasinsky777@mail.ru

VIKTOR M. SOKOLOV

St. Petersburg, Russia, compas-tfc@mail.ru

ABSTRACT

Introduction: The emergence of modern unmanned aerial vehicles belonging to the class of microdrones and tiltrotor planes opens up wide opportunities for their use as a tool for conducting covert surveillance in various operational conditions. An analysis of known sources has shown that currently, for conducting surveillance in the internal affairs bodies, disparate unmanned complexes are used, which do not form a single integrated multi-purpose system and do not provide covert surveillance in the near zone, usually belonging to aircraft and multirotor type aircraft. Such an approach does not allow for continuous covert surveillance of an object of operational interest. **Purpose:** development of the concept of the aerial component of a multispectral tactical complex of covert surveillance of internal affairs bodies, which allows to organize continuous covert surveillance of both moving and stationary objects, including those located indoors in the near obser-

KEYWORDS: Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, internal affairs bodies, tactical complex of covert aerial surveillance, Black Hornet 3, microdron, tiltrotor.

vation zone. **Results:** The concept of the aerial component of a multispectral tactical covert surveillance complex for internal affairs bodies has been developed, which includes a complex of low-visibility short-range tactical complex based on helicopter-type microdrones and unmanned medium and long-range systems based on tiltrotor planes. The FLIR Black Hornet 3 microdrones act as an unobtrusive tactical covert surveillance complex in the near zone, and the DIAM 6 and DIAM 20K tiltrotor planes will ensure continuous covert surveillance in the middle and far zone in conditions of intensive object movement.

Discussion: To coordinate surveillance in the far zone, as well as to reserve technical means in order to ensure continuous monitoring of the object, the aerial component of the multispectral tactical covert surveillance complex can be situationally integrated into the information contour of a multifunctional echeloned air complex based on lighter-than-air aircraft.

REFERENCES

1. Yu.V. Malov, S.A. Fokin, "The possibilities of using UAVs in solving operational tasks of the Ministry of Internal Affairs of Russia," *Activities of operational units: theory and practice: Materials of the interuniversity scientific and practical conference*. Leningrad region: St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2022, pp. 102-106. (In Rus)

2. G.P. Dremlyuga, G.A. Mazulin, "Micro-unmanned aerial vehicles (micro UAVs)," *Problemy razvitiya korabel'nogo vooruzheniya i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniya*. 2018. No. 1(14), pp. 46-55. (In Rus)

3. K.S. Polyaniin, V.S. Gordienko, "Remote-piloted spies," *Alleja Nauki*. 2017. Vol. 2. No. 12, pp. 248-255. (In Rus)

4. V.A. Shudrya, B.V. Satin, Yu.I. Prus, S.V. Stepanov, "Specifics of application of ultra-light unmanned aircraft systems in the armed conflict in Syria," *Nauchnyj rezerv*. 2020. No. 1(9), pp. 8-17. (In Rus)

5. K.V. Novak, V.S. Oleshko, I.O. Starikova, M.S. Toforov, "Analysis of complexes with unmanned aerial vehicles used by special operations forces of the United States of America," *Proceedings of MAI*. 2017. No. 94, pp. 5. (In Rus)

6. A.D. Ananyev, "Miniature recovery UAV Black Hornet," *Aktual'nye issledovaniya*. 2021. No.23 (50), pp. 17-19. [electronic resource]. URL: <https://apni.ru/article/2568-miniaturnyj-razvedivatelnyj-bpla-black-horne> (In Rus)

7. PD-100 Black Hornet Nano unmanned aerial vehicle. The website of the online magazine "MILITARY REVIEW". [electronic resource]. URL: <https://topwar.ru/63016-bespilotnyj-letatelnyj-apparat-pd-100-black-hornet-nano-velikobritaniya.html> (In Rus)

8. Teledyne FLIR Defense postavit 1000 komplektov BLA "Bljek

Hornet 3" VS Ukrainy [Teledyne FLIR Defense will supply 1000 sets of Black Hornet 3 UAVs to the Armed Forces of Ukraine]. *Centr analiza mirovoj trgovli oruzhiem (CAMTO)*. [Centre for Analysis of World Arms Trade (CAWAT)]. [electronic resource]. URL: <https://armstrade.org/pages/main/about/index.shtml> (In Rus)

9. Army Technology website Verdict Media Limited 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/#catfish> (In Eng)

10. Website of the online magazine about drones DronoMania.ru. [Electronic resource]. URL: https://dronomania.ru/professionalnye/flir-black-hornet-prs.html?utm_referrer=https://ru.wikipedia.org/ (In Rus)

11. Wikipedia. [electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Black_Hornet_Nano#cite_note-13 (In Rus)

12. Wikipedia. [electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_Hornet_Nano (In Rus)

13. S.V. Gubanov, "Application of Mini Unmanned Aerial Vehicles in the Unified Tactical Control System," *Voennaja mysl'*. 2023. No. 7, pp. 72-80 (In Rus)

14. S. Valchenko, "The Russian special forces took as a trophy a unique complex with mini-drones," *Electronic periodical "MK.ru"*. [Electronic resource]. URL: <https://www.mk.ru/politics/2023/06/10/rossijskiy-specnaz-vzjal-v-kachestve-trofeya-unikalnyj-kompleks-s-minidronami.html> (In Rus)

15. A Valagin, "A miniature Black Hornet reconnaissance helicopter was captured near the borders of the Belgorod region," *The Internet portal of Rossiyskaya Gazeta*. [electronic resource]. URL: <https://rg.ru/2023/06/07/reg-cfo/u-granic-belgorodskoj-oblasti-zahvachen-miniaturnyj-vertolet-razvedchik.html> (In Rus)

16. Telegram channel "Older than Edda". [electronic resource].



URL: <https://t.me/s/vysokygovorit> (In Rus)

17. Telegramm-kanal "Dva majora". Telegram channel "Two majors". [electronic resource]. URL: https://t.me/s/dva_majors (In Rus)

18. Telegram channel "Colonelcassad". [electronic resource]. URL: https://t.me/s/boris_rozhin (In Rus)

19. FLIR. Personal reconnaissance system. [electronic resource]. URL: https://web.archive.org/web/20180811134413/https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/black-hornet-brochure_us.pdf (In Eng)

20. S.G. Tsarichenko, E.A. Antokhin, L.L. Voronin, S.S. Zhdanov, "Basic requirements for complexes with unmanned aerial vehicles intended for inclusion in the combat equipment of military personnel," *Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika*. 2021. Vol. 9., No. 4, pp. 252-259. (In Rus)

21. N. Alekseeva, I. Taran, "Without the risk of personnel losses": what the new army drones will be capable of," The website of the RT channel. [electronic resource]. URL: <https://russian.rt.com/russia/article/603554-drony-razrabotki-oborona> (In Rus)

22. "In Russia, the development of a micro-drone "Ratnik" for equipment has begun," The website of the RT channel. [electronic resource]. URL: <https://russian.rt.com/russia/news/603286-rosteh-besipilotnik-razrabotka> (In Rus)

23. The website of the magazine "Military Review". [electronic resource]. URL: <https://topwar.ru/176258-jekipirovku-ratnik-dopolnjat-nano-besipilotnikom.html> (In Rus)

24. Website of the Center for Strategic Developments in Civil Aviation. Materials of DIAM-AERO LLC. [electronic resource]. URL: https://aviacenter.org/f/razrabotka_i_proizvodstvo_mnogocelevyh_besipilotnyh_sistem.pdf (In Rus)

25. A professional online platform for training unmanned aviation specialists. Materials of DIAM-AERO LLC. [electronic resource]. URL: <https://uavprof.com/wp-content/uploads/2021/04/KOHBEPTOПЛАН.pdf> (In Rus)

26. The website of the news agency "Weapons of Russia". [electronic resource]. URL: <https://www.arms-expo.ru/news/novye-razrabotki/grazhdanskiy-konvertoplan-kompanii-aeromaks-proshyelyetnye-ispytaniya/> (In Rus)

27. Yu.A. Grachev, V.M. Sokolov, N.M. Melnikov, O.V. Loktionov, "The use of advanced multifunctional echeloned aerial complex based on lighter than air aircrafts in the work of internal affairs bodies," *High tech in earth space research*. 2022. Vol. 14. No. 2, pp. 52-65. (In Rus)

28. V.M. Sokolov, A.A. Kezhov, Zh.T. Nishanbaev, "The use of a hybrid unmanned aerial vehicle with variable buoyancy in internal affairs bodies," Proceedings of the interdepartmental scientific and practical conference "Operational investigative activities in modern conditions". (St. Petersburg, June 22-23, 2023). St. Petersburg: St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs Russia, 2023, pp. 167-173 (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Sergei A. Jasinskii, PhD, Docent, Lead specialist of JSC "Institute of Telecommunications", St. Petersburg, Russia

Viktor M. Sokolov, PhD, Associate Professor at the Department of Information Security at St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, Russia

For citation: Jasinskii S.A., Sokolov V.M. The concept of the aerial component of a multispectral tactical covert surveillance complex of internal affairs bodies. *H&ES Reserch*. 2024. Vol. 16. No 2. P. 51-59. doi: 10.36724/2409-5419-2024-16-2-51-59 (In Rus)

Звуковые технологии на страже порядка и безопасности.

Оповещение на решениях от компании ОТЗВУК.

Типовая точка оповещения объектовой системы оповещения.

- Соответствует ГОСТ Р 42.3.01-2021;
- интерфейс приема звуковых программ: Ethernet, аналоговый;
- номинальная выходная мощность—200/300/400/500/600 Вт;
- электропитание ~220В;
- ИБП;
- шкаф 9 U.



Таксофонная точка оповещения.

трансляционный усилитель (мощность 200 Вт, с питанием от аккумуляторов, аналоговый вход);
аккумуляторы, антивандальный шкаф;
наружные громкоговорители 50/100 Вт;
блок АТС с IP интерфейсом, (устанавливаемый на АТС для сопряжения с управляющими станциями оповещения верхнего уровня и таксофоном).

Переносной автономный усилительный комплекс – ПАУК

интерфейс приема звуковых программ: микрофон, SD-карта, аналоговый;
номинальная выходная мощность—150 Вт;
электропитание встроенная АКБ 12В;
время работы от батареи – 8 часов (речь);
разборчивость речи на удалении до 1 км



Компетенции компании.

Компания ОТЗВУК является разработчиком и производителем оборудования семейства «ОТЗВУК» позволяющего транслировать программы оповещения, звукового вещания, по магистральным сетям передачи данных (Eth/SDH) до точки и далее по проводным сетям до оконечных громкоговорителей;

- оказывает услуги по поддержке и послегарантийному сопровождению произведенного оборудования;
- выполняет работы по НИОКР в соответствии с техническими заданиями в сфере звукового вещания и сопряжением локальных, ведомственных и объектовых систем оповещения с другими видами оборудования;
- программное обеспечение собственной разработки ПАК АСУ «ОТЗВУК» позволяет осуществлять мониторинг, контроль и управление сетями цифрового оповещения, радиовещания, а также управлять устройствами сторонних производителей. Работа в ПАК АСУ отлично масштабируется от одного узла до управления сетями оповещения и вещания масштаба мегаполиса;
- проектирование ЛСО, слаботочных систем в зданиях и сооружениях.

Оборудование точек оповещения:

Пульт – ПАК АСУ «ОТЗВУК»



Средство речевого оповещения **«ОТЗВУК – СРО»**

- интерфейс приема звуковых программ: Ethernet, микрофон (аналоговый);
- номинальная выходная мощность – 200/400/500/600 Вт;
- электропитание ~220В;
- ИБП встроен;
- шкаф 19 U.



Переносной автономный усилительный комплекс **«ОТЗВУК – ПАУК»**

- интерфейс : микрофон, SD-карта;
- номинальная выходная мощность–210 Вт;
- время работы от батареи – 7 часов (речь);
- разборчивость речи на удалении 1 км;
- зарядка +24, ~220В; - переносной вес – 16 кг;

ПАУК

Переносной Автономный Усилительный Комплекс

Разработан для решения задач по оповещению.

Предназначен для передачи речевых сообщений и звуковых сигналов на расстояние до 1000 метров.



ПАУК устанавливается на:

любой технике

позициях подразделений

блокпостах

зданиях (сооружениях)

Применение изделия ПАУК:

➤ Оповещение гражданского населения:

- Об организации гуманитарных коридоров
- Местах выдачи гуманитарной помощи
- Окончании боевых действий
- Выходе из убежищ и т.п.

➤ Доведение звуковых сообщений до противника, как на открытой местности, так и находящихся в укрепленных районах и домах;

➤ Подача установленных (специальных) сигналов управления;

➤ Доведение информации агитационного характера диверсионно-разведывательных групп

➤ Обнаружение мест укрытия снайперов и минометных расчетов;

➤ Озвучивание мероприятий массового характера

ПАУК необходим для:

- 1 передовых подразделений
- 2 специальных подразделений
- 3 личного состава на блокпостах
- 4 военно-гражданских администраций



СЛЫШИМОСТЬ ПОДТВЕРЖДЕНА ИСПЫТАНИЯМИ:

↔ 1000 м

при благоприятных условиях

↔ 500 м

в условиях повышенной шумности


ТТХ ПАУК:

 **2 мин**
время установки на машину

 **16 кг**
масса комплекта

 **210 ватт**
мощность акустических систем

 **до 1000 м**
слышимость сообщений

 **12 вольт**
источник питания АКБ
7 часов автономной работы

НАДЁЖНОСТЬ ИСПОЛНЕНИЯ:

- противоударный корпус
- пылевлагозащищенное исполнение
- отечественные детали
- качественные комплектующие

Комплект поставки:

- усилительный блок с АКБ
- блок акустических систем
- пульт управления
- микрофон
- диктофон
- карта памяти
- соединительные кабели
- комплект креплений



#СвоихНеБросаем



8 (812) 718-19-01



mail@otzvuk.spb.ru

192029, г. Санкт-Петербург,
Большой Смоленский пр., д.
10, литер А, офис 400

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ-2024

С 23 по 26 апреля в ЦВК "Экспоцентр" состоялась "Российская неделя высоких технологий-2024" (РНВТ) – крупнейшая в России бизнес-площадка для общения профессионалов, нахождения поставщиков и новых каналов сбыта, для выработки новых решений и определения трендов развития информационных технологий и телекоммуникаций.

В Неделю вошли выставочные проекты "Экспоцентра": международная выставка информационных и коммуникационных технологий "Связь-2024", экспозиция "Навигационные системы, технологии и услуги" "Навитех-2024", международная экспозиция потребительской электроники ICEE и мероприятия деловой программы.

Масштабы "Российской недели высоких технологий" значительно выросли как по объему площадей, занятых экспонентами, так и по количеству участников – сегодня представлено почти 700 компаний, 250 из которых участвуют впервые. Также возвратились некоторые иностранные вендоры, что говорит о том, что РНВТ – самая перспективная площадка по новым технологиям.

В церемонии официального открытия РНВТ приняли участие заместитель председателя Комитета Государственной Думы Федерального Собрания РФ по науке и высшему образованию Владимир Кононов, заместитель министра промышленности и торговли РФ Василий Шлак, заместитель министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ Александр Шойтов, вице-президент Торгово-промышленной палаты РФ Вадим Чубаров, генеральный директор АО "Экспоцентр" Максим Фатеев, генеральный директор Регионального содружества в области связи Алексей Бородин, вице-президент по информационным и коммуникационным технологиям Центра прогресса и развития при Президенте Исламской Республики Иран г-н Махди Калантар.

Почетные гости отметили, что создание современной информационной среды – одно из ключевых направлений деятельности правительства, поскольку позволяет в сочетании с высоким интеллектом и научным потенциалом создавать основу для крупных системных преобразований российской экономики и успешного прорыва страны на новый технологический уровень. РНВТ, безусловно, содействует развитию научных и технологических достижений и внедрению их в реальные сектора экономики.

Ключевым событием "Российской недели высоких технологий" стала международная выставка "**Связь-2024**", а также представленная экспозиция навигационных систем, технологий и услуг "**Навитех-2024**".

Тематика выставки рассчитана на широкий круг участников – от студентов и специалистов в области высоких технологий до представителей бизнес-сообщества.

Посетители выставки ознакомились с телекоммуникационным оборудованием и решениями в сфере сетевой инфраструктуры, услугами центров обработки данных, прикладным программным обеспечением, системами электропитания, решениями в области информационной безопасности, цифровой среды, мобильной, спутниковой, волоконно-оптической и радиосвязи, интернета вещей и искусственного интеллекта, цифровыми экосистемами и др.

Значимость выставки "Связь" подтверждает рост выставочной площади и участников в два с половиной раза по сравнению с прошлым годом. Передовые технологии в области связи, навигации и потребительской электроники представили 684 компании из 9 стран: России, Республики Беларусь, Ирана, Казахстана, Китая, Кипра, Республики Корея, Кубы, Сингапура.

С российскими достижениями на выставке ознакомили 217 компаний, в числе которых – "Ангстрем-Телеком", АНО "Координационный Центр Национального домена сети Интернет" RU.РФ, "Искра Технологии", "НАТЕКС", "САТЕЛ", ООО "Специальная Интеграция", ОАО "Супертел", НТЦ "Протей", Т-КОМ, Т8, АО "Уфанет", ООО "Фибо-Телеком", ООО "ФЛАТ", ООО "Элтекс Коммуникации" и др.

Специальная экспозиция "Центр образования и науки" озна-

комила с образовательными программами и технологическими достижениями восьми российских вузов.

Достижения развития спутниковой навигации, инновационные решения в области транспортной телематики, оборудование и специализированное программное обеспечение, телематические платформы, картографические приложения продемонстрировали разработчики, ведущие интеграторы и крупные конечные пользователи в рамках специализированной экспозиции навигационных систем, технологий и услуг "Навитех-2024".

Проведение выставки "Связь" оказало влияние на развитие инновационной экосистемы в регионах России, привлечение инвестиций в высокотехнологичные проекты и оказало поддержку молодым инженерам и научным работникам. За 4 дня работы выставку "Связь-2024" посетили 14 234 специалиста из 40 стран и 82 регионов России. В рамках деловой программы состоялось более 30 мероприятий с участием 200 спикеров и более 3000 делегатов.

Важным событием стал **форум "Связь"**, организованный АО "Экспоцентр" при поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, Комитета Государственной Думы ФС РФ по науке и высшему образованию и РБК. Особое внимание было уделено внедрению российских прогрессивных телекоммуникационных технологий и искусственного интеллекта при реализации региональных проектов на примере реализованных решений в Москве и Московской области. Обсуждались вопросы международного сотрудничества в области ИКТ.

Развитию высокоавтоматизированного транспорта, автомобильным цифровым сервисам и транспортно-логистическим услугам был посвящен **Международный форум "Автонет-2024"**. Его организатором выступила Некоммерческая организация "Ассоциация ГЛОНАСС/ГНСС-Форум" в партнерстве с АО "Экспоцентр".

В рамках деловой программы "Российской недели высоких технологий-2024" прошел **форум "Российский софт: эффективные решения для экономики данных"**. Организаторами мероприятия выступили "Экспоцентр", Минцифры России, Министерство обороны РФ, Комитет Государственной Думы РФ по науке и высшему образованию, Центр компетенций по импортозамещению в сфере ИКТ и Ассоциация разработчиков программных продуктов "Отечественный софт".

На выставке "Связь" прошел Всероссийский день интернета вещей (**IoT&IIoT World day, Russia**), организованный Ассоциацией интернета вещей при поддержке АНО "Цифровая экономика" и Минпромторга РФ. Эксперты в области интернета вещей ознакомили слушателей с перспективами создания отечественного программного обеспечения и структурой, созданной совместно с госструктурами для реализации дорожной карты по развитию отрасли, обсудили состояния рынка IoT&IIoT и реалии импортозамещения, сплав науки и техники, новости IoT-внедрений. Представители ведущих компаний интернета вещей в России презентовали новые платформы, продукты и решения и обсудили успехи и сложности их внедрения.

Значимым событием "РНВТ" стал **XVII Международный Навигационный форум**. Организаторы – Некоммерческая организация "Ассоциация ГЛОНАСС/ГНСС-Форум" в партнерстве с АО "Экспоцентр". Форум проходил в тесном сотрудничестве с АО "Навитех-2024". Участники форума обсудили новые технологии и услуги в развитии навигационной сферы, проблемы отрасли и их решения, изменения в нормативной правовой базе и вопросы технического регулирования, реализацию стратегических инициатив в области цифровизации экономики.

Завершил деловую программу РНВТ XXVIII Международный форум Международной академии связи "Цифровая трансформация. Связь будущего", организованный АО "Экспоцентр" и Международной академией связи.

Выставка "Связь-2025" пройдет с 22 по 25 апреля 2025 г. в ЦВК "Экспоцентр" в рамках "Российской недели высоких технологий-2025".