

## 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](http://www.hes.ru) и библиотеке [elibrary.ru](http://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](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru).

С требованиями можно ознакомиться на сайте: [www.H-ES.ru](http://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", 2023

**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](http://www.hes.ru) and [elibrary.ru](http://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](mailto:HT-ESResearch@yandex.ru).

The requirements are available on the website: [www.H-ES.ru](http://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, 2023



**Учредитель:**

ООО "ИД Медиа Пабlishер"

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Мажник И.В.**

Характеристики излучения антенны космических аппаратов

4

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Ясинский С.А., Романенко П.Г., Зюзин А.Н.**

Моделирование радиально-многокольцевой типовой структуры телекоммуникационной сети методом стягивания узлов связи

11

**Степанова И.В., Патенченкова Е.В., Кнаж Нума.**

Оценка факторов влияния на пропускную способность сетей пакетной коммутации

18

**Куделя В.М.**

Методы перечисления путей в графе

28

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Суворова Е.А., Чумакова Н.Ю.**

Методы оценки времени распространения широкоэмиттерных сообщений в сетях Spacefibre в условиях сбоев и отказов с различными вариантами пространственного резервирования

39

**Искандеров Ю.М., Смоленцев С.В.,**

**Буцанец А.А., Паутов М.Д.**

Акторно-сетевое моделирование мультимодальных логистических процессов

57

**Шелухин О.И., Ванюшина А.В.**

Сравнительный анализ методов обнаружения нежелательных сетевых приложений в потоковом режиме для обеспечения информационной безопасности

68

# CONTENTS

## AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

**Mazhnik I.V.**

Spacecraft antenna radiation characteristics

4

## RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

**Jasinskii S.A., Romanenko P.G., Zyuzin A.N.**

Modeling of a radial-multi-ring typical structure of a telecommunication network by the method of tightening communication nodes

11

**Stepanova I.V., Patenchenkova E.K., Knazh Numa.**

Influence factors on the packet switching networks capacity

18

**Kudelya V.N.**

Methods for enumerating paths in a graph

28

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

**Suvorova E.A., Chumakova N.Yu.**

Methods for estimating the propagation time of broadcast messages in Spacefibre networks under failure and faults with various spatial redundancy types

39

**Iskanderov Y.M., Smolentsev S.V.,  
Butsanets A.A., Pautov M.D.**

Comparison of classification algorithms performance within network infrastructure

57

**Sheluhin O.I., Vanyushina A.V.**

Comparative analysis of detecting methods unwanted network applications in streaming mode to ensure information security

68

### 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;

**KIRPANEEV 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: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-4-10

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

МАЖНИК

Илья Валерьевич <sup>1</sup>

### АННОТАЦИЯ

**Введение:** В условиях гиперзвукового полета космического аппарата в плотных слоях атмосферы связь прерывается. Разогрев воздуха вокруг аппарата, вследствие большой скорости, приводит к образованию плазменной оболочки, параметры которой резко изменяются по траектории полета. Максимальная температура на поверхности космического аппарата может достигать 6000 градусов Кельвина. Для защиты бортовой антенны от нагрева используют теплозащитный радиопрозрачный материал. Из-за температурного изменения электрических характеристик теплозащиты, и наличия слоя плазмы, ухудшается распространение радиоволн. **Цель работы:** Определение радиотехнических характеристик бортовых антенн возвращаемых космических аппаратов, с воздействием нагрева на теплозащиту антенны и воздействию плазменного образования, на основании разработанной математической модели антенны с теплозащитой, учитывающую условия эксплуатации. **Методы:** Из известных аналитических методов решения возможно применение метода интегральных преобразований и метода собственных функций. Оба эти метода и использованы в работе. При этом использовано предположение, что электрические параметры диэлектрической пластины (теплозащиты) и геометрические размеры не зависят от времени. **Результаты:** Получены соотношения, описывающие диаграмму направленности прямоугольного волновода с диэлектрической теплозащитой и слоем плазмы, учитывающие их электрические параметры и толщину. Представлены уравнения, описывающие граничные условия электродинамической модели. Проведен расчет с целью определения влияния изменения толщины и электрических параметров теплозащиты и слоя плазмы на коэффициент полезного действия и диаграмму излучения. Результаты показали, что параметры плазменной оболочки может видоизменить диаграмму направленности и повлиять на КПД бортовой антенны. **Практическая значимость:** Разработка математической модели основных радиотехнических характеристик бортовых антенн, с учетом воздействия высокотемпературного аэродинамического нагрева и слоя плазмы, а также результаты численных расчетов, могут быть применены при разработке рекомендаций выбора теплозащиты и рекомендации расположения бортовых антенн на космических аппаратах.

### Сведения об авторе:

<sup>1</sup> аспирант, ассистент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** космический аппарат, бортовая антенна, прямоугольный волновод, однородная теплозащита, полетная плазма, коэффициент полезного действия

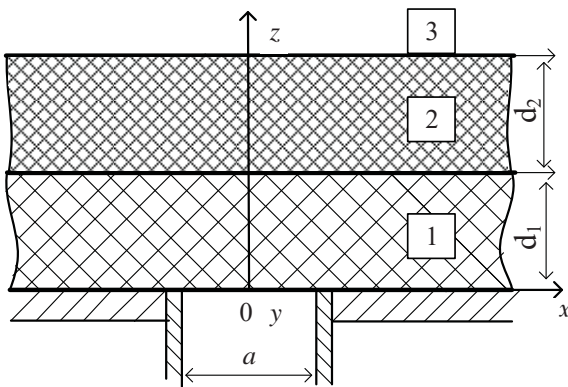
**Для цитирования:** Мажник И.В. Характеристики излучения антенны космических аппаратов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 4–10. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-4-10

## Введение

На траектории спуска космического аппарата радиосвязь прерывается. Это связано с тем, что в условиях гиперзвукового полета в плотных слоях атмосферы образующая вокруг аппарата ударная волна порождает высокотемпературный нагрев. Разогрев воздуха, окружающего КА, приводит к термической ионизации воздуха за фронтом ударной волны, т.е. образованию плазменной оболочки, параметры которой резко изменяются по траектории полета [1-7]. Для защиты от нагрева бортовая антенна закрывается нагревостойкой радиопрозрачной теплозащитой [8-10]. Расчет совместного влияния теплозащитного диэлектрика и плазмы на характеристики антенн позволяет обеспечить условия прохождения электромагнитных волн с минимальными потерями энергии и уменьшить период потери радиосвязи с КА. Решение этой задачи невозможно без проведения математического моделирования.

## Методы и результаты исследований

Бортовые антенны летательных аппаратов являются слабонаправленными, что достигается излучением из открытого конца волновода [11-13]. Опишем электродинамическую модель изображенную на рисунке 1. Имеется излучающий раскрыв антенны, расположенный на бесконечном экране, перед которым находится диэлектрический слой толщиной  $d_1$  с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{a1}(x,y,z)$ , за ним слой толщиной  $d_2$  с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{a2}(x,y,z)$ . Бесконечный экран соответствует металлическому корпусу КА, первый слой эквивалентен твердому диэлектрическому слою теплозащиты, второй плазменной оболочке. Расчет совместного влияния теплозащитного диэлектрика и плазмы на характеристики антенн сводится к решению задачи излучения апертуры через двухслойную структуру с параметрами диэлектрика [14].



**Рис. 1.** Электродинамическая модель бортовой антенны:  
 $d_1$  – толщина однородного слоя теплозащиты;  $d_2$  – толщина однородного расплавленного слоя или плазменной оболочки;  
 $a$  – размер широкой стенки волновода;  $x, y, z$  – декартовы координаты; 1 – область, занимаемая диэлектрической защитой;  
2 – область расплавленного слоя или плазменная оболочка,  
3 – свободное пространство

Магнитная составляющая электромагнитного поля в декартовой системе координат  $x, y, z$  удовлетворяет следующему волновому уравнению [15]

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon_a H_x = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon_a H_y = 0, \quad (2)$$

где  $k$  – волновое число,  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, которая имеет вид:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 (\varepsilon'_1 - j\varepsilon''_1), \quad \text{tg } \delta = \varepsilon''_1 / \varepsilon'_1,$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon'_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость, которая принимает следующие обозначения

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon'_2, & \text{при } d_1 \leq z \leq d_2, \\ \varepsilon'_1, & \text{при } 0 \leq z \leq d_1, \\ 1, & \text{при } z > (d_1 + d_2). \end{cases}$$

Диэлектрические параметры слоя плазмы, где нет магнитного поля в плазме ( $\mu = 1$ ) и внешнее электромагнитное поле имеет малую напряженность, определяется следующим выражением:

$$\varepsilon'_2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}, \quad \varepsilon''_2 = \frac{\omega_p^2 \nu / \omega}{\omega^2 + \nu^2}.$$

В дальнейшем  $\varepsilon'_1$  и  $\varepsilon'_2$  будем обозначать, как  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

В области плазменного слоя происходит затухание и отражение. Количественно эти явления зависят от частоты соударения электронов  $\nu$ , угловой частоты  $\omega$  и угловой плазменной частоты электронов в плазме  $\omega_p$  следующим образом:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m}},$$

где  $N_e$  – концентрация электронов,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона.

Приближенное значение  $\nu$ , учитывающее постоянную величину эффективного поперечного сечения для данного вида частиц ( $Q_i$ ), определяется следующим образом:

$$\nu = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \sum_i N_{\rho_i} Q_i,$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $N_{\rho_i}$  – концентрация  $i$ -го вида частиц.

Представим составляющие электромагнитного поля в виде углового спектра плоских волн, для чего применим прямое преобразование Фурье [16].

$$\hat{H}_x = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_x(x, y, z) \exp(-j(k_x x + k_y y + k_z z)) dx dy, \quad (3)$$

$$\hat{H}_y = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_y(x, y, z) \exp(-j(k_x x + k_y y + k_z z)) dx dy. \quad (4)$$

где  $k_x$ ,  $k_y$  – проекция волнового числа на ось  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

С учетом (3), (4) и уравнения (1), (2) перепишем в виде

$$\frac{d^2 \hat{H}_x}{dz^2} + (k^2 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_y^2) \hat{H}_x = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 \hat{H}_y}{dz^2} + (k^2 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_y^2) \hat{H}_y = 0. \quad (6)$$

Решение уравнений (5) и (6) для области 1 ( $0 \leq z \leq d_1$ )

имеет вид

$$\hat{H}_x^{(1)} = A \cdot \exp(-jk_z z) + B \cdot \exp(jk_z z),$$

$$\hat{H}_y^{(1)} = L \cdot \exp(-jk_z z) + M \cdot \exp(jk_z z),$$

для области 2 ( $d_1 \leq z \leq d_2$ )

$$\hat{H}_x^{(2)} = C \cdot \exp(-jk_z z) + D \cdot \exp(jk_z z),$$

$$\hat{H}_y^{(2)} = N \cdot \exp(-jk_z z) + O \cdot \exp(jk_z z),$$

для области 3 ( $z > (d_1 + d_2)$ )

$$\hat{H}_x^{(3)} = G \cdot \exp(-jk_z z), \quad (7)$$

$$\hat{H}_y^{(3)} = P \cdot \exp(-jk_z z), \quad (8)$$

Из уравнений Максвелла

$$E_x = -\frac{dH_y}{dz} / j\omega\varepsilon_0, \quad E_y = \frac{dH_x}{dz} / j\omega\varepsilon_0. \quad (9)$$

В результате получаем следующие уравнения

$$\hat{E}_x^{(1)} = -\frac{k_{z_1}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1} (L \cdot \exp(-jk_{z_1} z) - M \cdot \exp(jk_{z_1} z)),$$

$$\hat{E}_x^{(2)} = -\frac{k_{z_2}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_2} (N \cdot \exp(-jk_{z_2} z) - O \cdot \exp(jk_{z_2} z)),$$

$$\hat{E}_x^{(3)} = -\frac{k_z}{\omega\varepsilon_0} P \cdot \exp(-jk_z z),$$

$$\hat{E}_y^{(1)} = \frac{k_{z_1}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1} (A \cdot \exp(-jk_{z_1} z) - B \cdot \exp(jk_{z_1} z)),$$

$$\hat{E}_y^{(2)} = \frac{k_{z_2}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_2} (C \cdot \exp(-jk_{z_2} z) - D \cdot \exp(jk_{z_2} z)),$$

$$\hat{E}_y^{(3)} = \frac{k_z}{\omega\varepsilon_0} G \cdot \exp(-jk_z z).$$

Неизвестные константы интегрирования  $A, B, C, D, G, L, M, N, O, P$  определяются из граничных условий при  $z = 0$ ,  $z = d_1$  и  $z = d_2$ . Граничные условия при излучении из прямо-угольного волновода, определяются волнами типа  $H_{10}$ .

$$-\frac{k_{z_1}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1} (L - M) \Big|_{z=0} = 0; \quad \frac{k_{z_1}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1} (A - B) \Big|_{z=0} = \hat{E}_{y_0};$$

$$\begin{aligned} & (L \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) - M \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) \Big|_{z=d_1} = \\ & = \frac{\varepsilon_1 k_{z_2}}{k_{z_1} \varepsilon_2} (N \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - O \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)); \\ & (A \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) - B \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) \Big|_{z=d_1} = \\ & = \frac{\varepsilon_1 k_{z_2}}{k_{z_1} \varepsilon_2} (C \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - D \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)); \\ & -k_x k_y \left( (L \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) + M \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) \right) + \\ & + (k_1^2 - k_x^2) \cdot (A \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) + B \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) \Big|_{z=d_1} = \\ & = \varepsilon_1 \left( (k_2^2 - k_x^2) (C \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - D \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)) - \right. \\ & \left. -k_x k_y (N \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - O \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)) \right); \\ & (k_1^2 - k_y^2) (L \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) + M \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) - \\ & -k_x k_y \left( (A \cdot \exp(-jk_{z_1} d_1) + B \cdot \exp(jk_{z_1} d_1)) \right) \Big|_{z=d_1} = \\ & = \varepsilon_1 \left( (k_2^2 - k_y^2) (N \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - O \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)) - \right. \\ & \left. -k_x k_y (C \cdot \exp(-jk_{z_2} d_1) - D \cdot \exp(jk_{z_2} d_1)) \right); \\ & (N \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) - O \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \Big|_{z=d_1+d_2} = \\ & = \frac{\varepsilon_2 k_z}{k_{z_2}} P \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)); \\ & (N \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) - O \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \Big|_{z=d_1+d_2} = \\ & = \frac{\varepsilon_2 k_z}{k_{z_2}} P \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)); \\ & (C \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) - D \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \Big|_{z=d_1+d_2} = \\ & = \frac{\varepsilon_2 k_z}{k_{z_2}} G \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)); \\ & -k_x k_y \left( (N \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) + O \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \right) + \\ & + (k_2^2 - k_x^2) \cdot (C \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) + D \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \Big|_{z=d_1+d_2} = \\ & = \varepsilon_2 \left( (k^2 - k_x^2) G \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)) - k_x k_y P \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)) \right); \\ & (k_2^2 - k_y^2) (N \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) + O \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) - \\ & -k_x k_y \left( (C \cdot \exp(-jk_{z_2} (d_1 + d_2)) + D \cdot \exp(jk_{z_2} (d_1 + d_2))) \right) \Big|_{z=d_1+d_2} = \\ & = \varepsilon_2 \left( (k^2 - k_y^2) P \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)) - k_x k_y G \cdot \exp(-jk_z (d_1 + d_2)) \right). \end{aligned}$$

Выведем неизвестные константы интегрирования для поля  $E_y^{(1,2,3)}$

$$\begin{aligned} A = & \left( (-\varepsilon_2^2 k_2^2 (-k_2^2 + k_x^2 + k_y^2) k_{z_1}^2 - k_{z_2} \varepsilon_2 (k_1 - k_2) (k_1 + k_2) (k_y - k_x) \times \right. \\ & \times (k_y + k_x) k_{z_1} + k_{z_2}^2 k_1^2 (-k_1^2 + k_x^2 + k_y^2)) \times e^{-jk_{z_1} d_1} + (\varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} + k_1^2 k_{z_2}) \times \\ & \times (\varepsilon_2 (-k_2^2 + k_x^2 + k_y^2) k_{z_1} + k_{z_2} (-k_1^2 + k_x^2 + k_y^2)) e^{jk_{z_1} d_1} \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{y_0} e^{jk_{z_1} d_1} \omega \times \\ & \times \left( (k^2 - k_x^2 - k_y^2) k_{z_2} + k_z (k_2^2 - k_x^2 - k_y^2) \right) e^{2jk_{z_2} d_2} + \\ & + (-k^2 + k_x^2 + k_y^2) k_{z_2} + k_z (k_2^2 - k_x^2 - k_y^2) e^{-jk_z (d_1 + d_2) - 2jk_{z_2} d_2} \times \\ & \times \left( (k^2 k_{z_2} + k_2^2 k_z) e^{2jk_{z_2} d_2} - k^2 k_{z_2} + k_2^2 k_z \right) / k_{z_1} \Delta; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B = & \left( (-\left(\varepsilon_2 k_z^2 k_{z_1} - k_1^2 k_{z_2}\right) \left(\varepsilon_2 \left(-k_x^2 + k_x^2 + k_y\right) k_{z_1} - \right. \right. \\
 & \left. \left. -k_{z_2} \left(-k_1^2 + k_x^2 + k_y\right)\right) e^{-jk_{z_1} d_1} + \left(\varepsilon_2^2 k_z^2 \left(-k_x^2 + k_x^2 + k_y\right) k_{z_1}^2 - \right. \right. \\
 & \left. \left. -k_{z_2} \varepsilon_2 \left(k_1 - k_2\right) \left(k_1 + k_2\right) \left(k_y - k_x\right) \left(k_y + k_x\right) k_{z_1} - k_z^2 k_1^2 \times \right. \right. \\
 & \left. \left. -\left(-k_1^2 + k_x^2 + k_y\right)\right) \right) e^{jk_{z_1} d_1} \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{y_0} w e^{-jk_{z_1} d_1} \times \left( \left( \left( \left( k^2 - k_x^2 - k_y^2 \right) k_{z_2} + k_z \left( k^2 - k_x^2 - k_y^2 \right) \right) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times e^{2jk_{z_2} d_2} + \left(-k^2 + k_x^2 + k_y\right) k_{z_2} + k_z \left( k^2 - k_x^2 - k_y^2 \right) \right) \times \right. \\
 & \left. \times e^{-jk_z (d_1 + d_2) - 2jk_{z_2} d_2} \left( \left( k^2 k_{z_2} + k_z^2 k_z \right) e^{-2jk_{z_2} d_2} - k^2 k_{z_2} + k_z^2 k_z \right) / k_{z_1} \Delta; \right. \\
 G = & 4\omega E_{y_0} e^{-jk_{z_1} d_1} \varepsilon_0 e^{jk_{z_1} d_1} k_{z_2} e^{jk_{z_2} (d_1 + d_2)} e^{-jk_{z_2} (d_1 + d_2)} (e^{jk_{z_2} d_1} \times \\
 & \times (-\left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_2^2 + k^2 k_x^2 \right) \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) k_1^2 k_{z_2}^2 + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \times \\
 & \times k_2^2 \left( k_{z_1} \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_1^2 + k^2 k_x^2 \right) \varepsilon_2 + k_z k_1^2 \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) k_{z_2} - \\
 & -\left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} \left( \left( -k_1^2 + k_x^2 \right) k_2^2 + k_y k_1^2 \right) k_z) e^{-jk_{z_1} d_1} + \\
 & + (-\left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_2^2 + k^2 k_x^2 \right) \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) k_1^2 k_{z_2}^2 + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \times \\
 & \times k_2^2 \left( -k_{z_1} \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_1^2 + k^2 k_x^2 \right) \varepsilon_2 + k_z k_1^2 \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) k_{z_2} + \\
 & + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} \left( \left( -k_1^2 + k_x^2 \right) k_2^2 + k_y k_1^2 \right) k_z) e^{jk_{z_1} d_1} \times \\
 & \times e^{-jk_{z_2} (d_1 + d_2)} + \left( \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_2^2 + k^2 k_x^2 \right) \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) \times \right. \\
 & \times k_1^2 k_{z_2}^2 + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) k_2^2 \left( -k_{z_1} \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_1^2 + k^2 k_x^2 \right) \varepsilon_2 + \right. \\
 & + k_z k_1^2 \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) k_{z_2} - \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} - \\
 & -\left( \left( -k_1^2 + k_x^2 \right) k_2^2 + k_y k_1^2 \right) k_z) e^{-jk_{z_1} d_1} + e^{jk_{z_1} d_1} \times \\
 & \times \left( \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_2^2 + k^2 k_x^2 \right) \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) k_1^2 k_{z_2}^2 + \right. \\
 & + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) k_2^2 \left( k_{z_1} \left( \left( -k^2 + k_y^2 \right) k_1^2 + k^2 k_x^2 \right) \varepsilon_2 + \right. \\
 & + k_z k_1^2 \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) k_{z_2} + \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} \times \\
 & \times \left( \left( -k_1^2 + k_x^2 \right) k_2^2 + k_y k_1^2 \right) k_z) e^{-jk_{z_2} d_1} e^{jk_{z_2} (d_1 + d_2)} / \Delta. \\
 \Delta = & (e^{jk_{z_2} d_1} \left( \left( k^2 - k_x^2 - k_y \right) k_{z_2} + k_z \left( -k^2 + k_x^2 + k_y^2 \right) \right) e^{-jk_{z_2} (d_1 + d_2)} + \\
 & + e^{jk_{z_2} (d_1 + d_2)} \left( \left( -k^2 + k_x^2 + k_y \right) k_{z_2} + k_z \left( -k^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) e^{-jk_{z_2} d_1} e^{-jk_z (d_1 + d_2)} \\
 & \times (e^{jk_{z_2} d_1} \left( -k^2 k_{z_2} + k_z^2 k_z \right) e^{-jk_{z_2} (d_1 + d_2)} + e^{-jk_{z_2} d_1} e^{jk_{z_2} (d_1 + d_2)} \left( k^2 k_{z_2} + k_z^2 k_z \right)) \times \\
 & \times \left( \left( -\varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} + k_1^2 k_{z_2} \right) e^{-jk_{z_1} d_1} + e^{jk_{z_1} d_1} \left( \varepsilon_2 k_2^2 k_{z_1} + k_1^2 k_{z_2} \right) \right) \times \\
 & \times \left( \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) k_{z_2} - \varepsilon_2 k_{z_1} \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \right) e^{-jk_{z_1} d_1} + \\
 & + e^{jk_{z_1} d_1} \left( \left( -k_1^2 + k_x^2 + k_y \right) k_{z_2} + \varepsilon_2 k_{z_1} \left( -k_2^2 + k_x^2 + k_y \right) \right).
 \end{aligned}$$

Неизвестные константы интегрирования С и D не приводятся из-за их громоздкости. Неизвестные константы интегрирования определяются уравнениями из граничных условий, с использованием следующих замен переменных:

$$\begin{aligned}
 k_x &= \beta \cos \alpha, \quad k_y = \beta \sin \alpha, \quad k_z = \sqrt{k^2 - \beta^2}, \\
 k_{z_1} &= \sqrt{k^2 \varepsilon_1 - \beta^2}, \quad k_{z_2} = \sqrt{k^2 \varepsilon_2 - \beta^2}.
 \end{aligned}$$

Решение уравнения (9) при условии излучения ( $z \rightarrow \infty$ ), применяя обратное преобразование Фурье, переходя от спектрального представления к полю  $E$ , имеет вид

$$E_y^{(1,2,3)} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\Pi} F_y^{(1,2,3)}(x, y, z, x', y', 0) E_y(x', y', 0) dx' dy'. \quad (10)$$

Здесь  $\Pi$  – область интегрирования по раскрытию волновода,  $x', y'$  – координаты, отсчитываемые в раскрытии излучающего волновода, а подынтегральное выражение имеет вид

$$F_y^{(1)} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left( \frac{k_{z_1}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} (A \exp(-jk_{z_1} z) - B \exp(jk_{z_1} z)) \right) \times \quad (11)$$

$$\times \exp(-j\beta((x' - x) \cos \alpha + (y' - y) \sin \alpha)) \beta d\beta da,$$

$$F_y^{(2)} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left( \frac{k_{z_2}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_2} (C \exp(-jk_{z_2} z) - D \exp(jk_{z_2} z)) \right) \times \quad (12)$$

$$\times \exp(-j\beta((x' - x) \cos \alpha + (y' - y) \sin \alpha)) \beta d\beta da.$$

$$F_y^{(3)} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{k_z}{\omega \varepsilon_0} G \times \exp(-jk_z z) \times \exp[-j\beta((x' - x) \cos \alpha + \quad (13)$$

$$+ (y' - y) \sin \alpha) \beta d\beta da.$$

Составляющие электрического поля в раскрытии при  $z = 0$  для волны типа  $H_{10}$  имеют следующий вид:

$$E_y(x', y', 0) = -\frac{jZ_0 a k}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x'}{a}\right), \quad (14)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства.

Рассмотрим интеграл (11), (12) (13) по переменной интегрирования  $\beta$  в комплексной плоскости. Для вычисления этого интеграла методом перевала следует учесть, что при деформации контура интегрирования нужно обходить точки ветвления подынтегральной функции и что путь перевала пересекает полюса подынтегральной функции.

В общем случае в соответствии с теоремой Коши интеграл для функции  $F_y^{(3)}$  может быть представлена в следующем виде:

$$F = \frac{1}{4\pi^2} \left[ \int_l \dots d\beta + U(C_\varepsilon) \int_{l_\varepsilon} \dots d\beta + U(C_p) \int_{l_p} \dots d\beta \right], \quad (15)$$

где  $U(C_{\varepsilon, p})$  – единичная функция Хевисайда;  $C_\varepsilon, C_p$  – величины, определяемые на комплексной плоскости  $\beta$ :

$$C_{\varepsilon, p} = \operatorname{Re} \left( \arcsin \frac{\beta_{\varepsilon, p}}{k} \right) \pm \varphi - \arccos \left( \operatorname{sch} \operatorname{Im} \left( \arcsin \frac{\beta_{\varepsilon, p}}{k} \right) \right).$$

Первый интеграл по контуру  $l$  описывает диаграмму направленности и вычисляется методом перевала. Второго интеграла  $l_\varepsilon$  вычисляется по берегам разреза, при этом разрез целесообразно выбрать так, чтобы это была прямая, параллельная мнимой оси на комплексной плоскости  $\beta$ .

Условия существования поверхностных и вытекающих волн определяются из расположения полюсов подынтегральных функций  $F_y^{(3)}$  причем полюсы соответствуют равенству нулю знаменателей отмеченных выражений. Представляя знаменатель в виде множителей и проводя ряд преоб-

разований, учитывая, что  $Re(k_z) \geq 0$  тогда где  
 $j\epsilon_2\sqrt{k^2 - \beta^2} = \sqrt{\beta^2 - k^2}$  получим окончательно выражения для определения полюсов в виде следующих дисперсионных уравнений:

– для четн х Е мод

$$\epsilon_2\sqrt{\beta^2 - k^2} = \frac{\left(e^{2j\sqrt{k^2 - \beta^2}d_2} - 1\right)(\beta^2 - k^2)}{\sqrt{k^2\epsilon_2 - \beta^2}\left(e^{2j\sqrt{k^2 - \beta^2}d_2} + 1\right)}; \quad (16)$$

– для нечетных Н мод

$$\sqrt{\beta^2 - k^2} = -\frac{\sqrt{k^2\epsilon_2 - \beta^2}\left(e^{2j\sqrt{k^2 - \beta^2}d_2} - 1\right)}{\left(e^{2j\sqrt{k^2 - \beta^2}d_2} + 1\right)}. \quad (17)$$

По теореме Коши интеграл (15) по контуру  $l_p$  определится суммой вычетов:

$$\int_{l_p} \dots d\beta = \sum_{i=1}^n \text{Re } s(\beta_i), \quad (18)$$

где  $\beta_i$  – корни уравнений (16) и (17).

Для дифференциации особых точек на полюсы, определяющие поверхностные и вытекающие волны, целесообразно перейти с комплексной плоскости  $\beta$  на плоскость комплексного угла  $\beta = k \sin \tau$ , где  $\tau = \tau_r + j\tau_j$ , а индексы  $r$  и  $j$  обозначают реальную и мнимую часть. Поверхностная волна будет иметь место при

$$\tau_r = \pi/2; \tau_j > 0.$$

Вытекающие волны находятся в следующей области комплексных углов:  $0 < \tau_r < \pi$ , кроме  $\tau_r = \pi/2$ ;  $\tau_j > 0$ . При этом область  $0 < \tau_r < \pi$ , определяет обратную волну, не удовлетворяющую условиям излучения на бесконечности.

Поверхностные волны могут изменить вид диаграммы направленности и при определенных условиях могут поглощать в себя большую часть подводимой мощности.

Излучаемая мощность для дальней зоны может быть рассчитана по следующему выражению

$$P_{\text{изл}} = \frac{1}{2Z_0} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \left(|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2\right) r^2 \sin \theta d\theta d\phi, \quad (19)$$

где

$$E_\theta = E_x \cos \theta \cos \varphi + E_y \cos \theta \sin \varphi - E_z \sin \theta,$$

$$E_\phi = E_y \cos \varphi - E_x \sin \varphi, E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 Z_0} \frac{\partial E_x}{\partial x},$$

$$r = \sqrt{z^2 + (x' - x)^2 + (y' - y)^2}.$$

Для прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  имеем

$$P_{\text{пад}} = Z_0 H_0^2 \frac{ba^3}{\lambda^2} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}, \quad (20)$$

где  $H_0$  – амплитуда, определяемая мощностью источника поля.

КПД исследуемой антенны определяется уравнениями (7) и (8), и рассчитывается как

$$\eta = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{пад}}}.$$

Для расчёта диаграммы излучения и КПД по (10) совместно с (13) и (14) была разработана программа на языке программирования python. Расчет по разработанной математической модели диаграммы направленности и КПД бортовых антенн базируется на известных температурных зависимостях теплозащиты и плазмы. Температурные зависимости определяются видом теплозащиты антенны, а значение температуры траекторией полета [17,18,19,20]. Параметры плазмы также определяются траекторией полета.

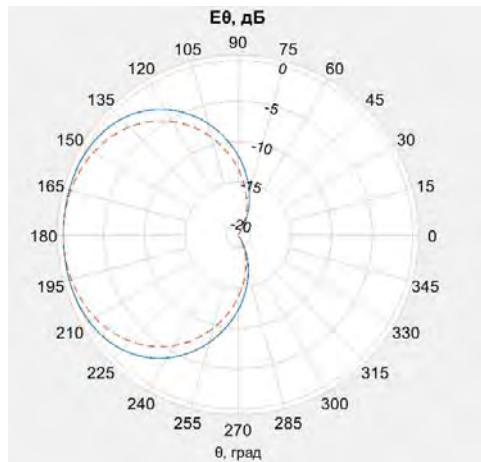
Для расчета диаграммы излучения возьмем длину волны равную 3.2 см. На рисунке 3 и 4 изображены диаграммы направленности, будем считать, что интенсивного нагрева теплозащиты нет, и характеристики материала теплозащиты нитрида бора не изменяются, и равны  $\epsilon_1 = 4.2$ ,  $\text{tg}\delta = 0.0001$ . На рисунке 3 показана диаграмма излучения прямоугольного волновода в носовой части аппарата, характеристики плазмы равны: (—) -  $\epsilon'_2 = 0.99$ ,  $\epsilon''_2 = 10^{-6}$ , (— — —) -  $\epsilon'_2 = 0.905$ ,  $\epsilon''_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ . На рисунке 4 показана диаграмма излучения прямоугольного волновода на боковой поверхности аппарата, характеристики плазмы равны: (—) -  $\epsilon'_2 = 1$ ,  $\epsilon''_2 = 0$ , (— — —) -  $\epsilon'_2 = 0.905$ ,  $\epsilon''_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ .

Для расчета КПД будем считать, что бортовая антенна находится в носовой части космического аппарата и толщина слоя плазмы будет равна  $d_2 = 5$  см (табл. 1).

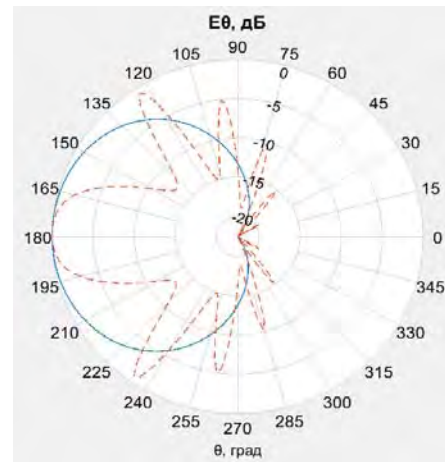
Таблица 1

КПД бортовой антенны с теплозащитой и слоем плазмы

Концентрация электронов $\text{см}^{-3}$ , частота соударения электронов $\text{с}^{-1}$	$N_e = 8 \cdot 10^{11}$ , $\nu = 5,8 \cdot 10^{10}$	$N_e = 9,5 \cdot 10^{12}$ , $\nu = 7,7 \cdot 10^{10}$	$N_e = 5,8 \cdot 10^{13}$ , $\nu = 8,5 \cdot 10^{10}$	$N_e = 1,2 \cdot 10^{14}$ , $\nu = 9 \cdot 10^{10}$	$N_e = 3,3 \cdot 10^{14}$ , $\nu = 9,5 \cdot 10^{10}$
КПД, дБ	-4	-7,7	-26,5	-55,5	-130,8



**Рис. 3.** Нормированная диаграмма излучения прямоугольного волновода в носовой части аппарата с однородной теплозащитой  $d_1 = 5$  см, и толщиной слоя плазмы  $d_2 = 3$  см



**Рис. 4.** Нормированная диаграмма излучения прямоугольного волновода на боковой поверхности аппарата с однородной теплозащитой  $d_1 = 5$  см, и толщиной слоя плазмы  $d_2 = 30$  см

### Заключение

По результатам расчета радиотехнических характеристик бортовой антенны для условий аэродинамического нагрева можно разработать рекомендации по выбору теплозащиты, которая обеспечит наивысшую стабильность характеристик антенн в условиях эксплуатации и снизит чувствительность к воздействию высокотемпературного нагрева. Рассчитывая радиотехнические характеристики, с учетом параметров плазмы, можно разработать рекомендации по расположению антенны на КА.

### Литература

1. Liu Y., Li H., Li Y. et al. Transmission properties and physical mechanisms of X-ray communication for blackout mitigation during spacecraft reentry. 2017. Vol. 24. No. 11. P. 113507. DOI 10.1063/1.4998786.
2. Liu Z., Bao W., Li X. et al. Influence of plasma pressure fluctuation on RF wave propagation // Plasma Science and Technology. 2016. Vol. 18. No. 2, pp. 131-137.
3. He G., Zhan Y., Ge N. Adaptive transmission method for alleviating the radio blackout problem // Progress in Electromagnetics Research. 2015. Vol. 152, pp. 127-136. DOI 10.2528/PIER15072702
4. Takahashi Y., Enoki N., Takasawa H., Oshima N. Surface catalysis effects on mitigation of radio frequency blackout in orbital reentry. 2020. Vol. 53, No. 23. P. 235203. DOI 10.1088/1361-6463/ab79e0
5. Mikhailov V.F., Mazhnik I.V. Calculation of Radiation Characteristics of a Circular Waveguide Covered with Thermal Protection and Plasma Layer // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744092
6. Meseguer J., Perez-Grande I., Sanz-Andres A. Thermal protection systems // Spacecraft Thermal Control, 2012, pp. 305-325.
7. Mikhailov V.F. Characteristics of Radiation of a round Waveguide through a Flat Homogeneous Heat Shield // Intechopen, 2020. DOI:10.5772/intechopen.92036.
8. Abanti Nag, Rayasa Rao, Prasanta Panda. High temperature ceramic radomes (HTCR) – A review. Ceramics International, 2021. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.04.203.

9. Meseguer J., Perez-Grande I., Sanz-Andres A. Thermal protection systems. Spacecraft Thermal Control, 2012, pp. 305-325.

10. Serdyuk V. Method of Additive Regularization of Field Integrals in the Problem of Electromagnetic Diffraction by a Slot in a Conducting Screen, Placed Before a Dielectric Layer // Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 83, pp. 129-151, 2019. doi:10.2528/PIERB18102906

11. Дворянинов С.М. Антенные устройства. Самарский государственный технический университет, 2007. 449 с.

12. Jiannan Tu, Song Paul, Reinisch Bodo W. Plasma sheath structures around a radio frequency antenna // Journal of Geophysical Research, 113(A7), 2008. doi:10.1029/2008ja013097

13. Best S.R. Advance in the Design of Electrically Small Antennas, Short Course // IEEE AP Symposium, 2003, pp. 18-27.

14. Михайлов В.Ф., Пободоносцев К.А. Прогнозирование эксплуатационных характеристик антенн с теплозащитой. С.-Петербург, Судостроение, 1994. 300 с.

15. Mikhailov V.F., Mazhnik I.V. Calculation of Radiation Characteristics of a Circular Waveguide Covered by Thermal Protection // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020. pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131552.

16. Collin E.R. Foundations for Microwave Engineering, 2nd Edition. Wiley-IEEE Press, 2001, pp. 194-197.

17. Li S., Zhu Z. A numerical method to determine mode content in circular waveguide based on an integral identity equation // Applied Mathematical Modelling, 2012. vol. 36. no. 7, pp. 2926-2934.

18. Пат. RU 2610048 C2 C04B 35/80 (2006.01). Высокотемперостойкий радиопрозрачный неорганический стеклопластик и способ его получения / Я.Б. Феодосий, К.Н. Любовь, П. А. Степанов; опубл. 07.02.2017. Бюл. № 4.

19. Ivakhnenko Yu.A., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for radomes of antennas and other products of aviation technology (review) // Proceedings of VIAM, 2016. No. 5, pp. 34-41.

20. Chefranov E.V., Fedorenko E.Y., Krivobok R.V., Lisachuk G.V., Gusarova I.A. Influence of the method for producing radiotransparent ceramics based on the system SrO-BaO-Al2O3-SiO2 on its properties // SRRTC. Vol. 117, 2018, pp. 167-175.

## SPACECRAFT ANTENNA RADIATION CHARACTERISTICS

ILYA V. MAZHNIK

St. Petersburg, Russia

### ABSTRACT

**Introduction:** Under the conditions of hypersonic flight of a spacecraft in dense layers of the atmosphere, communication is interrupted. The heating of the air around the apparatus, due to the high speed, leads to the formation of a plasma shell, the parameters of which change sharply along the flight path. The maximum temperature on the surface of the spacecraft can reach 6000 degrees Kelvin. To protect the onboard antenna from heating, heat-shielding radio-transparent material is used. Due to the temperature change in the electrical characteristics of the thermal protection, and the presence of a plasma layer, the propagation of radio waves is deteriorating. **The purpose of the work:** Determination of the radio technical characteristics of the onboard antennas of the returning spacecraft with the effect of heating on the thermal protection of the antenna and the effects of plasma formation, based on the developed mathematical model of the antenna with thermal protection, taking into account operating conditions. **Methods:** Of the well-known analytical methods of solution, it is possible to use the method of integral transformations and the method of eigenfunctions. Both of these methods were

**KEYWORDS:** spacecraft, onboard antenna, rectangular waveguide, homogeneous thermal protection, flight plasma, efficiency

used in this work. In this case, the assumption is used that the electrical parameters of the dielectric plate (thermal protection) and the geometric dimensions do not depend on time. **Results:** Relations are obtained that describe the radiation pattern of a rectangular waveguide with a dielectric heat shield and a plasma layer, taking into account their electrical parameters and thickness. The equations describing the boundary conditions of the electrodynamic model are presented. A calculation was carried out to determine the effect of changes in the thickness and electrical parameters of the thermal shield and the plasma layer on the efficiency and radiation diagram. The results showed that the parameters of the plasma sheath can modify the radiation pattern and affect the efficiency of the onboard antenna. **Practical significance:** The development of a mathematical model of the main radio technical characteristics of onboard antennas, taking into account the impact of high-temperature aerodynamic heating and the plasma layer, as well as the results of numerical calculations, can be applied in the development of recommendations for choosing thermal protection and recommending the location of onboard antennas on spacecraft using cloud technologies.

### REFERENCES

1. Y. Liu, H. Li, Y. Li et al. Transmission properties and physical mechanisms of X-ray communication for blackout mitigation during spacecraft reentry. 2017. Vol. 24. No. 11. P. 113507. DOI 10.1063/1.4998786.
2. Z. Liu, W. Bao, X. Li et al. Influence of plasma pressure fluctuation on RF wave propagation. *Plasma Science and Technology*. 2016. Vol. 18. No. 2, pp. 131-137. DOI 10.1088/1009-0630/18/2/06
3. S. Krishnamoorthy, S. Close. Investigation of plasma-surface interaction effects on pulsed electrostatic manipulation for reentry blackout alleviation. 2017. Vol. 50. No. 10. P. 105202. DOI 10.1088/1361-6463/aa5901
4. Y. Takahashi, N. Enoki, H. Takasawa, N. Oshima. Surface catalysis effects on mitigation of radio frequency blackout in orbital reentry. 2020. Vol. 53. No. 23. P. 235203. DOI 10.1088/1361-6463/ab79e0
5. V. F. Mikhailov, I. V. Mazhnik. Calculation of Radiation Characteristics of a Circular Waveguide Covered with Thermal Protection and Plasma Layer. 2022 *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings*, Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744092
6. J. Meseguer, I. Perez-Grande, A. Sanz-Andres. Thermal protection systems. *Spacecraft Thermal Control*, 2012, pp. 305-325.
7. V.F. Mikhailov. Characteristics of Radiation of a round Waveguide through a Flat Homogeneous Heat Shield. Intechopen, 2020. DOI:10.5772/intechopen.92036.
8. Abanti Nag, Rayasa Rao, Prasanta Panda. High temperature ceramic radomes (HTCR) - A review. *Ceramics International*, 2021. doi: 47.10.1016/j.ceramint.2021.04.203.
9. J. Meseguer, I. Perez-Grande, A. Sanz-Andres. Thermal protection systems. *Spacecraft Thermal Control*, 2012, pp. 305-325.
10. V. Serdyuk. Method of Additive Regularization of Field Integrals in the Problem of Electromagnetic Diffraction by a Slot in a Conducting Screen, Placed Before a Dielectric Layer. *Progress In Elec-tromagnetics*

*Research B*. Vol. 83, pp. 129-151, 2019. doi:10.2528/PIERB18102906

11. S.M. Dvorjaninov. Antennye ustrojstva. Samarskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2007. 449 p. (In Russ.)
12. Jiannan Tu, Song Paul, Reinisch Bodo W. Plasma sheath structures around a radio frequency antenna. *Journal of Geophysical Research*, 113(A7), 2008. doi:10.1029/2008ja013097
13. S.R. Best. Advance in the Design of Electrically Small Antennas, Short Course. *IEEE AP Sym-posium*, 2003, pp. 18-27.
14. V.F. Mihajlov, K.A. Pobedonoscev. Prognozirovanie jekspluatacionnyh harakteristik antenn s teplozashhitoy. S.-Peterburg, Sudostroenie, 1994. 300 p. (In Russ.)
15. V.F. Mikhailov, I.V. Mazhnik. Calculation of Radiation Characteristics of a Circular Wave-guide Covered by Thermal Protection. 2020 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-5.
16. E.R. Collin. Foundations for Microwave Engineering, 2nd Edition. Wiley-IEEE Press, 2001, pp. 194-197.
17. S. Li, Z. Zhu. A numerical method to determine mode content in circular waveguide based on an integral identity equation. *Applied Mathematical Modelling*, 2012. vol. 36. no. 7, pp. 2926-2934.
18. Pat. RU 2610048 C2 C04B 35/80 (2006.01). Vysokotermostojkij radioprozrachnyj neorga-nicheskij stekloplastik i sposob ego poluchenija / Ja.B. Feodosij, K.N. Ljubov', P. A. Stepanov; opubl. 07.02.2017. Bjul. No. 4.
19. Yu.A. Ivakhnenko, N.M. Varrik, V.G. Maksimov. High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for radomes of antennas and other products of aviation technology (review). *Proceedings of VIAM*, 2016. No 5, pp. 34-41.
20. E.V. Chefranov, E.Y. Fedorenko, R.V. Krivobok, G.V. Lisachuk, I.A. Gusarova. Influence of the method for producing radiotransparent ceramics based on the system SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> on its properties. *SRRTC*. Vol. 117, 2018, pp. 167-175.

### INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Ilya V. Mazhnik, postgraduate student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**For citation:** Mazhnik I.V. Spacecraft antenna radiation characteristics. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No. 5. P. 4-10.

doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-4-10 (In Rus)



# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНО-МНОГОКОЛЬЦЕВОЙ ТИПОВОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ МЕТОДОМ СЯГГИВАНИЯ УЗЛОВ СВЯЗИ

**ЯСИНСКИЙ**  
Сергей Александрович<sup>1</sup>

**РОМАНЕНКО**  
Павел Геннадьевич<sup>2</sup>

**ЗЮЗИН**  
Александр Николаевич<sup>3</sup>

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** в настоящее время имеются научные наработки по моделированию сетей доступа и транспортной составляющей телекоммуникационной сети на основе регулярных типовых структур, комбинируемых из радиальных и кольцевых типовых структур, т.е. радиально-кольцевых типовых структур с двунаправленной передачей информационных потоков. **Методы:** Несмотря на полученные научные результаты исследования применительно к радиально-однокольцевым типовым структурам, в настоящее время отсутствуют в достаточной степени удовлетворяющие потребности системного проектирования телекоммуникационной сети, наработки по математическому моделированию транспортных сетей и сетей доступа с несколькими кольцами. Для эффективного использования ранее полученных научных результатов, предлагается использовать хорошо зарекомендовавшие себя в теории оптимизации иерархических самоподобных систем методы динамической аналогии и оптимальной вложенности однотипных и (или) однородных структур. **Результаты:** в статье приведены результаты моделирования радиально-многокольцевой типовой структуры для обоснования подхода к ее выбору на основе результатов математического моделирования с применения метода стягивания узлов связи во внутренних радиально-однокольцевых структурах телекоммуникационной сети. При этом учитывается наличие динамических аналогий и фрактального самоподобия между ростом числа колец в многокольцевой структуре относительно исследованного ранее подхода к моделированию двухкольцевой типовой структуры транспортной сети (автомобильной, железнодорожной, метро и др.) на основе метода стягивания узлов связи.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> профессор Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, доктор технических наук, доцент, г. Санкт-Петербург, Россия, yasinsky777@mail.ru

<sup>2</sup> начальник кафедры Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, кандидат технических наук, доцент, г. Санкт-Петербург, Россия, ra-roman@yandex.ru

<sup>3</sup> преподаватель кафедры Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург, Россия, alexz01@bk.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радиально-многокольцевая типовая структура, метод стягивания узлов связи, телекоммуникационная сеть, фрактальное самоподобие, аналогия

**Для цитирования:** Ясинский С.А., Романенко П.Г., Зюзин А.Н. Моделирование радиально-многокольцевой типовой структуры телекоммуникационной сети методом стягивания узлов связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 11-17. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-11-17

## Введение

В настоящее время имеются научные наработки по моделированию сетей доступа (СД) и транспортной составляющей телекоммуникационной сети (ТКС) на основе регулярных типовых структур (ТС), комбинируемых из радиальных ТС (РТС) и кольцевых ТС (КТС) [1, 2], т. е. радиально-кольцевых ТС (РКТС) с двунаправленной передачей информационных потоков (ИП) [3, 4].

Проблема выбора наиболее рациональной РКТС изначально заключается в том, что в ходе моделирования ТКС в исходные данные (ИД) как правило закладываются требования к структурной устойчивости (СУ), но за редким исключением учитывается требование к потоковой устойчивости (ПУ) [5–7], что в совокупности формирует структурно-потоковую устойчивость (СПУ) [8, 9].

Не смотря на полученные научные результаты исследования применительно к радиально-однокольцевым ТС (РОКТС) [4, 9–14], в настоящее время отсутствуют в достаточной степени удовлетворяющие потребности системного проектирования ТКС наработки по математическому моделированию транспортных сетей и СД с несколькими кольцами, т. е. радиально-многокольцевых ТС (РМКТС) с числом колец больше двух. Для эффективного использования ранее полученных научных результатов применительно к РОКТС, предлагается использовать хорошо зарекомендовавших себе в теории оптимизации иерархических самоподобных систем методы динамической аналогии и оптимальной вложенности однотипных и (или) однородных структур [15, 16].

Таким образом, при моделировании РМКТС обеспечиваются эквивалентные переходы от ранее исследованного в научной работе [17] подхода к моделированию менее сложной радиально-двухкольцевой ТС (РДКТС), занимающей промежуточное положение между РОКТС и РМКТС определенного ранга по наличию числа колец. Но так как моделирование РДКТС производится на основе метода стягивания узлов, путем перехода от более сложных по структурной размерности двухкольцевых структур к более изученным и менее сложным потокоэквивалентным (ПЭ) однокольцевым ТС, то этот подход возможно распространить на моделирование более сложных РМКТС.

### Обоснование подхода к моделированию РМКТС

Анализ работ [18–20] показал, что в своей основе ТКС (транспортные сети и СД) моделируются потоковым графом

$$G_{\Pi}(A_{\Pi}, B_{\Pi}), A_{\Pi} = \{a_i; i = \overline{1, N}\}, B_{\Pi} = \{b_{ij}; i, j = \overline{1, N}\}, \quad (1)$$

где:  $A_{\Pi}$  – множество вершин графа, т.е. узлов связи (УС);  $B_{\Pi}$  – множество ребер графа, т.е. линий связи (ЛС), которые реализуются участками одной или нескольких типов линий передач различной физической природы (радиосвязи, электропроводной связи и др.) для непосредственной передачи ИП между двумя удаленными УС, как корреспондирующей пары узлов (КПУ) связи из заданного множества

$$Z = \{z_k, k = \overline{1, m}\}. \quad (2)$$

Пропускная способность  $u_{ij}$  ребра  $b_{ij}$  характеризуется совокупностью каналов передачи (КП) с определенными скоростями передачи ИП из дискретного ряда возможных номиналов скоростей передачи. Каждой КПУ ставятся в соответствие потребности по образованию КП с определенными скоростями передачи ИП  $v_{z_k}$  из заданного множества

$$V = \{v_{z_k}; z_k \in Z\}. \quad (3)$$

Решение задач минимизации стоимости или повышения СПУ на этапе системного проектирования ТКС с использованием выражений (1), (2) и (3) на основе применения классических методов оптимизации не всегда целесообразно из-за вычислительной сложности и трудности в формировании ИД [18–20]. Если учитывать тенденцию развития современных телекоммуникационных технологий и существенный рост потребностей в обмене ИП пользователями ТКС, то можно наблюдать переход в транспортных сетях и СД от односвязных структур к многосвязным КТС и РКТС.

Например, подтверждением эволюционного развития КПУ транспортной сети может быть структура Московского метро, в которой помимо двух колец имеют место 8 радиальных линий (4 хорды). В качестве центрального узла в этой структуре может быть принят рассредоточенный пассажирский поток, циркулирующий между станциями метро и распределенными на местности железнодорожными вокзалами, а также потоками пассажиров из густонаселенного центра города на городскую периферию и городские окраины. Наряду с этими двумя кольцами имеют место увязанные в единую транспортную инфраструктуру столицы и области автомобильные кольцевые дороги, параллельно с которыми проложены с целью экономии средств на капитальное строительство и доступность в эксплуатации несколько КТС и РКТС волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые будучи фрагментом ТКС имеют архитектуру в виде модели РМКТС.

Учитывая однотипность и физическую однородность реализуемого линейного и узлового ресурсов при построении РМКТС, оказалось, что решение задач минимизации стоимости или повышения СПУ на этапе системного проектирования ТКС можно значительно упростить в сравнении с используемыми классическими методами оптимизации на графовых моделях. Для этого упрощения проведено ряд научных исследований по обоснованию выбора Р-КТС при построении ТКС:

с одним кольцом в структуре (Р-ОКТС) [4, 9–14];

с двумя кольцами в структуре (Р-ДКТС) [17], где первое кольцо внутреннее, а второе – наружное.

Полученные ранее результаты исследований для этапа системного проектирования ТКС при обосновании выбора Р-ОКТС и Р-ДКТС могут быть использованы методом аналогий в результате стягивания УС (СУС) для обоснования выбора Р-МКТС, когда число колец более двух. Следовательно, опираясь на модель построения Р-ДКТС, остановимся на возможности применения метода СУС в радиально-однокольцевую ТС при обосновании выбора Р-МКТС.

Так как моделирование ТКС в виде РОКТС и РДКТС ранее обосновано, то возникает вопрос о возможном представлении этой структуры, как матроида для РМКТС. Наличие в ТС основного признака матроида, который выражается в

возможности представления РМКТС как абелевой группы (абелевого кольца) [21, 22], позволяет рассматривать подобные системы в виде вложенных друг в друга структурных образований. В случае явного отсутствия наличия признака матрицы и как следствие – невозможности представления РМКТС как абелевой группы с последовательно-параллельными структурами, необходимо применять подход к моделированию РМКТС с увязкой с ПЭ преобразованиями мостиковых структур (МС) [23].

В любой МС всегда можно найти зависимые пути передачи ИП, проходящие через центральную вершину (ЦВ) РМКТС или другие узлы связи (УС) для каждого телекоммуникационного направления (ТКН) из заданного множества  $Z = \{z_k; k = \overline{1, m}\}$ , через последовательно-параллельные ПЭ независимые пути передачи ИП [23].

Анализ научной работы [17] показал, что по аналогии с математической моделью (ММ) на основе метода СУС при обосновании выбора РДКТС для построения транспортной сети может быть разработана более обобщающая ММ для РМКТС телекоммуникационной сети, состоящей из транспортной сети и сетей доступа. Существо этой обобщающей ММ заключается в постановке задач математического моделирования и оптимизации топологии различного рода транспортных составляющих (автомобильных, железнодорожных, телекоммуникационных и др.) с учетом динамического фактора на основе теории развития динамических систем [15, 16], которой свойственно учитывать иерархические уровни структурной эволюции в виде множества состояний с последовательностью номеров  $i = \overline{1, S}$ :

$$\{s_i; i = \overline{1, S}\}. \quad (4)$$

Учитывая опыт возможного использования фрактального самоподобия в ходе моделирования транспортной составляющей ТКС на основе обоснованного выбора Р-ДКТС [17], перенесем его с Р-ДКТС на радиально-многокольцевые типовые структуры с позиции моделирования самоподобных фрактальных структур в виде наиболее рационально вложенных одна в другую КТС как уровней  $s_i \in S$  с порядковым номером  $i = \overline{1, S}$ . Когда  $S = 2$ , то имеет место частный случай подхода к выбору типовой структуры ТКС методом стягивания УС, который исследован в научной работе [17]. Исходя из этого, предлагается РМКТС моделировать по аналогии с ранее исследованной РДКТС в виде фрактальной структуры, используя алгоритм обратной рекуррентной связи с добавлением в каждом цикле итерации для состояний некоего нелинейного значения и учитывая, что:

все полученные в работах [4, 9–14] научно-практические результаты исследований по обоснованию выбора наиболее оптимальных РОКТС применительно к построению ТКС могут быть методом динамических аналогий и изначально применены к обоснованию выбора РДКТС, а затем к РМКТС;

переход от исходной (внутренней) РОКТС, состоящей из РТС с центральным (Ц) узлом связи (ЦУС)  $a_{u_{s=1}}$  и КТС под №1, к целостной РДКТС не должен противоречить процедуре

самоорганизации динамической системы с наиболее рациональной ее вложенностью во вторую (наружную) КТС, образуя очередную (вторую) потокоэквивалентную РОКТС в виде центральной вершины графа под №2, то есть в виде центрального УС  $a_{u_{s=2}}$ ;

приведенная выше процедура перехода от полученной очередной потокоэквивалентной РОКТС в виде ЦВ графа к следующей целостной РДКТС используется многократно по мере увеличения числа колец в РМКТС из множества структурных уровней (1).

При этом, очень важно находить не только внутренние аналогии для каждого из этапов (уровней) синтеза РМКТС, но и внешние аналогии между смежными уровнями, в виде самоподобных составляющих структур.

С учетом множества возможных состояний многокольцевой ТКС (4), представим ее как РМКТС, состоящую из множества однотипных колец

$$C = \{r_j = s_i; j = i = \overline{1, S}\}. \quad (5)$$

Предыдущие исследования по обоснованию области допустимых характеристик и динамических уровней РКТС проводились исключительно для случая, когда в (5)  $r_1 = 1$ , то есть для РКТС с одним кольцом в структуре. По мере увеличения числа колец в РМКТС увеличивается радиус и диаметр ТКС, а по мере окончательного сжатия УС в предшествующей (исходной) РКТС, она приобретает статус  $r_{i+1} = r_{i=2}$  (при  $i = 1$ ) ПЭ РКТС в рамках РМКТС. Следовательно, для каждой очередной сжатой ПЭ РКТС в рамках РМКТС справедливо использование ранее разработанных ММ для обоснования области допустимой эффективности применительно к моделированию ТКС на основе ММ для РОКТС.

### Графовая модель РМКТС

По аналогии с ММ (1) для моделирования РМКТС с учетом возможных состояний ТКС (4) предлагается граф

$$G_S(A_S, B_S) = \bigcup_{s=1}^S G_s(A_s, B_s), s = \overline{1, S}, \quad (6)$$

состоящий из:  
множества вершин графа (УС)

$$A_s = \{a_{i_s}\} \cup a_{u_{s=1}}; i = \overline{1, N_s}; \quad (7)$$

множества ребер графа (ЛС)

$$B_s = \{b_{ij_s}\} \cup \{b_{a_{u_{s=1}}i}\}; i, j = \overline{1, N_s}; i \neq j. \quad (8)$$

В уточненном обобщающем виде модель РМКТС (6) с учетом (3) и (4) с ЦВ  $a_{u_{s=1}}$  представляется как

$$G_S(A_S, B_S) = \{a_{i_s}\} \cup a_{u_{s=1}} \cup \{b_{ij_s}\} \cup \{b_{a_{u_{s=1}}i}\}, s = \overline{1, S}. \quad (9)$$

Из модели (9) видно, что РМКТС состоит из внутренней РОКТС и множества наружных колец, то есть состоит из  $a_{u_{s=1}}$

с инцидентными ребрами и множества колец  $C = \{r_j; j = \overline{1, S}\}$  (внутреннего  $r_{j=1}$ , наружного  $r_{j=S}$  и промежуточных  $r_{1 < j < S}$ ) с инцидентными ребрами графа (ЛС) между их вершинами (УС).

Для обоснования УС с максимальным (экстремальным) значением относительных коэффициентов эффективности для обоснования выбора РМКТС необходимо определиться:

- с ЦУС №1;
- сколько будет рокад и хорд с реализуемым числом колец (5);
- сколько целесообразно между хордами и рокадами включать промежуточных УС с аппаратурой выделения и транзита КП с определенными скоростями передачи ИП;
- с основными УС колец (5) на пересечении хорд (рокад) с кольцами (аналоги осей сети), т. е. с транзитными УС на другие кольца ТС.

Структура ЦУС должна в полном объеме обеспечивать предъявляемые к ней (в частности) и ко всей ТКС (вообще) требования к СПУ. То есть требования к СПУ не только в рамках ЦУС (внутренние), но и требования по отношению к взаимодействию внешних дестабилизирующих факторов на все элементы РОКТС. При этом, ЦУС может быть в виде целостного элемента или представлять из себя распределенные узловые элементы (сетевые узлы, сетевые станции, центры и станции каналообразования), соединенные между собой ЛС с системами передач в рамках пользователей услугами связи.

Полученные ранее результаты исследований для этапа системного проектирования ТКС при обосновании выбора РОКТС ( $r_{j=1}$ ) и РДКТС ( $r_{j=2}$ ) с использованием уточненной обобщенной графовой модели (9) могут быть перенесены методом СУС для обоснования выбора РМКТС, когда число колец более двух ( $S > 2$ ). Следовательно, опираясь на модель построения РДКТС, остановимся на применении метода стягивания УС в РОКТС для моделирования РМКТС [17].

#### Пример использования метода СУС для моделирования РМКТС

На рисунке 1 приведен пример модели изначальной структуры для стягивания УС внутренней (РОКТС) в рамках модели РОКТС для фрагмента структуры ТКС ( $N_s = 3$  и  $S = 3$ ), представленной на рисунке 2 в виде радиально-трехкольцевой ТС (РТКТС). На рисунке 2 связывающие кольца ребра в графе не обозначены для упрощения вида, а на самом деле они обозначаются в соответствии с обозначениями в теории графов [18-20]. В результате стягивания на рисунке 1 узлов связи в рамках первого цикла из трех-циклового применения алгоритма СУС (рис. 3-5), где число шагов алгоритма соответствует количеству УС в кольце №1 ( $N_s = 3$ ), а цикл в алгоритме соответствует №1 из  $S = 3$ , получен ПЭ и СЭ центральный УС под №2 в виде следующего графа:

$$a_{II_{s=2}} \Leftrightarrow G_{s=1}(A_{s=1}, B_{s=1}). \quad (10)$$

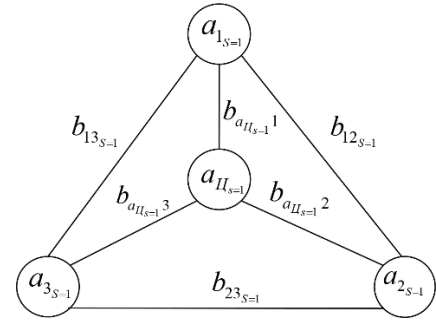


Рис. 1. Пример модели РОКТС для ТКС

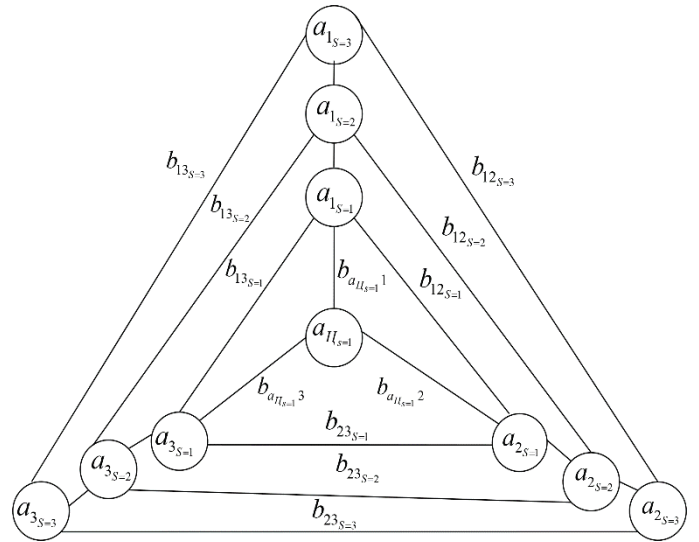


Рис. 2. Пример модели РТКТС для ТКС

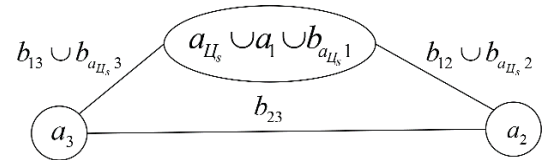


Рис. 3. Шаг 1 стягивания  $a_{1_{S=1}}$  с  $a_{II_{S=1}}$

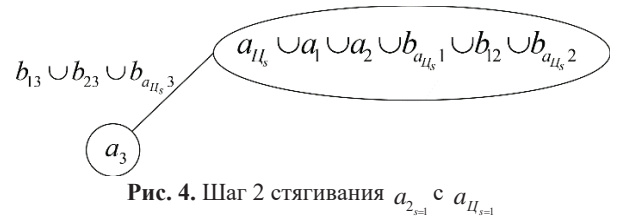


Рис. 4. Шаг 2 стягивания  $a_{2_{S=1}}$  с  $a_{II_{S=1}}$

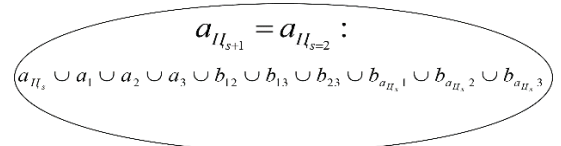


Рис. 5. Шаг 4 стягивания  $a_{3_{S=1}}$  с  $a_{II_{S=1}}$

После подстановки вместо центральной РОКТС №1 на рисунке 2 РТКТС полученной ММ (10) на рисунке 5, образуется ПЭ и СЭ граф (рис. 6), который приобретает исследованный в работе [17] вид РДКТС с ЦУС  $a_{\Pi s=2}$ .

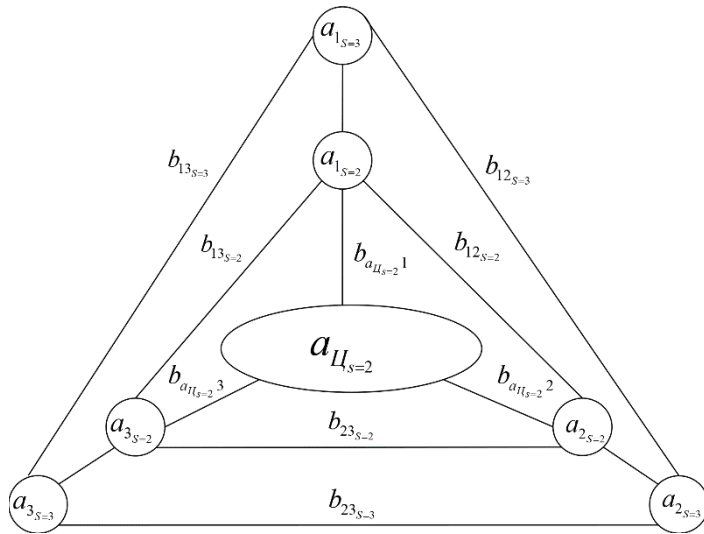


Рис. 6. Граф РДКТС с ЦУС  $a_{\Pi s=2}$ , который ПЭ и СЭ графу РТКТС на рисунке 2

По отношению к полученной РДКТС на рисунке 6 произведем СУС в рамках второго цикла из трех-циклового применения алгоритма СУС, где число шагов алгоритма соответствует количеству УС в кольце №2 ( $N_s = 3$ ), а цикл в алгоритме соответствует №2 из  $S = 3$ , получен ПЭ и СЭ центральный УС под №3 в виде следующего графа:

$$a_{\Pi s=3} \Leftrightarrow G_{s=2}(A_{s=2}, B_{s=2}). \quad (11)$$

После подстановки вместо центральной РОКТС №2 на рисунке 6 РДКТС полученной методом СУС модели (11), образуется ПЭ и СЭ граф (рис. 7), который приобретает исследованный в работе [17] вид РОКТС №2 с ЦУС  $a_{\Pi s=3}$ .

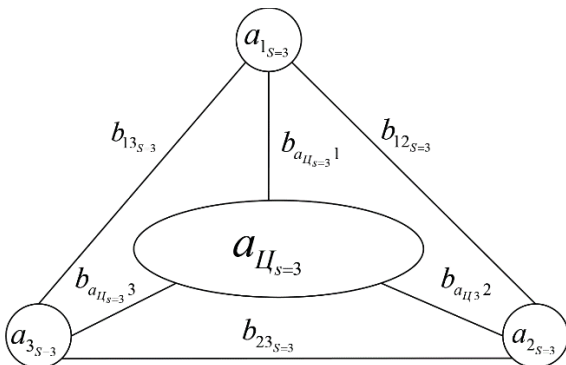


Рис. 7. Граф РОКТС №2, который ПЭ и СЭ графу РТКТС на рисунке 2 с ЦУС  $a_{\Pi s=1}$  и графу РДКТС на рис. 6 с ЦУС  $a_{\Pi s=2}$

По отношению к полученной РОКТС №2 на рисунке 7 произведем СУС в рамках окончательного третьего цикла из трех-циклового применения алгоритма СУС, где число шагов

алгоритма соответствует количеству УС в кольце №3 ( $N_s = 3$ ), а цикл в алгоритме соответствует №3 из  $S = 3$ , получен окончательный граф

$$a_{\Pi s=4} \Leftrightarrow G_{s=3}(A_{s=3}, B_{s=3}). \quad (12)$$

Полученный в окончательном виде граф (12) эквивалентный (ПЭ и СЭ) графу РТКТС на рисунке 2, а все изначально заложенные для ТКС параметры, характеризующие СПУ (коэффициенты связности для ТКС, коэффициенты готовности и оперативной готовности и заданные в (3) в значения по числу образованных КП с определенными скоростями передачи ИП) [4], отражаются на каждом шаге и цикле применения метода СУС в виде соответствующих матриц (таблиц) с данными. То есть, после завершения всех циклов СУС формируется граф, который в «компактном» виде воплощает все характеристики исходной структуры с интегральными показателями СПУ ТКС: устойчивости (живучести, надежности) и пропускной способности [9, 15, 16]. При этом, пропускные способности (емкости) ребер графа (ЛС), оказавшиеся после сжатия инцидентными одной и той же паре УС, суммируются, а коэффициенты готовности и (или) оперативной готовности умножаются по закону умножения значений вероятностей для последовательно-параллельных структур соединения элементов в телекоммуникационных направлениях из заданного множества (2).

## Заключение

Проведенное обоснование подхода к моделированию радиально-многокольцевой типовой структуры для построения ТКС позволило разработать графовую модель, описываемую в общем виде выражениями (6)–(9). Применяемый для моделирования РДКТС метод СУС в научной работе [17] с использованием динамических аналогий и наличия структурного соподобия между кольцевыми типовыми структурами перенесен для моделирования РМКТС. Это позволило унифицировать подход к моделированию и обоснованию выбора кольцевых типовых структур на этапе системного проектирования ТКС (транспортной сети, СД), в независимости от числа колец в этой сети. Возможность применения разработанного подхода к моделированию РМКТС на практике подтверждается приведенным примером для фрагмента ТКС, представляющего собой РТКТС на рисунке 2.

Использование метода СУС с учетом наличия фрактального самоподобия между кольцевыми структурами из однородных физических элементов ТКС на УС (однотипность ВОЛС, систем передачи и систем коммутации) после обоснования выбора наиболее рациональной РМКТС в процессе системного проектирования для динамически развивающейся ТКС позволяет:

получать из более сложных по структурной размерности РОКТС и РДКТС менее сложную эквивалентную (ПЭ и СЭ) структуру в виде единого ЦУС, воплощающего в себе все интегральные показатели СПУ ТКС;

применять научно-практические результаты исследований по обоснованию выбора наиболее оптимальных РОКТС и РДКТС к обоснованию выбора РМКТС методом динамических аналогий и фрактального самоподобия [15, 16, 24];

применять результаты ранее полученных исследований для сравнительного анализа РТС, КТС и РОКТС с использованием моделей для расчета значений их относительных коэффициентов эффективности не только для моделирования РДКТС [9-14, 17], но и применительно к моделированию РМКТС.

### Литература

1. Гавлиевский С.Л., Карташевский В.Г., Проскура Д.В., Сахарчук Д.С., Сподобаев М.Ю. Принципы построения мультисервисной сети ПАО «Ростелеком». М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 228 с.
2. Бакланов И.Г. SDH – NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей. М.: Метропек, 2006. 736 с.
3. Ясинский С.А. Анализ структурной живучести кольцевой локальной сети // Вторая всесоюзная конференция по информационным системам множественного доступа. Минск: БелНИИТИ, Тезисы докладов часть 2, 1991. С. 142-145.
4. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Сравнительный анализ базовых типовых структур по относительным коэффициентам эффективности для построения радиально-кольцевых внутризоновых и сельских волоконно-оптических сетей связи // ТРУДЫ ЦНИИИС. Санкт-Петербургский филиал. Том 1(11), 2021. СПб.: ФГУП ЦНИИИС. С. 112-120.
5. ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Термины и определения». М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. 16 с.
6. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Уточненная математическая модель для расчета структурной устойчивости направления связи телекоммуникационной // НТЖ «Электросвязь». М.: ООО «МЕДИАКОЛОР», 2021. №11. С. 55-58.
7. Ясинский С.А. Уточнение требований к надежности (без резервирования) для номинальных цепей каналов передачи телекоммуникационной сети общего пользования на основе анализа рекомендации G.602 // НТЖ «Информация и космос». СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз», 2021. №2. С. 31-36 с.
8. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Формирование телекоммуникационных направлений с высокой структурно-поточковой устойчивостью // НТЖ Электросвязь. М.: ООО «МЕДИАКОЛОР», 2022. №1. С. 43-46.
9. Ясинский С.А. Классификация уровней структурно-поточковой устойчивости телекоммуникационных направлений // НТЖ Электросвязь. М.: ООО «МЕДИАКОЛОР», 2022. №08. С. 58-61.
10. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Обоснование выбора радиально-кольцевых типовых структур по результатам анализа среднегармонических значений относительных коэффициентов эффективности для минимизации стоимости структурно устойчивых кабельных сетей связи // НТЖ «Информация и космос». СПб.: ООО «Типографский комплекс «Девиз», 2021. №1. С. 6-10.

11. Ясинский С.А., Зюзин А.Н., Ходунов А.А., Селезнев А.В. Обоснование выбора и определение среднегеометрического значения относительных коэффициентов эффективности радиально-кольцевых типовых структур для построения внутризоновых и сельских телекоммуникационных сетей с учетом особого периода // ТРУДЫ ЦНИИИС. Санкт-Петербургский филиал. Том 2(12), 2021. СПб.: ФГУП ЦНИИИС. С. 34-40.

12. Ясинский С.А., Зюзин А.Н., Ходунов А.А., Селезнев А.В. Определение среднегармонических относительных коэффициентов эффективности радиально-кольцевых типовых структур для построения внутризоновых и сельских телекоммуникационных сетей с учетом особого периода управления // ТРУДЫ ЦНИИИС. Санкт-Петербургский филиал. Том 2(12), 2021. СПб.: ФГУП ЦНИИИС. С. 41-48.

13. Jasinski S.A., Sokolov V.M. Generalizing Mathematical Model for Evaluating the Efficiency of Choosing a Radial-ring Standard Structure for a Fiber-optic Telecommunications Network. Webology, Volume 19, Number 1, January, 2022, pp. 5600-5610.

14. Ясинский С.А., Зюзин А.Н., Селезнев А.В., Соколов В.М. Выбор типовой структуры по результатам сравнительного анализа относительных коэффициентов эффективности радиальных и кольцевых типовых структур для построения волоконно-оптической сети связи // 77-я НТК СПб-го НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: Сборник докладов СПбГЭТУ. СПб.: СПбГЭТУ, 2022. С. 115-117.

15. Ольсон Г. Динамические аналогии // Перевод с английского. М.: ГИИЛ, 1947. 224 с.

16. Ясинский С.А. Основы динамических аналогий в исследовательской деятельности. СПб.: Военный университет связи, 2004. 164 с.

17. Ясинский С.А. Моделирование радиально-двухкольцевой типовой структуры транспортной сети методом стягивания узлов связи // ТЖ «Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт», Том 17. М.: ИД Медиа Паблишер, 2021. №5. С. 42-47.

18. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 455 с.

19. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи. М.: Связь, 1977. 360 с.

20. Ясинский С.А. Унифицированные математические модели для анализа и синтеза элементов телекоммуникационных сетей. СПб.: Военный университет связи, 2003. 184 с.

21. Курош А.Г. Теория групп. М.: Наука, 1967. 648 с.

22. Гордеев Э.Н. Задачи выбора и их решения // Компьютер и задачи выбора. М.: Наука, 1989. С. 5-48.

23. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Уточненная математическая модель для расчета структурной устойчивости направления связи телекоммуникационной сети направлений // НТЖ Электросвязь. М.: ООО «МЕДИАКОЛОР», 2021. №11. С. 55-58 с.

24. Пайтген Х.Ю., Рухтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 176 с.

## MODELING OF A RADIAL-MULTI-RING TYPICAL STRUCTURE OF A TELECOMMUNICATION NETWORK BY THE METHOD OF TIGHTENING COMMUNICATION NODES

SERGEI A. JASINSKII

St. Petersburg, Russia, yasinsky777@mail.ru

PAVEL G. ROMANENKO

St. Petersburg, Russia, pa-roman@yandex.ru

ALEXANDER N. ZYUZIN

St. Petersburg, Russia, alexz01@bk.ru

### ABSTRACT

The article presents the results of modeling a radial-multi-ring typical structure to justify the approach to its selection based on the results of mathematical modeling using the method of tightening communication nodes in the internal radial-single-ring structures of a telecommunications network. This takes into account the

**KEYWORDS:** radial-multi-ring typical structure, method of tightening communication nodes, telecommunication network, fractal self-similarity, analogy.

presence of dynamic analogies and fractal self-similarity between the increase in the number of rings in a multi-ring structure relative to the previously studied approach to modeling a two-ring typical structure of a transport network (automobile, railway, metro, etc.) based on the method of tightening communication nodes.

## REFERENCES

1. S.L. Gavlievsky, V.G. Kartashevsky, D.V. Proskura, D.S. Sakharchuk, M.Yu. Spodobaev. Principles of building a multiservice network of PJSC Rostelecom. Moscow: Hotline – Telecom, 2021. 228 p.
2. I.G. Baklanov. SDH – NGSDH: a practical view on the development of transport networks. Moscow: Metrotek, 2006. 736 p.
3. S.A. Yasinsky. Analysis of the structural survivability of a ring local area network. *The Second All-Union Conference on Multiple Access Information Systems*. Minsk: BelNIINTI, Abstracts of reports part 2, 1991, pp. 142-145.
4. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin. Comparative analysis of basic typical structures by relative efficiency coefficients for the construction of radial-ring intra-zone and rural fiber-optic communication networks. *Proceedings of the central research institute. St. Petersburg branch*. Vol. 1(11), 2021, pp. 112-120.
5. GOST R 53111-2008 "Stability of the functioning of the public communication network. Terms and definitions". Moscow: "STANDARTINFORM", 2009. 16 p.
6. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin. A refined mathematical model for calculating the structural stability of the telecommunication communication direction. *Telecommunication*, 2021. No. 11, pp. 55-58.
7. S.A. Yasinsky. Clarification of reliability requirements (without redundancy) for nominal circuits transmission channels of a public telecommunication network based on the analysis of recommendation G.602. Moscow: Information and Space, 2021. No. 2, pp. 31-36.
8. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin. Formation of telecommunication directions with high structural and flow stability. *Telecommunication*, 2022. No. 1, pp. 43-46.
9. S.A. Yasinsky. Classification of levels of structural and flow stability of telecommunication. *Telecommunication*, 2022. No. 08, pp. 58-61.
10. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin. Justification of the choice of radial-ring typical structures based on the results of the analysis of the average harmonic values of relative efficiency coefficients to minimize the cost of structurally stable cable communication networks. *Information and Space*, 2021. No. 1, pp. 6-10.
11. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin, A.A. Khodunov, A.V. Seleznev. Substantiation of the choice and determination of the mean geometric value of the relative efficiency coefficients of radial-ring typical structures for the construction of intra-zone and rural telecommunication networks taking into account a special period. *Proceedings of the central research institute. St. Petersburg branch*. Vol. 2(12), 2021, pp. 34-40.
12. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin, A.A. Khodunov, A.V. Seleznev. Determination of the average harmonic relative efficiency coefficients of radial-ring typical structures for the construction of intra-zone and rural telecommunication networks taking into account a special management period. *Proceedings of the central research institute. St. Petersburg branch*. Vol. 2(12), 2021, pp. 41-48.
13. S.A. Yasinsky, V. M. Sokolov. Generalizing Mathematical Model for Evaluating the Efficiency of Choosing a Radial-ring Standard Structure for a Fiber-optic Telecommunications Network. *Webology*. Vol. 19, Number 1, January, 2022, pp. 5600-5610.
14. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin, A.V. Seleznev, V.M. Sokolov. The choice of a typical structure based on the results of a comparative analysis of the relative efficiency coefficients of radial and ring typical structures for the construction of a fiber-optic communication network. *77th STK SPb-go NTO RES named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day: Collection of reports of SPbSETU*. St. Petersburg: SPbSETU, 2022, pp. 115-117.
15. G. Olson. Dynamic analogies. Translated from English. Moscow: GILL, 1947. 224 p.
16. S.A. Yasinsky. Fundamentals of dynamic analogies in research activity. St. Petersburg: Military University of Communications, 2004. 164 p.
17. S.A. Yasinsky. Modeling of a radial-two-ring typical structure of a transport network by the method of tightening communication nodes. *T-Comm*. Vol. 17. 2021. No.5, pp. 42-47.
18. M. Swami, K. Thulasiraman. Graphs, networks and algorithms. Translated from English. Moscow: Mir, 1984. 455 p.
19. G.B. Davydov, V.N. Roginsky, A.Ya. Tolchan. Telecommunication networks. Moscow: Svyaz, 1977. 360 p.
20. S.A. Yasinsky. Unified mathematical models for analysis and synthesis of elements of telecommunication networks. St. Petersburg: Military University of Communications, 2003. 184 p.
21. A.G. Kurosh. Theory of groups. Moscow: Nauka, 1967. 648 p.
22. E.N. Gordeev. Choice problems and their solutions. *Computer and choice problems*. Moscow: Nauka, 1989, pp. 5-48.
23. S.A. Yasinsky, A.N. Zyuzin. A refined mathematical model for calculating the structural stability of the telecommunication network communication direction. *Telecommunication*, 2021. No.11, pp. 55-58.
24. H.Y. Paytgen, P.H. Richter. The beauty of fractals. Images of complex dynamic systems: Trans. from English. Moscow: Mir, 1993. 176 p.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Sergei A. Jasinskii**, Professor, Doctor of Science, Associate Professor, Military Communications Academy, St. Petersburg, Russia, yasinsky777@mail.ru

**Pavel G. Romanenko**, head of department, Ph.D, associate professor, Military Communications Academy, St. Petersburg, Russia, pa-roman@yandex.ru

**Alexander N. Zyuzin**, head of department, Ph.D, Military Communications Academy, St. Petersburg, Russia, alexz01@bk.ru

---

**For citation:** Jasinskii S.A., Romanenko P.G., Zyuzin A.N. Modeling of a radial-multi-ring typical structure of a telecommunication network by the method of tightening communication nodes. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No. 5. P. 11-17. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-11-17 (In Rus)

# ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ СЕТЕЙ ПАКЕТНОЙ КОММУТАЦИИ

СТЕПАНОВА

Ирина Владимировна<sup>1</sup>

ПАТЕНЧЕНКОВА

Елена Константиновна<sup>2</sup>

КНАЖ НУМА<sup>3</sup>

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Архитектура корпоративной сети является комплексом, впитавшим в себя все необходимое для обеспечения сетевой безопасности, масштабируемости и устойчивости. Вместо создания отдельной физической сети, приобретение, установка и обслуживание которой требует больших затрат, решение на основе VPN через существующий публичный Интернет становится перспективным решением для многих корпораций. **Методы.** По мере внедрения новых сервисов и функций перечень используемых протоколов стремительно растет, что усложняет сеть, а соответственно усложняет и управление сетью. В качестве исследовательской задачи авторы определяют оценку влияния методов защиты и управления трафиком в сетях пакетной коммутации для определения совокупности факторов влияния на пропускную способность сети. **Результаты.** Анализируется иерархическая структура сети, дается оценка возможностей использования ресурсов сети Интернет и сетевых структур технологии Multi Protocol Label Switching MPLS. Обсуждается и сравнивается использование протокола IPSec на базе общедоступной сети Internet и протоколов технологии MPLS. Представлены результаты оценки влияния выбора протокола на необходимую скорость передачи информации. Материал статьи может быть использован как дополнительный ресурс при проведении курсового проектирования по дисциплине "Технологии коммутации и маршрутизации в инфокоммуникационных сетях"

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> доцент, преподаватель кафедры ССиСК, к.т.н., МТУСИ, Москва, Россия, w515iv@mail.ru

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры ССиСК МТУСИ, Москва, Россия

<sup>3</sup> аспирантка МТУСИ, Москва, Россия

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** приложения инфокоммуникационных сетей, пакеты данных, пропускная способность, виртуальная частная сеть Virtual Private Network (VPN), Internet Protocol Security (IPsec), Multi Protocol Label Switching (MPLS), маршрутизаторы Label Switching Routers (LSR), туннелирование.

**Для цитирования:** Степанова И.В., Патенченкова Е.В., Кнаж Нума. Оценка факторов влияния на пропускную способность сетей пакетной коммутации // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 18-27. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-18-27

## Введение

Данная статья описывает основные аспекты проектирования крупных корпоративных сетей связи, но результаты исследования могут применяться для развертывания средних и малых сетей. Архитектура корпоративной сети является комплексом, впитавшим в себя все необходимое для обеспечения сетевой безопасности, масштабируемости и устойчивости. При выборе конкретной сетевой архитектуры определяются главные цели, которые должны быть реализованы. На пути к конечному адресу назначения пакеты проходят через множество различных сетей. Протоколы передачи информации в сетях различаются. Для преодоления этой проблемы выполняется туннелирование, то есть упаковка пакетов внутри других пакетов, использующих протоколы, которые поддерживаются на конкретном участке сети. Процесс туннелирования позволяет устанавливать безопасное зашифрованное соединение между пользователями различных сетей.

Вместо создания отдельной физической сети, приобретение, установка и обслуживание которой требует больших затрат, решение на основе VPN через существующий публичный Интернет становится перспективным решением для многих корпораций.

Ряд усилий по увеличению скорости пересылки пакетов в IP-маршрутизаторах за счет введения концепции меток фиксированной длины привел к созданию технологии MPLS [RFC 3031, RFC 3032]. MPLS – это технология пересылки пакетов с использованием поиска меток, не затрагивающая IP-заголовок пакета.

## Архитектура корпоративной сети связи

Разбив архитектуру сети на модули, можно сконцентрироваться на функционале каждого из них по отдельности, что существенно упрощает дизайн, внедрение и управление. Принцип репликации (повторения) элемента упрощает ускорение развертывания сети. масштабирование сводится к добавлению дополнительных модулей.

Иерархическая модель представляет собой фундамент для сетевой инфраструктуры, объединяющей пользователей, маршрутизаторы, устройства безопасности, серверы, принтеры, сканеры (см. рис. 1).



Рис. 1. Иерархическая модель сети

Модель корпоративной сети можно разделить на три основных уровня – доступа, распределения и ядра [1, 2].

Уровень доступа (Access Layer) – это точка входа в сеть для пользователей и сетевых устройств. Доступ может быть проводным или беспроводным, должен обеспечивать защиту самих пользователей, корпоративных ресурсов и сеть от вредоносных атак со стороны подключаемых клиентов/устройств.

Уровень доступа включает в себя такие технологии защиты:

DHCP-snooping защищает пользователей от получения адреса от неизвестного DHCP-сервера, а также не позволяет злоумышленнику захватить все ip-адреса;

IP Source guard – это защита от IP spoofing, то есть от подмены IP-адреса источника;

Port security устанавливает ограничение на количество MAC адресов, поступающих на порт коммутатора. Защищает от подмены MAC адреса и от атак, направленных на переполнение таблицы коммутации;

Dynamic ARP inspection – это защита от ARP spoofing то есть от перехвата трафика между компьютерами.

Уровень распределения обеспечивает агрегацию (объединение) всех коммутаторов уровня доступа в единую сеть. В основном устройства, используемые на уровне распределения являются коммутаторами третьего уровня, они осуществляют маршрутизацию трафика между сегментами сети, а также реализуют систему безопасности и сетевые политики (контроль доступа).

Уровень распределения требует высокопроизводительного, отказоустойчивого исполнения. Например, возможно использование технологии стекирования и агрегированных соединений между сетевыми устройствами. Под агрегированным каналом понимается объединение двух или более физических каналов в один логический канал. при этом все соединения передают информацию, что увеличивает пропускную способность канала. В случае отказа одного из соединений, информация по-прежнему передается по другим исправным соединениям без каких-либо перерывов в работе сети.

Обычно устройства уровня распределения объединяются в стек, агрегированный канал образуется при объединении портов разных коммутаторов стека. Логический интерфейс образуется объединением двух (или более) портов, при этом один порт принадлежит первому коммутатору стека, а второй порт – второму. Оба порта участвуют в передаче трафика.

Уровень ядра обеспечивает объединение уровней распределения в больших сетях. Устройство уровня ядра, как правило, – это два коммутатора, подключение к которым осуществляется только на третьем уровне OSI, так как время сходимости на L3 гораздо меньше, чем на L2.

Объединение в единую сеть нескольких зданий возможно только с использованием контролируемой зоны, под которой понимается собственный канал передачи данных. Если здания соединены посредством Интернет-канала, то в этом случае применяется специальный модуль – либо модуль Интернет (Internet Edge), либо модуль сети WAN (WAN area).

Рассмотренные выше три уровня предоставляют различные функции и возможности. В зависимости от необходимости могут применяться один, два или все три уровня.

## Использование ресурсов сети Интернет

При реализации корпоративных сетей очень привлекательным является использование ресурсов общедоступной сети Интернет на правах аренды. Модуль доступа в сеть Интернет включает в себя следующие блоки.

Система предотвращения вторжений (англ. Intrusion Prevention System, IPS) – это программная или аппаратная система сетевой и компьютерной безопасности, обнаруживающая вторжения или нарушения безопасности, и автоматически защищающая от них. Сетевые IPS обеспечивают отслеживание трафика в сети и блокируют подозрительные потоки данных. Для беспроводных сетей IPS выполняет функцию проверки активности, то есть обнаруживает неверно сконфигурированные точки беспроводного доступа к сети. В системе IPS также присутствует анализатор поведения сети (Network Behavior Analysis, NBA), выполняющий задачу анализа сетевого трафика, идентифицирует нетипичные потоки. Для отдельных компьютеров в системе работает HIPS (Host-based Intrusion Prevention), который выполняет функцию обнаружения подозрительной активности на компьютере.

Для выбора системы IPS существует два варианта:

отдельно стоящее устройство – в этом варианте предполагается установку отдельного устройства, что существенно увеличивает производительность IPS. Это вариант менее гибкий по сравнению со другими вариантами;

использование межсетевого экрана с интегрированной функцией (Software/ hardware module). Этот вариант считается экономически выгодным, более гибким и обладает высокой производительностью по сравнению с первым вариантом.

Есть такая тенденция, что в большинстве организаций ИТ-отдел размещает приложения в общедоступном или частном облаке для повышения эффективности. Кроме того, Интернет-периметр перемещается в филиал с появлением приложений, работающих по принципу «Программное обеспечение как услуга» (SaaS), например, приложений для проведения встреч Cisco WebEx®, Microsoft 365 и Google Docs. Это оказывает существенное влияние на каналы передачи данных. К тому же зачастую компании сталкиваются с утилитарностью основного и резервного канала – в работе находится лишь один.

## Варианты реализации VPN

Можно выделить три метода организации VPN.

Удаленный доступ отдельных сотрудников к корпоративной сети организации через модем или публичную сеть. Организация такой модели виртуальной частной сети предполагает наличие VPN-сервера в центральном офисе, к которому подключаются удаленные клиенты. Удаленные клиенты могут работать из дома или с помощью ноутбука из любой точки мира, где есть доступ в Интернет. Такой способ организации VPN имеет смысл, когда отсутствует территориальная привязка сотрудников к корпоративной сети организации. Пример показан на рисунке 2 [3, 4, 5].

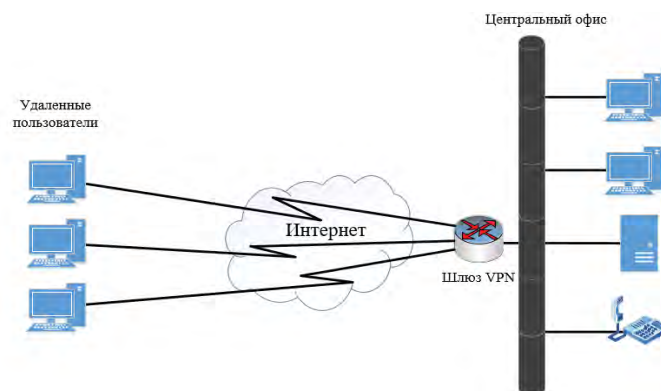


Рис. 2. Схема соединения при удаленном доступе

2. Объединение территориально разнесенных филиалов фирмы в общую сеть. Такая система называется Intranet VPN. При организации такой схемы подключения количество VPN-серверов должно соответствовать количеству подключаемых офисов. Данный метод может быть использован как для простых филиалов, так и для мобильных офисов. Пример показан на рисунке 3.

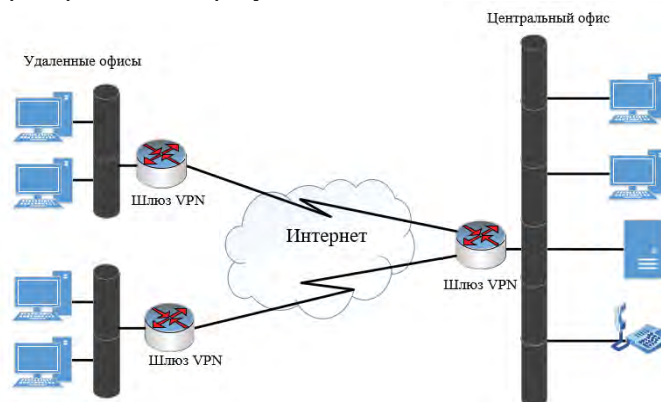


Рис. 3. Схема соединения в Intranet VPN

3. Экстранет VPN – способ предоставления доступа для клиентов компании по защищенным каналам. В этой ситуации удаленные клиенты будут иметь значительно ограниченные возможности по использованию корпоративной сети. Они будут иметь доступ к тем ресурсам компании, которые необходимы при работе с клиентами, например, к веб-сайту компании, а VPN используется для пересылки конфиденциальных данных (см. рис. 4).

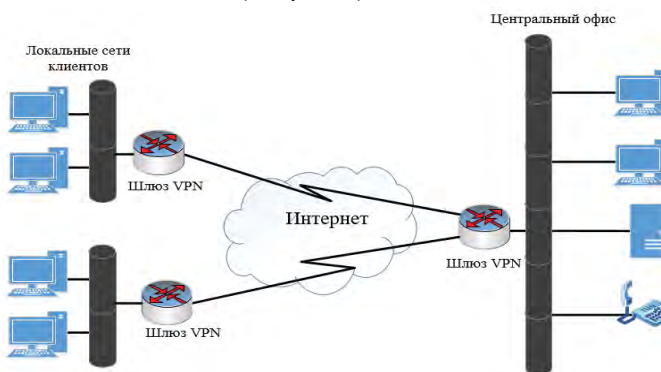


Рис. 4. Пример подключения Extranet VPN

## Возможности Internet Protocol Security (IPsec)

Многие виртуальные частные сети VPN используют набор протоколов IPsec, который работает поверх существующей IP-сети. IPsec обеспечивает безопасность связи по сети Интернет путем проверки сеанса. Он шифрует каждый пакет данных во время соединения. IPsec работает в двух режимах – транспортном и туннелирования.

Транспортный режим предполагает шифрование сообщения в пакете данных, а режим туннелирования шифрует весь пакет данных. IPsec может использоваться с другими протоколами безопасности.

Например, предположим, что компания использует протокол IPv6, чтобы соединить один из своих офисов (офис А) с другим (офис В). Сеть между офисами А и В поддерживает только IPv4. В этом случае необходимо упаковать (инкапсулировать) пакеты IPv6 в пакеты IPv4 для успешной передачи данных между офисами.

## Возможности технологии MPLS

MPLS – это актуальная технология пересылки пакетов с использованием поиска меток, не затрагивающая IP-заголовок пакета. Сеть MPLS состоит из нескольких маршрутизаторов, называемых LSR (Label Switching Routers). Маршрутизаторы, которые подключаются к IP-маршрутизаторам, называются LER (Label Edge Routers).

Заголовок MPLS Label как показано на рис.5, состоит из 20 битов ( $2^{20}$  значений или меток). Значение метки может использоваться LSR для поиска следующей пересылки (скачка). Поле EXP состоит из трех бит информации и используется для реализации функций, связанных с контролем качества QOS. Следующее поле – это один бит, называемый bottom-of-stack. Он используется в качестве флага, когда пакету назначается более одной метки, как в случае MPLS VPN или MPLS TE [5, 6].

Поле MPLS TTL (time to live), состоящее из восьми битов, служит той же цели, что и байт IP TTL в заголовке IP. Каждый раз, когда LSR пересылает пакет, он уменьшает поле TTL в заголовке пакета, и если значение достигает нуля, пакет отбрасывается.

Маршрутизатор MPLS (LSR, LER) пересылает пакеты MPLS путем поиска метки MPLS в своей таблице пересылки, а затем немедленно передает дейтаграмму на соответствующий выходной интерфейс. Нет необходимости обрабатывать заголовок каждого пакета на каждом переходе для определения IP-адреса назначения, а затем искать совпадение самого длинного префикса в таблице пересылки на основе IP-адреса назначения.

На рисунке 6 использованы такие обозначения: R1 – R4 – это MPLS-маршрутизаторы; R5 и R6 – это стандартные IP-маршрутизаторы.



Рис. 5. Заголовок MPLS

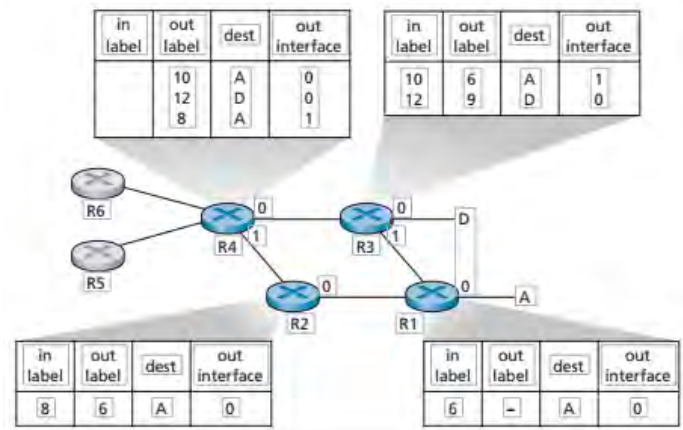


Рис. 6. Иллюстрация пересылок MPLS

Согласно концепции MPLS, маршрутизатор R1 объявляет R2 и R3, что пункт назначения А достигается любым MPLS-кадром с меткой 6.

Маршрутизатор R3 объявляет R4, что полученные кадры с MPLS-метками 10, 12 будут перенаправлены в пункты назначения А, D.

Маршрутизатор R2 объявляет маршрутизатору R4, что полученный кадр с MPLS-меткой 8 будет переключен в направлении А.

Маршрутизатор R4 может достичь А с исходящей MPLS-меткой 10 через интерфейс 0 и с исходящей MPLS-меткой 8 через интерфейс 1.

## Политики управления трафиком

Сети MPLS и Интернет – это пакетные сети. Пакетные сети всегда рискуют столкнуться с перегрузками [14-15, 24]

Приложения, такие как VoIP и Skype, очень чувствительны к задержкам и потере пакетов. Эти приложения являются приложениями реального времени. В частности, потеря пакетов может быть критической, поскольку обычно трафик на предьявителя VoIP не предполагает повторной передачи. Потеря пакетов приводит к прерыванию голосовых вызовов. Чтобы решить эту проблему и обеспечить бесперебойную доставку этого чувствительного трафика приложений, может вводиться дублирование пакетов, что позволяет делать копии пакетов, и отправлять каждую копию через два пути (см. рис. 7).



Рис. 7. Дублирование пакетов для приложений реального времени

После приема берется первый пакет, который приходит, и отбрасывается тот, который приходит позже. Мало шансов, что оба пути испытывают потерю пакетов. Может быть достигнута большая производительность с точки зрения латентности по сравнению с использованием одного пути.

Одним из возможных решений по управлению трафиком является так называемая «Туннельная привязка». Выполняется балансировка нагрузки на пакет для распределения пакетов, принадлежащих одному потоку, к различным путям следования, тем самым обеспечивая максимальную пропускную способность. Основная концепция технологии похожа на Multi-Path TCP (MPTCP), которая принята в коммерческих сетях в Южной Корее.

Недостатком этого решения было то, что поскольку распределяются пакеты в потоке через разные пути (то есть, MPLS или Интернет), как показано на рисунке 8. Пакеты, доставленные на принимающую сторону, не находятся в первоначальном порядке, отправленном отправителем. Это ведет к деградации пропускной способности. Чтобы решить эту проблему, необходимо исправление порядка пакетов на принимающей стороне.

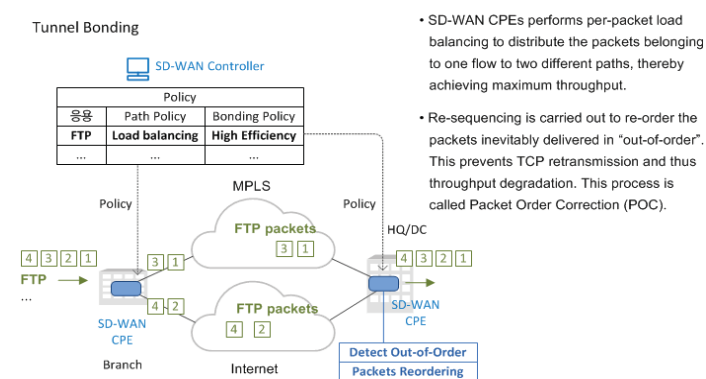


Рис. 8. Мониторинг состояния соединения

### Определение особенностей передачи трафика разного вида

Состояние сетевой инфраструктуры имеет прямое влияние на всю работу компании. На время прохождения пакетов влияют такие факторы как топология сети, пропускная способность линий и гарантированное время задержки, а также текущая нагрузка на линии связи [7-13].

Наиболее эффективным способом для обеспечения требуемого качества на данный момент является заранее распределенные классы трафика и маршруты.

Для корпоративной сети связи можно выделить следующих характерный трафик:

телефония;

видеопотоки;

данные внутри корпоративной сети – использование корпоративных файловых серверов, баз данных, почтового сервера и другой трафик характерный для деятельности компании;

данные при доступе в глобальную сеть Интернет;

данные с облачных сервисов.

При удаленном доступе сотрудников к ресурсам компании необходимо организовывать зашифрованное туннелирование из точки присутствия сотрудника через глобальную сеть [16-17]. Самыми критичными к деградации являются служебный трафик и трафик реального времени – голосовая связь и видеоконференции, поэтому необходимо организовывать телефонию по арендованным каналам связи с гарантированным качеством обслуживания.

С расчетом видеопотока ситуация сложная: потоки, закодированные современными кодеками такими, как H.264, H265 обладают непостоянным битрейтом, поскольку сначала передается опорный кадр, а затем только изменения относительно предыдущего кадра.

Приложения для видеоконференций требуют очень малых задержек; заметные задержки существенно усложняют взаимодействие участников. Именно поэтому приложения для видеоконференций должны использовать небольшой буфер воспроизведения, что делает их очень чувствительными к задержкам и джиттеру. Видеопотоки видеоконференций обычно не требуют высокой скорости передачи данных (менее 1 Мбит/с), поэтому высокая пропускная способность не является обязательным требованием. Однако поскольку видеопоток может передаваться со значительным сжатием и использовать протокол UDP, он весьма чувствителен к потере пакетов.

Вследствие очень высокой степени сжатия, применяемой в видеопотоках высокого разрешения, потеря пакетов становится более важной проблемой. Кроме того, даже после сжатия потоки высокого разрешения могут требовать пропускной способности от 5 до 10 Мбит/с, поэтому пропускная способность также представляет значительную проблему.

В приложениях для передачи видео по запросу обычно используется механизм одноадресной передачи файлов с последующим воспроизведением. В этих приложениях применяется большой буфер воспроизведения, поэтому задержка и джиттер не имеют большого значения. Помимо этого, использование одноадресной передачи по протоколу TCP позволяет задействовать механизм повторной передачи, поэтому потеря пакетов также не играет важной роли. Однако поскольку потоки могут требовать довольно высокой скорости передачи данных (некоторые видеопотоки по запросу приближаются по качеству к видео высокого разрешения), пропускная способность является весьма важным фактором.

Приложения потокового видео в реальном времени включают IP-телевидение (например, трансляция корпоративных мероприятий или передача сигнала кабельного телевидения по IP-сети) и видеонаблюдение. В этих однонаправленных приложениях обычно используется достаточно большой буфер воспроизведения для ограничения требований к качеству обслуживания. Однако в некоторых приложениях размер буфера ограничен в связи с необходимостью быстрого переключения каналов или другими требованиями передачи в реальном времени (например, потоковое видео с несколькими камерами на стадионе, установленными под разными углами, когда пользователи могут также видеть изображение в реальном времени). Поэтому для приложений IP-телевидения задержки и джиттер обычно составляют проблему среднего уровня.

В случаях, когда для повышения эффективности используется многоадресная рассылка, применяется протокол UDP, поэтому потеря пакетов становится более важной проблемой. Скорость передачи данных для приложений потокового видео в реальном времени может меняться, но в некоторых случаях пропускная способность также важна.

Исходя из приведенных данных и учитывая, что основным видеотрафиком по каналам будут конференции, можно задать требования к потоку – 4 Мбит/с, как минимально необходимое значение для конференций в высоком разрешении и достаточным для низкого качества.

### Выбор типа кодека

Для обработки аудио и видео данных используются различные типы кодеков, основанные на разных технологиях. Для оценки качества кодеков используется показатель Mean Opinion Score (MOS). Значения MOS находятся в диапазоне от 1 до 5 (1 – "плохо", 5 – "отлично"). Оценка дается с учетом стандартов P.800 и P.830 ITU-T.

G.711 является стандартом по умолчанию в любом IP-устройстве и наиболее широко используется. Скорость передачи данных в одном направлении составляет 64 кбит/с, с логарифмическим коэффициентом компрессии 1:2 (сокращается 16-битная выборка до 8-битной).

По шкале MOS он имеет значение 4 (см. рис. 9). G.711 можно использовать для VoIP-приложений в локальных сетях, где есть запас доступной пропускной способности.

G.729 – это кодек, который обеспечивает резкое снижение скорости передачи и размера полезной нагрузки, но незначительное снижение качества голоса.

G.729 и G.711 наиболее часто используются в приложениях VoIP. Однако G.729 больше подходит для сетей с ограниченной пропускной способностью и низкой задержкой.

Codec and Packetization Period	G.711 20 ms	G.711 30 ms	G.729 20 ms	G.729 40 ms
Codec bandwidth (kbps)	64	64	8	8
Packetization size (bytes)	160	240	20	40
IP overhead (bytes)	40	40	40	40
VoIP packet size (bytes)	200	280	60	80
Packet rate (pps)	50	33.33	50	25

Рис. 9. Характеристики кодеков

Определяем необходимую пропускную способность сети для реализации VoIP по формуле:

$$B = (P_t \times 8 / 1000) \times N,$$

где  $P_t$  = Payload – итоговый размер пакета, байт;

$$P_t = RP + O,$$

где RP – размер пакетизации, определяемый как

$$RP = (T_{\text{пак}} / 1000) \times (\text{пропускная способность кодека} \times 1000 / 8), \text{ байт на пакет};$$

$T_{\text{пак}}$  – период пакетизации;

O – Overhead – накладные расходы, байт;

N – число пакетов в секунду.

Скорость передачи пакетов в секунду (PPS) можно рассчитать, взяв обратную величину периода пакетирования. Размер пакета – это количество оцифрованного и инкапсулированного голоса в каждом IP-пакете, и он зависит от используемого кодека. В G.711 длительность 20 мс голоса оцифровывается и инкапсулируется в один IP-пакет, поэтому скорость передачи пакетов составляет  $1/20 \text{ мс} = 1/0,02 = 50$  пакетов в секунду. G.711 использует импульсно-кодовую модуляцию (PCM) 8000 отсчетов с 8 битами для каждого отсчета с общей пропускной способностью  $8000 \times 8 = 64$  кбит/с. Эти 64 кбит/с содержат 50 пакетов, что означает размер каждого пакета  $64 \times 1000 / 8 \times 50 = 160$  байт.

На выходе кодека голосовые кадры помещаются в пакеты протокола реального времени (RTP), чтобы придать им необходимую информацию для передачи из конца в конец в режиме реального времени, например, порядковые номера, метки времени.

Накладные расходы, добавляемые протоколом RTP к полезной нагрузке, составляют 12 байтов.

В свою очередь, протокол транспортного уровня User Datagram Protocol (UDP) добавляет накладные расходы в размере 8 байтов.

Накладные расходы, добавляемые протоколом IP, составляют 20 байтов, также Ethernet добавляет 18 байтов.

Не будем добавлять сейчас размер заголовка Ethernet, потому что это будет сделано на последнем этапе после процесса туннелирования

Учтем добавление (без учета накладных расходов на прокладку туннеля и без добавления размера заголовка Ethernet), и получим  $160 + 12 + 8 + 20 = 200$  байт.

### Оценка накладных расходов при использовании протоколов безопасности и туннелирования

Реализация туннелирования приводит к появлению так называемых «накладных расходов», то есть к увеличению доли служебного трафика в передаваемой информации [20–23]. Существует множество протоколов для туннелирования IP-пакетов и кадров, не ориентированных на безопасность. Данные некоторых распространенных протоколов туннелирования с указанием накладных расходов для каждого пакета показаны на рисунке 10.

Protocol	Header Size (bytes)
IPsec transport mode	30–53
IPsec tunnel mode	50–73
L2TP/GRE	24
MPLS	4
PPPoE	8

Рис. 10. Размеры дополнительных заголовков в протоколах безопасности и туннелирования

В технологии IPSec к IP-заголовку добавляется заголовок Encapsulating Security Payload (ESP) для обеспечения аутентификации и шифрования. В транспортном режиме шифруется только полезная нагрузка IP-пакета. В то время как в туннельном режиме шифруется весь IP-пакет, включая заголовок. Шифрование IP-заголовка исключает возможность маршрутизаторов знать следующий хоп пакета и, следовательно, маршрутизировать его, поэтому зашифрованному IP-пакету нужен другой заголовок для использования в процессе маршрутизации.

ESP поддерживает использование списка алгоритмов шифрования и защиты целостности, таких как HMAC. Работа HMAC основана на использовании заданного размера блока в 64 байта. К каждому пакету добавляются 8 байт длины сообщения (включая 1 бит идентификатора процедуры padding). После добавления 8 байт к пакету, если его размер не кратен 64, он должен быть дополнен, чтобы с ним можно было оперировать.

8 байт идентификатора процедуры padding HMAC будут добавлены к пакету размером 200 байт

$$200 + 8 = 208 \text{ байт.}$$

ESP также добавляет некоторые дополнительные данные и накладные расходы:

Заголовок ESP = 8 байт;

Вектор инициализации ESP = 16 байт;

ESP трейлер = 16 байт;

Заголовок туннельного режима = 20 байт.

Размер пакета получается:

$$208 + 8 + 16 + 16 + 20 = 268 \text{ байт.}$$

Теперь мы можем добавить накладные расходы размером 18 байт для заголовка Ethernet канального уровня. Получается:

$$Pt = 268 + 18 = 286 \text{ байт.}$$

Проведем расчет пропускной способности на одно речевое соединение при использовании протокола IPSec по формуле:  $V_{IPSec} = (Pt \times 8 / 1000) \times N$ , где  $t$  – размер пакетизации +  $O = 286$  байт;

$N$  – скорость передачи пакетов,  $N = 50$  pps.

Получаем  $V_{ip-sec} = 114,4$  кбит/с.

При использовании протокола MPLS с размером заголовка равным 4 байта, для создания туннеля рассчитаем накладные расходы:

$$O = Eth + MPLS + IPv4 + UDP + RTP =$$

$$= 18 + 4 + 20 + 8 + 12 = 62 \text{ байт;}$$

$$Pt = \text{размер пакетизации} + O = 160 + 62 = 222 \text{ байт;}$$

$N$  – скорость передачи пакетов,  $N = 50$  пакетов в секунду.

Проведем расчет пропускной способности на одно речевое соединение при использовании MPLS:

$$V_{mpls} = 88,8 \text{ кбит/с.}$$

Таким образом, при использовании протокола безопасности и туннелирования технологии MPLS необходимая пропускная способность сети на одно соединение снижается в  $114,4/88,8 = 1,29$  раза по сравнению с протоколом IPSec.

### Планирование и расчет пропускной способности для корпоративной сети

Процесс планирования телекоммуникационной сети требует проведения необходимых измерений или расчетов трафика [3-6]. Результаты используются для определения топо-

логии сети, величины пропускной способности магистральной группы, необходимых линий для обеспечения связи между подразделениями сети [18-19]. Наиболее чувствительными к задержкам, растущими в спросе и приносящими доход приложениями являются VoIP.

После расчета пропускной способности для одного голосового вызова мы можем рассчитать общую пропускную способность на основе предполагаемого трафика для всех вызовов в Erlang, умноженного на пропускную способность для одного вызова.

В качестве примера рассмотрим корпоративную сеть, которая имеет центральный офис в Москве (200 сотрудников), два филиала в Ярославле (100 сотрудников) и Нижнем Новгороде (150 сотрудников).

Таблица 1

### Результаты расчета интенсивности телефонной нагрузки в ЧНН

Филиал	Москва	Ярославль	Нижний Новгород
Число сотрудников	200	150	100
Объем трафика (минуты/день)	9600	7200	4800
ЧНН (минуты)	1632	1224	816
Интенсивность трафика (Эрл)	27,2	20,4	13,6

Необходимы возможности доставки трафика для реализации VoIP (в переводе на количество каналов и требуемую пропускную способность), поэтому нам нужно рассчитать трафик в час наибольшей нагрузки (ЧНН) в Erlang [25-28].

Трафик в ЧНН можно рассчитать, взяв процент от общего количества ежедневных минут звонков в ЧНН (см. табл. 1). В отрасли связи по умолчанию используется коэффициент в ЧНН (17%) с процентом блокированных вызовов или Blocking Target (1%).

Результаты расчета требуемой пропускной способности в килобайтах для каждого филиала компании представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Результаты расчета требуемой пропускной способности

Кбит/с	Москва	Ярославль	Нижний Новгород
IPSec	3112	2333	1556
MPLS	2415	1811	1208

Сравнивая требуемую пропускную способность при использовании MPLS и IPSec для конкретной корпоративной сетевой структуры, видим, что использование технологии MPLS позволяет существенно, до 30% экономить пропускную способность сети.

### Заключение

1. Проанализированы изменения в подходах и методах организации сетевых структур для достоверной и защищенной передачи информации между пользователями корпоративных сетей, развернутых на базе общедоступного Интернет и с привлечением ресурсов сетей MPLS.

2. Рассмотрены возможные подходы к защите трафика, их влияние на качество связи, а также чувствительность разных

видов трафика к потерям пакетов и их задержкам. На пути к адресу назначения информационные пакеты проходят через множество различных сетей. Протоколы передачи информации в сетях различаются. Для преодоления этой проблемы выполняется туннелирование, то есть упаковка пакетов внутри других пакетов, использующих протоколы, которые поддерживаются на конкретном участке сети. Процесс туннелирования позволяет устанавливать безопасное зашифрованное соединение между пользователями различных сетей.

2. Проведенные анализ и расчет показали, что при использовании протокола безопасности и туннелирования технологии MPLS необходимая пропускная способность сети на одно соединение снижается в 1,29 раза по сравнению с протоколом IPSec.

3. Создание туннеля с гарантированными требованиями к качеству связи для такого высокочувствительного приложения, как VoIP, с использованием MPLS существенно экономит пропускную способность по сравнению с IPSec-протоколом безопасного туннелирования, используемого в VoIP.

### Литература

1. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е издание. Санкт-Петербург: Питер, 2018. 992 с.
2. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 304 с.
3. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 235 с.
4. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 290 с.
5. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 868 с.
6. Степанова И. В., Абдулвасеев М. О. А., Жуев Н. Анализ перспективных подходов к повышению надежности конвергентных корпоративных сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9, №12. С. 44-51.
7. Бикмухамедов Р.Ф., Надеев А.Ф. Генеративные модели на базе нейросетевой архитектуры Transformer для классификации и моделирования сетевого трафика // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №11. С. 64-71.
8. Буслаев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели трафика информации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №3. С. 22-38.
9. Калмыков Н.С., Докучаев В.А. Сегментная маршрутизация как основа программно-конфигурируемой сети // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №7. С. 50-54.
10. Степанов С.Н., Васильев А.П. Построение и анализ модели с динамическим распределением канального ресурса при обслуживании мультисервисного трафика в сетях IMS/LTE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №1. С. 29-36.
11. Степанов С.Н., Васильев А.П. Построение и анализ модели совместного обслуживания линией доступа трафика реального времени и эластичного трафика данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №2. С. 55-61.
12. Шелухин О.И., Барков В.В. Влияние фонового трафика на эффективность классификации трафика мобильных приложений методами интеллектуального анализа данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 52-57.
13. Киреева Н.В., Караулова О.А. Оценка аномалий сетевого трафика на основе циклического анализа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №11. С. 28-33.
14. Степанов С.Н., Шишкин М.О., Сосновиков Г.К., Степанов М.С., Воробейчиков Л.А., Журко А.М. Анализ модели call-центра при перегрузке // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №10. С. 68-76.
15. Степанов С.Н., Шишкин М., Степанов М.С., Журко А. Разработка и анализ модели call-центра в условиях перегрузки // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №7. С. 42-50.
16. Степанов С.Н., Степанов М.С., Маликова Е.Е., Цогбадрах А., Ндайкиунда Ж. Построение и анализ обобщенной модели разделения ресурса для LTE технологий с функциональностью NB-IoT // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №12. С. 71-77.
17. Степанов С.Н., Ндайкиунда Жуев, Канищева М.Г. Модель распределения ресурсов с резервированием для LTE технологии с функциональностью NB-IoT // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №11. С. 69-76.
18. Ибрагимов Б.Г., Гумбатов Р.Т., Ибрагимов Р.Ф. Производительность мультисервисных телекоммуникационных сетей на базе архитектурной концепции FN с использованием технологии SD // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №12. С. 84-88.
19. Шведов А.В., Гадасин Д.В., Алёшинцев А.В. Сегментная маршрутизация в сетях передачи данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 56-62.
20. Деарт В.Ю., Фатхулин Т.Д. Анализ процесса создания суперканала с необходимой пропускной способностью в сети, построенной по технологии транспортных программно-конфигурируемых сетей (T-SDN) // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 23-30.
21. Деарт В.Ю., Фатхулин Т.Д. Анализ транспортных программно-конфигурируемых сетей (T-SDN) с управляемым оптическим уровнем с целью получения модели, позволяющей оценить возможность предоставления сервиса bandwidth on demand // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №4. С. 35-42.
22. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №2. С. 17-24.
23. Карташевский И.В., Сапрыкин А.В. Анализ времени ожидания заявки в очереди для системы массового обслуживания общего вида // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №2. С. 4-10.
24. Оркин В.В., Легков К.Е. Алгоритм выбора процедур распределенного программного управления потоками заявок в информационной системе в условиях возмущений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 41-45.
25. Ибрагимов Б.Г., Биннатов М. Ф., Исаев Я.С. Исследование пропускной способности сетей NGN/IMS при установлении мультимедийной сессии // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №3. С. 9-12.
26. Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка алгоритма многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №9. С. 17-23.
27. Тутов А.В., Тутова Н.В., Ворожцов А.С., Андреев И.А. Многокритериальная оптимизация размещения виртуальных машин по физическим серверам в облачных центрах обработки данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №1. С. 28-34.
28. Заин-аалабадин аль-Намер. Нормирование основных параметров качества сетевых услуг // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №11. С. 72-76.

## INFLUENCE FACTORS ON THE PACKET SWITCHING NETWORKS CAPACITY

**IRINA V. STEPANOVA,**

Moscow, Russia

**ELENA K. PATENCHENKOVA,**

Moscow, Russia

**KNAZH NUMA,**

Moscow, Russia

**KEYWORDS:** *Infocommunication networks applications, Data packets, Bandwidth, Virtual Private Network (VPN), Internet Protocol Security (IPsec), Multi Protocol Label Switching (MPLS), Label Switching Routers (LSR), Tunneling*

### ABSTRACT

**Introduction:** The architecture of a corporate network is a complex that incorporates everything necessary to ensure network security, scalability and stability. Instead of creating a separate physical network that is costly to purchase, install, and maintain, a VPN solution over the existing public Internet is emerging as a promising solution for many corporations. As new services and functions are introduced, the list of protocols used is rapidly growing, which complicates the network, and accordingly complicates network management. **Result:** As a research task, the authors determine the impact of protection and traffic management methods in packet switching

networks to determine the set of factors influencing network throughput. The hierarchical structure of the network is analyzed, the possibilities of using Internet resources and network structures of Multi Protocol Label Switching MPLS technology are assessed. The use of the IPsec protocol based on the public Internet and MPLS technology protocols is discussed and compared. The results of assessing the influence of the choice of protocol on the required information transfer speed are presented. The material of the article can be used as an additional resource when conducting course design in the discipline "Switching and routing technologies in infocommunication networks"

### REFERENCES

1. V. Olifer, N. Olifer. Computer networks. Principles, technologies, protocols: Textbook for universities. 5th edition. St. Petersburg: Peter, 2018. 992 p.
2. A.B. Goldshtein, B.S. Goldshtein. MPLS technology and protocols. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2014. 304 p.
3. V.P. Koryachko, D.A. Perepelkin. Analysis and design of data transmission routes in corporate networks. Moscow: Hotline – Telecom, 2020. 235 p.
4. B.Ya. Lichtzinder. Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design). Moscow: Hotline – Telecom, 2018. 290 p.
5. S.N. Stepanov. Teletraffic theory: concepts, models, applications. Moscow: Hotline – Telecom, 2015. 868 p.
6. I.V. Stepanova, M.O.A. Abdulvasea, N. Zhuven. Analysis of promising approaches to increasing the reliability of convergent corporate communication networks. *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 12, pp. 44-51.
7. F. Bismukhamedov, A.F. Nadeev. Generative transformer framework for network traffic generation and classification. *T-Comm*. 2020. Vol. 14, no.11, pp. 64-71. (in Russian)
8. A.P. Buslaev, D.A. Kucheleev, M.V. Yashina. Dynamical systems and mathematical models of information traffic. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.3, pp. 22-38. (in Russian)
9. N.S. Kalmykov, V.A. Dokuchaev. Segment routing as a basis for software defined network. 2021. *T-Comm*. Vol. 15, no.7, pp. 50-54. (in Russian)
10. S.N. Stepanov, A.P. Vasiliev. The construction and analysis of a model with dynamic distribution of the channel resource for maintenance of multiservice traffic in IMS/LTE network. 2019. *T-Comm*. Vol. 13, no.1, pp. 29-36. (in Russian)
11. S.N. Stepanov, A.P. Vasiliev. The construction and analysis of the model of joint servicing the real time and elastic traffic streams by access line. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.2, pp. 55-61.
12. O.I. Sheluhin, V.V. Barkov. Influence of background traffic on the effectiveness of mobile applications traffic classification using data mining techniques. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.10, pp. 52-57.
13. N.V. Kireeva, O.A. Karaulova. Evaluation of network traffic anomalies based on cyclic analysis. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.11, pp. 28-33. (in Russian)
14. S.N. Stepanov, M.O. Shishkin, G.K. Sosnovikov, M.S. Stepanov, L.A. Vorobeychikov, H.M. Zhurko. The analysis of call center model in case of overload. 2019. *T-Comm*. Vol. 13, no.10, pp. 68-76.
15. S.N. Stepanov, M.O. Shishkin, M.S. Stepanov, H.M. Zhurko. The construction and analysis of call-center model in overload traffic condition. 2020. *T-Comm*. Vol. 14, no.7, pp. 42-50. (in Russian)
16. S.N. Stepanov, M.S. Stepanov, E.E. Malikova, A. Tsogbadrakh, Ju. Ndayikunda. The construction and analysis of generalized model of resource sharing for LTE technology with functionality of NB-IoT. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.12, pp. 71-77.
17. S.N. Stepanov, Juvent Ndayikunda, M.G. Kanishcheva. Resource allocation model for LTE technology with functionality of NB-IoT and reservation. 2021. *T-Comm*. Vol. 15, no.11, pp. 69-76. (in Russian)



18. B.G. Ibrahimov, R.T. Humbatov, R.F. Ibrahimov. Analysis performance multiservice telecommunication networks with using architectural concept future networks. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.12, pp. 84-88.
19. A.V. Shvedov, D.V. Gadasin, A.V. Alyoshintsev. Segment routing in data transmission networks. 2022. *T-Comm*. Vol. 16, no.5, pp. 56-62. (in Russian)
20. V.Yu. Deart, T.D. Fatkhulin. Analysis of the process of creating a superchannel with the necessary capacity in the network organized according to transport software-defined networks (T-SDN) technology. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.10, pp. 23-30. (in Russian)
21. V.Yu. Deart, T.D. Fatkhulin. Analysis of transport software-defined networks (T-SDN) with controlled optical layer to obtain a model providing assesment of the possibility of bandwidth on demand service. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.4, pp. 35-42. (in Russian)
22. A.V. Ryzhkov, M.L. Schwartz. Ways of forming a precision time scale of the national communication network. 2020. *T-Comm*. Vol. 14, no.2, pp. 17-24. (in Russian)
23. I.V. Kartashevskiy, A.V. Saprykin. Waiting time analysis for the request in general queuing system. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.2, pp. 4-10. (in Russian)
24. V.V. Orkin, K.E. Legkov. Algorithm of distributed management by streamlines of applications in the information system under the conditions of disturbances. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.10, pp. 41-45. (in Russian)
25. B.G. Ibrahimov, M.F. Binnatov, Ya.S. Isayev. The investigation of the throughput NGN/IMS networks during the establishment for multimedia session. 2018. *T-Comm*. Vol. 12, no.3, pp. 9-12. (in Russian)
26. A.S. Volkov, A.E. Baskakov. Development of a multipath routing algorithm in software-defined communication networks. 2021. *T-Comm*. Vol. 15, no.9, pp. 17-23. (in Russian)
27. A.V. Toutov, N.V. Toutova, A.S. Vorozhtsov, I.A. Andreev. Multi-objective optimization of virtual machine placement on physical servers in cloud data centers. 2021. *T-Comm*. Vol. 15, no.1, pp. 28-34. (in Russian)
28. Zain-aalabdain Al-namer. Rationing the main parameters of the Quality of Network services. 2010. *T-Comm*. Vol. 14, no.11, pp. 72-76. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Irina V. Stepanova**, Associate Professor, teacher of the Department of SSiSK, Ph.D., MTUCI, Moscow, Russia, w515iv@mail.ru

**Elena K. Patenchenkova**, Senior Lecturer of the Department of SSiSK MTUCI, Moscow, Russia

**Knazh Numa**, PhD student at MTUCI, Moscow, Russia

---

**For citation:** Stepanova I.V., Patenchenkova E.K., Knazh Numa. Influence factors on the packet switching networks capacity. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No. 5. P. 18-27. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-18-27 (In Rus)

## МЕТОДЫ ПЕРЕЧИСЛЕНИЯ ПУТЕЙ В ГРАФЕ

КУДЕЛЯ

Виктор Николаевич<sup>1</sup>

### АННОТАЦИЯ

**Введение:** Для современных систем управления государством и предприятием, систем связи и автоматизации, информационных систем и систем энергетики, транспортных систем характерны значительный территориальный размах, огромное количество объектов, потоки высокой интенсивности (информации, энергии, грузов и т.д.), сложная структура соединений и непредсказуемый характер качества ресурсов. **Методы:** Точный анализ и оптимизация функционирования таких распределенных систем относятся к числу очень сложных проблем, методов решения для которых, на текущий момент времени в аппарате дискретной математики недостаточно. Для удобства описания и анализа таких систем, как правило, используется аппарат теории графов. Граф является единственным математическим объектом, объединяющим структурное и потоковое содержания задач дискретной математики. Как следствие, исключительная популярность в областях науки, связанных с сетевыми структурами. В середине прошлого века сформировалась математическая гипотеза NP-полных задач. Суть гипотезы заключается в том, что задачи переборного типа невозможно решить за приемлемое время. Начиная с этого времени исследования методов перебора практически прекратились. Представленные материалы предлагают к рассмотрению инверсионный метод перебора путей в графе и более расширенное описание метода узел-графов. **Цель:** представить базовый инструментарий снижения сложности класса NP-полных задач, сохраняя универсальность и точность полного перебора.

### Сведения об авторах:

<sup>1</sup>д.т.н., ведущий специалист  
ЗАО "Институт сетевых технологий",  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
Kudelia.Viktor@int.spb.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** граф, задача перечисления, перебор, путь, гамильтонов путь.

---

**Для цитирования:** Куделя В.М. Методы перечисления путей в графе // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 28-38. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-28-38

## Введение

Для современных систем управления государством и предприятием, систем связи и автоматизации, информационных систем и систем энергетики, транспортных систем характерны значительный территориальный размах, огромное количество объектов, потоки высокой интенсивности (информации, энергии, грузов и т.д.), сложная структура соединений и непредсказуемый характер качества ресурсов. Точный анализ и оптимизация функционирования таких распределенных систем относятся к числу очень сложных проблем, методов решения для которых, на текущий момент времени в аппарате дискретной математики недостаточно.

Для удобства описания и анализа таких систем, как правило, используется аппарат теории графов. Граф является единственным математическим объектом, объединяющим структурное и потоковое содержания задач дискретной математики. Как следствие, исключительная популярность в областях науки, связанных с сетевыми структурами [1-7]. Но следует отметить, в плане объема вычислений, что самые востребованные задачи на графах, как правило, входят в список NP-полных задач, не имеющих полиномиальных методов решения [8]. В этой связи представляются важными, как разработка новых математических методов решения задач, так и решение сопутствующих им вычислительных проблем.

Автор разработал три метода полного перебора путей в графе:

- метод транспонирования [9];
- инверсный метод;
- метод узел-графов [9].

Методы демонстрируются на задаче перечисления в терминологии [8]. Задачи перечисления графовых структур (путей, деревьев и др.) представляют собой достаточно хорошо проработанную часть теории графов. Существуют методы пересчета различного назначения: методы пересчета путей в графе [9-12], методы пересчета всех разбиений множества на подмножества [13,14], методы, пересчитывающие перестановки и сочетания [15,16] и т.д.

Пересчет обычно реализуется каким-либо методом перебора [17-20]. Из задач перечисления автор остановился на задаче перечисления гамильтоновых путей. Постановка задачи перечисления гамильтоновых путей: задан граф  $G[V, E]$ , какова мощность  $m$  множества гамильтоновых путей в графе, то есть, сколько их в графе. Также как и [9] в материалах под путем понимается последовательность дуг, в которой конечная вершина всякой дуги, в отличие от последней, является начальной вершиной для следующей. Другими словами, путь – последовательность смежных вершин. Простой путь – путь, в котором вершины не повторяются. Длина пути – число дуг, которые его образуют. Итоговым результатом перечисления является количество гамильтоновых путей. Гамильтонов путь, это простой путь, содержащий все вершины графа.

При оценке методов автор использовал понятие «объем перебора» [9]. В отличие от вычислительной сложности, объем перебора включает в себя количество входных данных (длина входа), требуемых для представления графа, ко-

личество промежуточных результатов (объекты перебора), формируемых при переходе от пути длины  $p$  к пути длины  $p + 1$ , и количество выходных данных (длина выхода). При этом количество элементарных операций с объектом перебора не учитывается. По мнению автора, именно объем перебора определяет функцию сложности решения задачи.

## Инверсный метод перебора

Под инверсией автор понимает процесс пространственного переворачивания вплоть до противоположности (например, зеркальности) процесса перебора: обращение функций, изменение процедур и операций с результатами. Инверсный метод разработан как противоположность метода транспонирования [9].

### 0.1 Задание графа

Граф  $G[V, E]$  представляется матрицей дуг  $V$  размера  $v \times v$ .

### 0.2 Перебор путей в графе

Перебор путей в графе  $G[V, E]$ , заданном матрицей  $V$ , осуществляется формированием таблиц путей  $A^q$  размером  $v \times v$ . Элементом  $a_{ij}^q$  таблицы  $A^q$  является последовательность вершин – путь длины  $p$ ,  $p = \overline{1, (v-1)}$ . Совокупность всех таблиц  $A^q$  определяет всю карту перебора.

Инверсный метод перебора описывается многошаговым циклическим процессом и завершается фиксацией мощности множества гамильтоновых путей  $m$ .

Во всех таблицах путей первая вершина пути соответствует букве  $s$ , а последняя –  $t$ .

Пусть граф задан матрицей дуг  $V$ ,  $v \geq 3$ .

Шаг 1. Положим  $p = 1$ ,  $m = 0$ . Таблица путей  $A^0 = V$ . Если  $p = v - 1 = 2$ , то переходим на шаг 10, если нет, то – на шаг 2.

Шаг 2. Пусть  $p = p + 2$  и переходим на шаг 3.

Шаг 3. Пусть  $q = \overline{1, b}$  ( $b$  – количество значимых элементов матрицы  $A^0$ ). Формируем таблицы путей  $A^q$  размером  $v \times v$ , где в каждую ячейку таблицы, если  $a_{ij}^0 \neq 0 \wedge i \neq j \wedge i \in a_{ij}^0 \wedge j \in a_{ij}^0$ , прописываем один элемент из таблицы  $A^0$ . Переходим на шаг 4.

Шаг 4. Положим  $q = 0$  и переходим на шаг 5.

Шаг 5. Положим  $q = q + 1$ . Формируем таблицы-строки  $C$  и таблицы-столбцы  $H$  для каждой  $A^q$ : если  $a_{ij}^q \neq 0$ , то  $c_{tj} = v_{tj}$  и  $h_{is} = v_{it}$ , где  $s \in a_{ij}^q$  и  $t \in a_{ij}^q$ . Переходим на шаг 6.

Шаг 6. Если  $a_{ij}^q \neq 0 \wedge c_{tj} \neq 0 \wedge h_{is} \neq 0$ , то в  $a_{ij}^q$  добавляем вершины  $a_{ij}^q = i + a_{ij}^q + j$ . Если  $p = v - 1$ , то  $m = m + 1$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7. Если  $q \neq b$ , то переходим на шаг 5, в противном случае на шаг 8.

Шаг 8. Если  $p = v - 1$ , то переходим на шаг 11, в противном случае на шаг 9.

Шаг 9. Формируем таблицу  $A^0 = \begin{pmatrix} A^1 \\ \dots \\ A^q \end{pmatrix}$  композицией

(сращиванием) по вертикали таблиц  $A^q$ , сортируем элементы таблицы  $A^0$ . Сортировка элементов таблицы - это замена нулевых элементов на значимые сверху вниз в рамках столбца, удаление строки, имеющей только нулевые элементы. Оставшиеся строки нумеруются в порядке следования вниз. Если  $v - p > 2$ , то переходим на шаг 2. Если  $v - p = 2$ , то переходим на шаг 10.

Шаг 10. Для  $\forall a_{kj}^0 \neq 0$ , если  $t \in a_{kj}^0 \wedge v_{ij} \neq 0 \wedge j \notin a_{kj}^0$ , то  $a_{kt}^0 = a_{kt}^0 + j$  и  $m = m + 1$ , в противном случае  $a_{kt}^0 = 0$ . Где  $k$  – количество строк в таблице  $A^0$ ,  $i = \overline{1, v}$ ,  $j = \overline{1, v}$ . Переходим шаг 11.

Шаг 11. Конец.

### 0.3 Решение примера

Для демонстрации адекватности и точности инверсного метода воспользуемся примером из [9]. Пусть граф  $G[V, E]$  задан матрицей дуг  $V$  вида:

$$V = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 1,2 & 1,3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2,3 & 2,4 & 2,5 \\ 3 & 0 & 3,2 & 0 & 3,4 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 4,3 & 0 & 4,5 \\ 5 & 5,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Замечание. В матрице  $V$  запятая использована для разделения чисел, обозначающих смежные вершины.

Шаг 1.  $p = 1$ ,  $m = 0$ ,  $A^0 = V$  и переходим на шаг 2.

$$A^0 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 1,2 & 1,3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 2,3 & 2,4 & 2,5 \\ 3 & 0 & 3,2 & 0 & 3,4 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 4,3 & 0 & 4,5 \\ 5 & 5,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Шаг 2.  $p = p + 2 = 3$  и переходим на шаг 3.

Шаг 3.  $b = 10$ ,  $q = \overline{1, 10}$ .

$$A^1 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1,2 & 1,2 \\ 4 & 0 & 0 & 1,2 & 0 & 1,2 \\ 5 & 0 & 0 & 1,2 & 1,2 & 0 \end{array}$$

$$A^2 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1,3 & 1,3 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1,3 & 0 & 0 & 1,3 \\ 5 & 0 & 1,3 & 0 & 1,3 & 0 \end{array}$$

$$A^3 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 2,3 & 2,3 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 2,3 & 0 & 0 & 0 & 2,3 \\ 5 & 2,3 & 0 & 0 & 2,3 & 0 \end{array}$$

$$A^4 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 2,4 & 0 & 2,4 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2,4 & 0 & 0 & 0 & 2,4 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2,4 & 0 & 2,4 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^5 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 2,5 & 2,5 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2,5 & 0 & 0 & 2,5 & 0 \\ 4 & 2,5 & 0 & 2,5 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^6 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 3,2 & 3,2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3,2 & 0 & 0 & 0 & 3,2 \\ 5 & 3,2 & 0 & 0 & 3,2 & 0 \end{array}$$

$$A^7 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 3,4 & 0 & 0 & 3,4 \\ 2 & 3,4 & 0 & 0 & 0 & 3,4 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3,4 & 3,4 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^8 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 4,3 & 0 & 0 & 4,3 \\ 2 & 4,3 & 0 & 0 & 0 & 4,3 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 4,3 & 4,3 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^9 = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 4,5 & 4,5 & 0 & 0 \\ 2 & 4,5 & 0 & 4,5 & 0 & 0 \\ 3 & 4,5 & 4,5 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

$$A^{10} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 5,1 & 5,1 & 0 \\ 3 & 0 & 5,1 & 0 & 5,1 & 0 \\ 4 & 0 & 5,1 & 5,1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Переходим на шаг 4.

Шаг 4.  $q = 0$ .  $v - p = 2 \geq 2$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 1$ .

		$c_{2,j}$				
		0	0	2,3	2,4	2,5
$h_{i1}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0
0	3	0	0	0	1,2	1,2
0	4	0	0	1,2	0	1,2
5,1	5	0	0	1,2	1,2	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

		$c_{2,j}$				
		0	0	2,3	2,4	2,5
$h_{i1}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0
0	3	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
5,1	5	0	0	5,1,2,3	5,1,2,4	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 2$ .

		$c_{3,j}$				
		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i1}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	1,3	1,3
0	3	0	0	0	0	0
0	4	0	1,3	0	0	1,3
5,1	5	0	1,3	0	1,3	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

		$c_{3,j}$				
		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i1}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0
0	3	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
5,1	5	0	5,1,3,2	0	5,1,3,4	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 3$ .

		$c_{3,j}$				
		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	0	2,3	2,3
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	0	0	0	0	0
0	4	2,3	0	0	0	2,3
0	5	2,3	0	0	2,3	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

		$c_{3,j}$				
		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	0	1,2,3,4	0
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 4$ .

		$c_{4,j}$				
		0	0	4,3	0	4,5
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	2,4	0	2,4
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	2,4	0	0	0	2,4
0	4	0	0	0	0	0
0	5	2,4	0	2,4	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

		$c_{4,j}$				
		0	0	4,3	0	4,5
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	1,2,4,3	0	1,2,4,5
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	0	0	0	0	3,2,4,5
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 5$ .

		$c_{5,j}$				
		5,1	0	0	0	0
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	2,5	2,5	0
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	2,5	0	0	2,5	0
0	4	2,5	0	2,5	0	0
0	5	0	0	0	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

		$c_{5,j}$				
		5,1	0	0	0	0
$h_{i2}$		1	2	3	4	5
1,2	1	0	0	0	0	0
0	2	0	0	0	0	0
3,2	3	3,2,5,1	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 6$ .

$c_{2j}$		0	0	2,3	2,4	2,5
$h_{i3}$		1	2	3	4	5
1,3	1	0	0	0	3,2	3,2
2,3	2	0	0	0	0	0
0	3	0	0	0	0	0
4,3	4	3,2	0	0	0	3,2
0	5	3,2	0	0	3,2	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

$c_{2j}$		0	0	2,3	2,4	2,5
$h_{i3}$		1	2	3	4	5
1,3	1	0	0	0	1,3,2,4	1,3,2,5
2,3	2	0	0	0	0	0
0	3	0	0	0	0	0
4,3	4	0	0	0	0	4,3,2,5
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 7$ .

$c_{4j}$		0	0	4,3	0	4,5
$h_{i3}$		1	2	3	4	5
1,3	1	0	3,4	0	0	3,4
2,3	2	3,4	0	0	0	3,4
0	3	0	0	0	0	0
4,3	4	0	0	0	0	0
0	5	3,4	3,4	0	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

$c_{4j}$		0	0	4,3	0	4,5
$h_{i3}$		1	2	3	4	5
1,3	1	0	0	0	0	1,3,4,5
2,3	2	0	0	0	0	2,3,4,5
0	3	0	0	0	0	0
4,3	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 8$ .

$c_{3j}$		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i4}$		1	2	3	4	5
0	1	0	4,3	0	0	4,3
2,4	2	4,3	0	0	0	4,3
3,4	3	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	4,3	4,3	0	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

$c_{3j}$		0	3,2	0	3,4	0
$h_{i4}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
2,4	2	0	0	0	0	0
3,4	3	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 9$ .

$c_{5j}$		5,1	0	0	0	0
$h_{i4}$		1	2	3	4	5
0	1	0	4,5	4,5	0	0
2,4	2	4,5	0	4,5	0	0
3,4	3	4,5	4,5	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

$c_{5j}$		5,1	0	0	0	0
$h_{i4}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
2,4	2	2,4,5,1	0	0	0	0
3,4	3	3,4,5,1	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q \neq 10$ , переходим на шаг 5.

Шаг 5.  $q = q + 1 = 10$ .

$c_{1j}$		0	1,2	1,3	0	0
$h_{i5}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
2,5	2	0	0	5,1	5,1	0
0	3	0	5,1	0	5,1	0
4,5	4	0	5,1	5,1	0	0
0	5	0	0	0	0	0

Переходим на шаг 6.

Шаг 6.

$c_{1j}$		0	1,2	1,3	0	0
$h_{i5}$		1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
2,5	2	0	0	2,5,1,3	0	0
0	3	0	0	0	0	0
4,5	4	0	4,5,1,2	4,5,1,3	0	0
0	5	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Переходим шаг 7.

Шаг 7.  $q = 10$ , переходим на шаг 8.

Шаг 8.  $p \neq 4$  формируем таблицу  $A^0$ .

$$A^0 =$$

	1	2	3	4	5
1	3,2,5,1	5,1,3,2	5,1,2,3	5,1,2,4	1,2,4,5
2	2,4,5,1	4,5,1,2	1,2,4,3	5,1,3,4	3,2,4,5
3	3,4,5,1	0	2,5,1,3	1,2,3,4	1,3,2,5
4	0	0	4,5,1,3	1,3,2,4	4,3,2,5
5	0	0	0	0	1,3,4,5
6	0	0	0	0	2,3,4,5

$v - p = 2$ , переходим на шаг 10.

Шаг 10.  $k = \overline{1,6}$ ,  $i = \overline{1,5}$ ,  $j = \overline{1,5}$

$$A^0 =$$

	1	2	3	4	5
1	0	5,1,3,2,4	5,1,2,3,4	5,1,2,4,3	0
2	2,4,5,1,3	4,5,1,2,3	0	0	3,2,4,5,1
3	3,4,5,1,2	0	2,5,1,3,4	1,2,3,4,5	0
4	0	0	4,5,1,3,2	1,3,2,4,5	4,3,2,5,1
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2,3,4,5,1

$m = 13$ . Переходим шаг 11.

Шаг 11. Конец.

#### 0.4 Некоторые результаты анализа метода

1. Основное отличие инверсного метода от других заключается в следующем. В существующих методах перебора переход к пути длины  $p + 1$  осуществляется процедурами последовательного исследования возможности добавления и добавления вершины в состав каждого пути. В инверсном методе используется процедуры одновременного исследования возможности добавления и добавления в состав одного пути (как в его начало, так и в его конец) всех вершин, не входящих в него. Данный эффект достигается размножением результатов перебора (Шаг 3 многошагового циклического процесса).

2. Инверсный метод формирует пути через некоторое множество вершин в разных направлениях.

3. Несмотря на то, что инверсный метод размножает результаты перебора, объем перебора меньше, чем решение этой же задачи методом транспонирования [9] и не превышает  $\frac{8}{3\sqrt{3}}v!$ , где  $\frac{8}{3\sqrt{3}}$  – квадратная ледяная постоянная Либана.

#### Узел-граф

Задание графа

Определение 1. Узел-граф – это кластер подмножеств упорядоченных вершин.

Схемное представление узел-графа имеет вид

$$\begin{bmatrix} y \\ s \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ t \end{bmatrix}.$$

Здесь  $y$  – число путей, проходящих через тело  $U$ , а  $w = \overline{1, n}$  – номер узел-графа  $n = |N|$  в совокупности.

Замечание. Точка с запятой использованы для разделения чисел, обозначающих вершины, не имеющие признака смежности в подмножестве.

#### 0.5 Действия с узел-графами

В представленных материалах описана не только операция добавления (удаления) вершин и дуг в графе [9], но и объединение графов.

Узел-граф определяется следующими отношениями в подмножествах и между подмножествами:

1. Тело узел-графа  $U$  – подмножество последовательностей смежных вершин (подмножество путей)  $U \subset V$ ,  $u = |U|$  – мощность множества  $U$ ,  $u = \overline{1, v}$ .

2. Путь из какой-либо вершины в себя, существует всегда – это путь длины  $p = 0$ .

3. Исток узел-графа  $S$  – подмножество несвязанных вершин  $S \subset V$ ,  $s = |S|$  – мощность множества  $S$ ,  $s = \overline{0, v-1}$ .

4. Исток узел-графа размещается слева от тела. Вершина из  $S$  имеет только исходящую дугу к вершине из  $U$ ,  $S \not\subset U$ .

5. Сток узел-графа  $T$  – подмножество несвязанных вершин  $T \subset V$ ,  $t = |T|$  – мощность множества  $T$ ,  $t = \overline{0, v-1}$ .

6. Сток размещается справа от тела. Вершина из  $T$  имеет только входящую дугу от вершины из  $U$ ,  $T \not\subset U$ .

7. Теологические параметры узла-графа  $u$  и  $w$  характеризуют математический объект. Данные поля являются дополнительными, их наличие и количество не является обязательным. Это могут быть:

– внутренние параметры узел-графа: количество элементов в узел-графе, вес, длина, стоимость и т.д.

– параметры моделируемого объекта: среда функционирования объекта, технические характеристики и т.д.

8. Совокупность из  $v$  узел-графов, у которых  $u = 1$  полностью описывает граф  $G[V, E]$ , то есть является представлением графа.

Пусть дан граф  $G[V, E]$ , изображенный на рисунке 1.

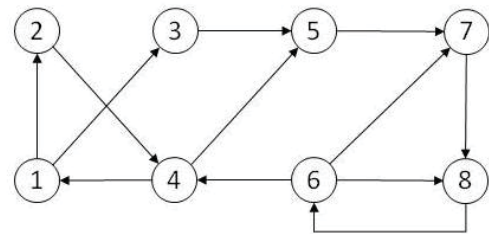


Рис. 1. Граф  $G[V, E]$

Тогда символьным представлением этого графа является следующее упорядоченное множество узел-графов:

$$c_j = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2,3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2 \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} 3 \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 4 \\ 2,6 \end{bmatrix} 4 \begin{bmatrix} 4 \\ 1,5 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3,4 \end{bmatrix} 5 \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6 \begin{bmatrix} 6 \\ 4,7,8 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 5,6 \end{bmatrix} 7 \begin{bmatrix} 7 \\ 8 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 6,7 \end{bmatrix} 8 \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix}$$

Добавление вершин в тело узел-графа  $U = i + U + j$  является стандартная операция добавления вершины к графу со следующими логическими и численными соотношениями:

–  $S \neq \emptyset$  и  $T \neq \emptyset$ ;

– добавляются только вершины  $i$  и  $j$ ,  $i \in S$  и  $j \in T$ ,  $S$  и  $T$  узел-графа заменяются на сток и исток вершин  $i$  и  $j$  в представлении графа;

– при добавлении вершин  $i$  и  $j$  к множеству вершин тела  $U = i + U + j$  подразумевается и добавление дуги, соединяющей вершины  $i$  и  $j$  с телом узел-графа;

– из  $S$  и  $T$  нового узел-графа удаляются вершины, принадлежащие  $U$  вместе с инцидентными им дугами:  $S = S - (S \cap U)$ ,  $T = T - (T \cap U)$ , где  $\cap$  операция пересечения графов;

– пересчитываются значения параметров  $u$  и  $w$  узел-графа.

Добавление одной вершины с одной из сторон является частным случаем добавления вершин в узел-граф.

Пусть заданы три узел-графа  $\begin{bmatrix} y_1 \\ S_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ T_1 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} y_2 \\ S_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ T_2 \end{bmatrix}$  и  $\begin{bmatrix} y_3 \\ S_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ T_3 \end{bmatrix}$ , а двухсторонняя операция объединения узел-

графов обозначается  $^+ \cup ^+$ . Объединением узел-графов называется узел-граф  $\begin{bmatrix} y \\ S \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ S_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ T_1 \end{bmatrix} ^+ \cup ^+ \begin{bmatrix} y_2 \\ S_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ T_2 \end{bmatrix} ^+ \cup ^+ \begin{bmatrix} y_3 \\ S_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ T_3 \end{bmatrix}$  со следующими отношениями и действиями:

–  $U_1 \cap U_2 \cap U_3 = \emptyset$ ;

–  $U = U_1 + i \cup U_2 + j \cup U_3$ , где  $+$  - операция добавления вершины,  $\cup$  - операция объединения графов,  $i \in T_1, i \in S_2, j \in T_2, j \in S_3$ ;

–  $S = S_1, T = T_3$ ;

– из  $S$  и  $T$  нового узел-графа удаляются вершины, принадлежащие  $U$  вместе с инцидентными им дугами:  $S = S - (S \cap U)$ ,  $T = T - (T \cap U)$ ;

– пересчитываются значения параметров  $u$  и  $w$  узел-графа.

Объединение двух узел-графов, с любой стороны, является частным случаем объединения узел-графов и соответственно обозначаются  $^+ \cup$  и  $\cup ^+$ .

#### 0.6 Перебор путей в графе

Процесс перебора методом узел-графов заключается в регламентированном объединении узел-графов и добавлении вершин. Автор представляет регламент многошаговым циклическим процессом для графов, у которых  $v \geq 7$ .

Пусть граф  $G[V, E]$  задан упорядоченной совокупностью  $c_j$ , состоящей из  $v$  узел-графов.

Шаг 1. Положим  $p = 2, m = 0, w = v$ . Переходим на шаг 2.

Шаг 2.  $k = (v - 3) - 4[(v - 3) \setminus 4]$ , где  $\setminus$  - операция деления нацело. Если  $k = 1$ , то переходим на шаг 3. Если  $k = 2$ , то переходим на шаг 6. Если  $k = 3$ , то переходим на шаг 9. Если  $k = 0$ , то переходим на шаг 12.

Шаг 3. Пусть  $q = \overline{1, w}, j = \overline{1, t}$ . Для  $\forall c_j$  при  $T \neq \emptyset$  и  $j \in T$ , формируем таблицы-строки  $D$ , в каждую ячейку таблицы прописываем  $d_{qj} = c_j$ . Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока. Переходим на шаг 4.

Шаг 4. Положим  $p = p + k, q = \overline{1, w}$  для  $\forall d_{qj} \neq 0$  выполняем операции:

– добавления вершины в тело узел-графа из стока  $U = U + j$ , где  $j$  – номер столбца таблицы;

– если  $T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , то узел-граф удаляется ( $d_{qj} = 0$ ).

Переходим на шаг 5

Шаг 5. Формируем таблицу  $R = \begin{bmatrix} d_{1j} \\ \dots \\ d_{wj} \end{bmatrix}$  размером  $w \times (v - 1)$

композицией (сращиванием) по вертикали таблиц  $D$ , сортируем элементы таблицы  $R$ .  $w = 0$ . Если  $\forall r_{ij} \neq 0$ , то  $w = w + 1$ . Переходим на шаг 15.

Шаг 6. Для  $\forall c_j$  формируем таблицы  $D^q$  размером  $s \times t, q = \overline{1, w}$ . Если  $i \in S \wedge j \in T \wedge i \neq j$ , то в каждую ячейку каждой таблицы прописываем один элемент  $c_j$  ( $d_{ij}^q = c_j$ ). Номерам строк таблицы присваиваем номер соответствующей вершины истока. Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока. Переходим на шаг 7.

Шаг 7 Положим  $p = p + k$ . Для  $\forall d_{ij}^q$ , если  $d_{ij}^q \neq 0$ , выполняем операции:

– обавления вершин в тело каждого узел-графа из истока и из стока  $U = i + U + j$ , где  $i$  – номер строки таблицы,  $j$  – номер столбца таблицы;

– если  $S = \emptyset \vee T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , то узел-граф удаляется ( $d_{qj} = 0$ ).

Переходим на шаг 8.

Шаг 8. Формируем таблицу  $R = \begin{bmatrix} D^1 \\ \dots \\ D^w \end{bmatrix}$  размером  $w \times (v - 1)$

следующими операциями:

– композицией (сращиванием) по вертикали таблиц  $D^q$ ;

– сортировкой элементов таблицы  $R$ .

Положим  $w = 0$ . Для  $\forall r_{ij} \neq 0, w = w + 1$ . Переходим на шаг 15.

Шаг 9. Для  $\forall c_j$  формируем таблицы  $D^q$  размером  $s \times t, q = \overline{1, w}$ . Если  $i \in S \wedge j \in T \wedge i \neq j$ , то в каждую ячейку каждой таблицы прописываем один элемент  $c_j$  ( $d_{ij}^q = c_j$ ). Номерам строк таблицы присваиваем номер соответствующей вершины истока. Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока. Переходим на шаг 10.

Шаг 10. Положим  $p = p + k$ . Для  $\forall d_{ij}^q$ , если  $d_{ij}^q \neq 0$ , выполняем операции объединения узел-графов

$\begin{bmatrix} y \\ s \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} \in D^q$ ,  $\begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix} \in C$   
Если  $S = \emptyset \vee T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , то узел-граф удаляется ( $d_{ij}^q = 0$ ). Переходим на шаг 11.

Шаг 11. Формируем таблицу  $R = \begin{bmatrix} D^1 \\ \dots \\ D^w \end{bmatrix}$  размером

$w \times (v - 1)$  следующими операциями:

- композицией (сращиванием) по вертикали таблиц  $D^w$ ;
- сортировкой элементов таблицы  $R$ .

Положим  $w = 0$ . Для  $\forall r_{ij} \neq 0$   $w = w + 1$ . Переходим на шаг 15.

Шаг 12. Для  $\forall c_j$  формируем таблицы  $D^q$  размером  $s \times t$ ,  $q = \overline{1, w}$ . Если  $i \in S \wedge j \in T \wedge i \neq j$ , то в каждую ячейку каждой таблицы прописываем один элемент  $c_j$  ( $d_{ij}^q = c_j$ ). Номерам строк таблицы присваиваем номер соответствующей вершины истока. Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока. Переходим на шаг 13.

Шаг 13. Положим  $p = p + 4$ . Для  $\forall d_{ij}^q$ , если  $d_{ij}^q \neq 0$ , выполняем операции объединения узел-графов  $\begin{bmatrix} y \\ s \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_3 \\ s_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ t_3 \end{bmatrix}$ , где  $\begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix} \in D^q$ ,  $\begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} \in C$ ,  $\begin{bmatrix} y_3 \\ s_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ t_3 \end{bmatrix} \in C$ . Если  $S = \emptyset \vee T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , то узел-граф удаляется ( $d_{ij}^q = 0$ ). Переходим на шаг 14.

Шаг 14. Формируем таблицу  $R = \begin{bmatrix} D^1 \\ \dots \\ D^w \end{bmatrix}$  размером

$w \times (v - 1)$  следующими операциями:

- композицией (сращиванием) по вертикали таблиц  $D^w$ ;
- сортировкой элементов таблицы  $R$ .

Положим  $w = 0$ . Для  $\forall r_{ij} \neq 0$   $w = w + 1$ . Если  $p = v - 1$ , то ответ  $m = \sum y$  и переходим на шаг 18, если нет, то переходим на шаг 15.

Шаг 15. Для  $\forall r_{ij}$  формируем таблицы  $D^q$  размером  $s \times t$ ,  $q = \overline{1, w}$ . Если  $i \in S \wedge j \in T \wedge i \neq j$ , то в каждую ячейку каждой таблицы прописываем один элемент  $r_{ij}$  ( $d_{ij}^q = r_{ij}$ ). Номерам строк таблицы присваиваем номер соответствующей вершины истока. Номерам столбцов таб-

лицы присваиваем номер соответствующей вершины стока. Переходим на шаг 14.

Шаг 16. Положим  $p = p + 4$ . Для  $\forall d_{ij}^q$ , если  $d_{ij}^q \neq 0$ , выполняем операцию объединения узел-графов  $\begin{bmatrix} y \\ s \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_3 \\ s_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ t_3 \end{bmatrix}$ , где  $\begin{bmatrix} y_2 \\ s_2 \end{bmatrix} U_2 \begin{bmatrix} w_2 \\ t_2 \end{bmatrix} \in D^q$ ,  $\begin{bmatrix} y_1 \\ s_1 \end{bmatrix} U_1 \begin{bmatrix} w_1 \\ t_1 \end{bmatrix} \in C$ ,  $\begin{bmatrix} y_3 \\ s_3 \end{bmatrix} U_3 \begin{bmatrix} w_3 \\ t_3 \end{bmatrix} \in C$ .

Если  $S = \emptyset \vee T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , то узел-граф удаляется ( $d_{ij}^q = 0$ ). Переходим на шаг 17.

Шаг 17. Формируем таблицу  $R = \begin{bmatrix} D^1 \\ \dots \\ D^w \end{bmatrix}$  размером

$w \times (v - 1)$  следующими операциями:

- композицией (сращиванием) по вертикали таблиц  $D^w$ ;
- сортировкой элементов таблицы  $R$ .

Положим  $w = 0$ . Для  $\forall r_{ij} \neq 0$   $w = w + 1$ . Если  $p = v - 1$ , то ответ  $m = \sum y$  и переходим на шаг 18, если нет, то переходим на шаг 15.

Шаг 18. Конец.

#### 0.7 Решение примера

Пусть граф  $G[V, E]$  задан упорядоченной совокупностью  $c_j$  (рис. 1).

$$c_j = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2 \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} 3 \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 4 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4 \begin{bmatrix} 4 \\ 1;5 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5 \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6 \begin{bmatrix} 6 \\ 4;7;8 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 5;6 \end{bmatrix} 7 \begin{bmatrix} 7 \\ 8 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 6;7 \end{bmatrix} 8 \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix}$$

Шаг 1.  $p = 2$ ,  $m = 0$ ,  $w = 8$ .

Переходим на шаг 2.

Шаг 2.  $u = (8 - 3) - 4[(8 - 3) \setminus 4] = 1$ . Переходим на шаг 3.

Шаг 3.  $q = \overline{1, 8}$ ,  $j = \overline{1, t}$  для  $\forall c_j$  при  $T \neq \emptyset$  и  $j \in T$ , формируем таблицы-строки  $D$ , в каждую ячейку таблицы прописываем  $d_{qj} = c_q$ . Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока.

$$d_{1j} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} \\ d_{2j} \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2 \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} \\ d_{3j} \quad \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} 3 \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$$

$$d_{4j} = \begin{matrix} 1 & 5 \\ \begin{bmatrix} 4 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4 \begin{bmatrix} 4 \\ 1;5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 4 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4 \begin{bmatrix} 4 \\ 1;5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{5j} = \begin{matrix} 7 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5 \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{6j} = \begin{matrix} 4 & 7 & 8 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6 \begin{bmatrix} 6 \\ 4;7;8 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6 \begin{bmatrix} 6 \\ 4;7;8 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6 \begin{bmatrix} 6 \\ 4;7;8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{7j} = \begin{matrix} 8 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 5;6 \end{bmatrix} 7 \begin{bmatrix} 7 \\ 8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{8j} = \begin{matrix} 6 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 6;7 \end{bmatrix} 8 \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Переходим на шаг 4.

Шаг 4.  $p = 2 + 1 = 3$ ,  $q = \overline{1,8}$  для  $\forall d_{qj} \neq 0$  выполняем операцию добавления вершины в тело узел-графа из стока.

$$d_{1j} = \begin{matrix} 3 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \end{bmatrix} 1, 3 \begin{bmatrix} 1 \\ 5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{2j} = \begin{matrix} 4 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2, 4 \begin{bmatrix} 2 \\ 1;5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{3j} = \begin{matrix} 5 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 3, 5 \begin{bmatrix} 3 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{4j} = \begin{matrix} 1 & 5 \\ \begin{bmatrix} 3 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 1 \begin{bmatrix} 4 \\ 2;3 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 5 \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{5j} = \begin{matrix} 7 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5, 7 \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{6j} = \begin{matrix} 4 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6, 4 \begin{bmatrix} 7 \\ 1;5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{7j} = \begin{matrix} 8 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 5;6 \end{bmatrix} 7, 8 \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$d_{8j} = \begin{matrix} 6 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 7 \end{bmatrix} 8, 6 \begin{bmatrix} 8 \\ 4;7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Переходим на шаг 5

Шаг 5. Формируем таблицу  $R$ , сортируем элементы таблицы.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix}$	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 4 \end{bmatrix} 1, 3 \begin{bmatrix} 2 \\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2, 4 \begin{bmatrix} 3 \\ 1;5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 3, 5 \begin{bmatrix} 4 \\ 7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 7 \end{bmatrix} 8, 6 \begin{bmatrix} 5 \\ 4;7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5, 7 \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 5;6 \end{bmatrix} 7, 8 \begin{bmatrix} 7 \\ 6 \end{bmatrix}$
2	0	0	0	$\begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6, 4 \begin{bmatrix} 8 \\ 1;5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 5 \begin{bmatrix} 9 \\ 7 \end{bmatrix}$	0	0	0

$w = 0$ . Если  $\forall r_{ij} \neq 0$ , то  $w = 9$ .

Переходим на шаг 15.

Шаг 15. Формируем таблицы  $D^q$ . Номерам строк таблицы присваиваем номер соответствующей вершины истока. Номерам столбцов таблицы присваиваем номер соответствующей вершины стока.

$$D^1 = \begin{matrix} 2 & 3 \\ 2 & \begin{bmatrix} 0 & \begin{bmatrix} 3 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ 6 & \begin{bmatrix} 3 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} & 0 \end{matrix}$$

$$D^2 = \begin{matrix} 5 \\ 4 & \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \end{bmatrix} 1, 3 \begin{bmatrix} 2 \\ 5 \end{bmatrix} 0 \end{matrix}$$

$$D^3 = \begin{matrix} 1 & 5 \\ 1 & \begin{bmatrix} 0 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 2, 4 \begin{bmatrix} 3 \\ 1;5 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D^4 = \begin{matrix} 7 \\ 1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} 3, 5 \begin{bmatrix} 4 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D^5 = \begin{matrix} 4 & 7 \\ 7 & \begin{bmatrix} 1 \\ 7 \end{bmatrix} 8, 6 \begin{bmatrix} 5 \\ 4;7 \end{bmatrix} & 0 \end{matrix}$$

$$D^6 = \begin{matrix} 8 \\ 3 & \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5, 7 \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \\ 4 & \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5, 7 \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D^7 = \begin{matrix} 6 \\ 5 & \begin{bmatrix} 1 \\ 5;6 \end{bmatrix} 7, 8 \begin{bmatrix} 7 \\ 6 \end{bmatrix} \\ 6 & 0 \end{matrix}$$

$$D^8 = \begin{matrix} 1 & 5 \\ 8 & \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6, 4 \begin{bmatrix} 8 \\ 1;5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 8 \end{bmatrix} 6, 4 \begin{bmatrix} 8 \\ 1;5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$D^9 = \begin{matrix} 7 \\ 2 & \begin{bmatrix} 2 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 5 \begin{bmatrix} 9 \\ 7 \end{bmatrix} \\ 6 & \begin{bmatrix} 2 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 5 \begin{bmatrix} 9 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Переходим на шаг 14.

Шаг 16.  $p = 3 + 4 = 7$ . Для  $\forall d_{ij}^q$ , если  $d_{ij}^q \neq 0$ , выполняем операцию объединения узел-графов.

$$q = 4 \quad \begin{bmatrix} 1 \\ 6;7 \end{bmatrix} 8 \begin{bmatrix} 8 \\ 6 \end{bmatrix}$$

$$q = 5 \quad \begin{matrix} 7 \\ \begin{bmatrix} 4 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4 \begin{bmatrix} 4 \\ 1;5 \end{bmatrix} & 1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 2;6 \end{bmatrix} 4, 1, 3, 5, 7, 8 \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$q = 5 \quad \begin{matrix} 7 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix} 1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2;3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$q = 5 \quad \begin{matrix} 4 \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3;4 \end{bmatrix} 5 \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} & 7 & \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix} 5, 7, 8, 6, 4, 1 \begin{bmatrix} 2 \\ 2;3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$



Переходим на шаг 17.

Шаг 17. Формируем таблицу  $R$ , сортируем элементов таблицы.

	1	2	3	4
1	0	0	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix} 5, 7, 8, 6, 4, 1 \begin{bmatrix} 2 \\ 2; 3 \end{bmatrix}$
	5	6	7	8
	0	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 2, 6 \end{bmatrix} 4, 1, 3, 5, 7, 8 \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \end{bmatrix}$	0

$w = 0$ . Для  $\forall r_{ij} \neq 0 \quad w = 2$ .  $p = 7$ ,  $m = \sum y = 1 + 1 = 2$  и

переходим на шаг 18.

Шаг 18. Конец.

0.8 Некоторые результаты анализа метода

Решение задачи перечисления гамильтоновых путей в графе методом узел-графов позволило выделить экономичность метода:

1. Кажд узел-граф может сжимать (концентрировать) некоторое множество путей. Например, для узел-графов  $y \leq (v-1) \times (v-2)$ , так как для  $(v-1)$  истоков любой вершины существует не более  $(v-2)$  стоков для них. При этом не требуется сложной процедуры для получения такого представления. Нетрудно посчитать, что при таком представлении, размер входа задачи значительно меньше, чем при представлении графа другими способами. То есть, метод узел-графов уменьшает длину входа задачи, количество промежуточных результатов и длину ответа.

2. Объем перебора (промежуточные результаты и ответ) при решении задачи перечисления гамильтоновых путей в графе не превышает  $eSv!$ , здесь  $e = 2,71828 \dots$  – число Эйлера,  $S = 0,187859 \dots$  – константа Марвина Рэя Бернса (MRB).

### Заключение

В заключение отметим следующие свойства методов:

1. Ад ватность методов. Для произвольного графа инверсный метод и метод узел-графов заканчивают работу через конечное число итераций и позволяют получить точное решение задачи перечисления гамильтоновых путей в графе.

2. Универсальность методов. Отличительной особенностью любого метода перебора является возможность решения любых задач в своей области, в нашем случае задач, связанных с путями в графе: задачи о маршрутах, потоковые задачи и т.д.

3. Экономичность методов. Объем перебора для инверсного метода не превышает  $\frac{8}{3\sqrt{3}}v!$ , а для метода узел-

графов –  $eSv!$ , что меньше относительно метода транспонирования в 1,7 раза и в три раза соответственно.

4. Потенциальность методов. Возможность совершенствования методов для дальнейшего снижения вычислительной сложности решения задачи.

5. Достаточная простота форм исходных данных (представления графа) и их заполнения при выдаче задания на расчет.

6. С помощью предложенных методов решается широкий круг задач переборного типа.

### Литература

1. Аллакин В.В., Будко Н.П., Голунов М.В., Каретников В.В. Метод удаленного мониторинга функционального состояния средств связи и навигационного оборудования Росморречфлота // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. №1. С. 10-20.
2. Шухардин А.Н., Шкорина А.В. Методика оперативного выбора путей доведения информации в информационно-телекоммуникационных системах // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 1. С. 21-26.
3. Руденко Э.М., Семкина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 6-17.
4. Бочков А.П., Хомоненко А.Д., Барановский А.М. Модель формирования кластеров информативных узлов интегрированной и распределенной обработки данных в вычислительной сети // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 44-53.
5. Данильченко М.Н., Муравник А.Б. Нейросетевой подход к построению маршрута в автоматизированной системе управления специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. №1. С. 58-66.
6. Бурлов В.Г., Грачев М.И. Применение сетевых моделей в социальных и экономических системах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №2. С. 33-38.
7. Грачев М.И., Бурлов В.Г., Грачева Н.Г. Математическое моделирование организационных систем // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 5. С. 14-20.
8. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.
9. Kudelya V.N. Full enumeration methods on graphs. T-Comm, 2023, vol. 17, no.7, pp. 57-64.
10. Kochetov Yu.A. Computational possibilities of local search in combinatorial optimization // Journal of computational mathematics and mathematical physics. 2008. Volume 48. No. 5. p. 788-807.
11. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1982. – 440.
12. Кристофидес Н. Теория графов Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978.
13. Djokic B., Miyakawa M., Sekiguchi S., Semba I., Stojmenović I. A fast iterative algorithm for generating set partitions // The Computer Journal. 1989. Vol. 32. No. 3, pp. 281-282.
14. Djokic B., Miyakawa M., Sekiguchi S., Semba I., Stojmenović I. Parallel algorithms for generating subsets and set partitions // International Symposium on Algorithms. SIGAL. 1990, pp. 76-85.
15. Chen G.H., Chern M.S. Parallel generation of permutations and combinations // BIT Numerical Mathematics. 1986. Vol. 26, pp. 277-283.
16. Kokosinski Z. On generation of permutations through decomposition of symmetric groups into cosets // BIT Numerical Mathematics. 1990. Vol. 30, pp. 583-591.
17. Ковинов А.М. Разделяемый алгоритм перебора разбиений конечного множества на подмножества заданной мощности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления, 2020, том 16, выпуск 1. С. 50-61.
18. Левин Л.А. Универсальные задачи перебора // Проблемы передачи информации, 1973, том 9, выпуск 3. С. 115-116.
19. Леонтьев В.К. Дискретная оптимизация // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т.47. №2. С. 338-352.
20. Липский В. Комбинаторика для программистов / пер. с польск. В. А. Евстигнеева, О. А. Логиновой; под ред. А. П. Ершова. М.: Мир, 1988. 213 с.

## METHODS FOR ENUMERATING PATHS IN A GRAPH

VIKTOR N. KUDELYA,

Saint-Petersburg, Russia, Viktor@int.spb.ru

**KEYWORDS:** *graph, path, Hamiltonian path, enumeration problem.*

### ABSTRACT

**Introduction:** In the middle of the last century, the mathematical hypothesis of NP-complete problems was formed. The essence of the hypothesis is that it is impossible to solve problems of enumeration type in an acceptable time. Since that time, research on enumeration methods has practically ceased.

**Results:** The presented materials offer for consideration the inversion method of enumeration of paths in a graph and a more extended description of the node-graph method. The goal is to present a basic toolkit for reducing the complexity of the class of NP-complete problems, while maintaining the universality and accuracy of exhaustive enumeration.

### REFERENCES

1. V.V. Allakin, N.P. Budko, M.V. Golyunov, V.V. Karetnikov. Method of remote monitoring of the functional state of communications and navigation equipment of Rosmorrechflot. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No.1, pp. 10-20.
2. A.N. Shukhardin, A.V. Shkorina. Methodology for the operational selection of ways to communicate information in information and telecommunication systems. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No.1, pp. 21-26.
3. E.M. Rudenko, E.V. Semikina. Unmanned aircraft routing, graph transcendent target functions and genetic algorithm. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 1, pp. 6-17.
4. A.P. Bochkov, A.D. Khomonenko, A.M. Baranovsky. Model of formation of clusters of informative nodes of integrated and distributed data processing in a computer network. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No.1, pp. 44-53.
5. M.N. Danilchenko, A.B. Muravnik. Neural network approach to building a route to special-purpose automated control systems. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No.1, pp. 58-66.
6. V.G. Burlov, M.I. Grachev. Application of network models in social and economic systems. *T-Comm*, 2021. Vol. 15, no. 2, pp. 33-38.
7. M.I. Grachev, V.G. Burlov, N.G. Gracheva. Mathematical modeling of organizational systems. *H&ES Reserch*. 2022. Vol. 14. No.5, pp.14-20.
8. M. Gary, D. Johnson. Computing machines and intractable problems. Moscow: Mir, 1982. P. 6.
9. V.N. Kudelya. Full enumeration methods on graphs. *T-Comm*. Vol. 17, no.7, pp. 57-64.
10. Yu.A. Kochetov. Computational possibilities of local search in combinatorial optimization. *Journal of computational mathematics and mathematical physics*. 2008. Vol. 48. No. 5, pp. 788-807.
11. H. Papadimitriou, K. Steiglitz. Combinatorial optimization. Algorithms and complexity. Moscow: Mir, 1982. 440 p.
12. H. Khristophides. Graph theory. Algorithmic approach. Moscow: Mir, 1978.
13. B. Djokic, M. Miyakawa, S. Sekiguchi, I. Semba, I. Stojmenovic. A fast iterative algorithm for generating set partitions. *The Computer Journal*. 1989. Vol. 32. No. 3, pp. 281-282.
14. B. Djokic, M. Miyakawa, S. Sekiguchi, I. Semba, I. Stojmenovic. Parallel algorithms for generating subsets and set partitions. *International Symposium on Algorithms. SIGAL*. 1990, pp. 76-85.
15. G.H. Chen, M.S. Chern. Parallel generation of permutations and combinations. *BIT Numerical Mathematics*. 1986. Vol. 26, pp. 277-283.
16. Z. Kokosinski. On generation of permutations through decomposition of symmetric groups into cosets. *BIT Numerical Mathematics*. 1990. Vol. 30, pp. 583-591.
17. A.M. Kovshov. A parallel algorithm for iterating partitions of a finite set into subsets of a given cardinality. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2020. Vol. 16, iss. 1, pp. 50-61.
18. L.A. Levin. Universal enumeration problems. *Information transfer problems*, 1973. Vol. 9, issue 3, pp. 115-116.
19. V.K. Leontiev. Discrete optimization. *Journal of computational mathematics and mathematical physics*. 2007. Vol. 47. No. 2, pp. 338-352.
20. V. Lipsky. Combinatorics for programmers. Moscow: Mir, 1988. 213 p.

### INFORMATION ABOUT AUTHOR:

**Viktor N. Kudelya**, leading specialist, Dr., Institute for Networking Technology, Saint-Petersburg, Russia, Kudelia.Viktor@int.spb.ru

**For citation:** Kudelya V.N. Methods for enumerating paths in a graph. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No 5. P. 28-38. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-28-38 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-39-56

# МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ В СЕТЯХ SPACEFIBRE В УСЛОВИЯХ СБОЕВ И ОТКАЗОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

**СУВОРОВА**

Елена Александровна<sup>1</sup>

**ЧУМАКОВА**

Надежда Юрьевна<sup>2</sup>

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> к.т.н., зав. лабораторией "Систем и сетей-на-кристалле", доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, инженер центра аэрокосмических исследований и разработок, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Санкт-Петербург, Россия, wildcat15@yandex.ru

<sup>2</sup> ассистент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, инженер центра аэрокосмических исследований и разработок, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Санкт-Петербург, Россия, nadezhda.chumakova@guar.ru

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** гарантированность и время распространения широковещательных сообщений являются важными характеристиками для вычислительных сетей на базе стандарта SpaceFibre. Для парирования сбоев и отказов в этих сетях могут использоваться различные механизмы структурной избыточности, которые влияют на время распространения широковещательных сообщений. Вследствие особенностей правил распространения широковещательных сообщений в сетях SpaceFibre оценка их характеристик вручную является очень проблематичной, возможны ошибки из-за того, что не все факторы будут учтены. Поэтому возникает необходимость в разработке автоматизированных методов оценки характеристик. **Цель исследования:** целью исследования является разработка методов оценки характеристик передачи широковещательных сообщений в сетях SpaceFibre. Методы: разработанные методы и алгоритмы основаны на элементах теории графов (поиск кратчайших путей), на теории временных автоматов, сетей временных автоматов. Разработан подход к формированию временных автоматов и сети на базе временных автоматов для оценки времени передачи широковещательных сообщений, отличающийся от известных методов с возможностью динамической реконфигурации. **Результаты:** использование разработанных методов позволяет выполнять оценку характеристик распространения широковещательных сообщений в условиях статического и динамического изменения структуры сети из-за действия сбоев и отказов. Полученные данные могут быть использованы при выборе схем структурного резервирования для сети и позволяют существенно упростить процесс формирования параметров конфигурации для сетевых устройств. **Практическая значимость:** предложенный метод позволил выявить условия, при которых время распространения широковещательных сообщений в условиях наличия сбоев и восстановления после сбоев оказывается существенно выше, чем получаемое при анализе без учета возможности динамического изменения структуры сети. Обсуждение: аналогов предложенного метода оценки характеристик распространения широковещательных сообщений для сетей SpaceFibre не существует.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** SpaceFibre, широковещательные сообщения, динамическая реконфигурация, структурная избыточность, временные автоматы.

**Для цитирования:** Суворова Е.А., Чумакова Н.Ю. Методы оценки времени распространения широковещательных сообщений в сетях Spacefibre в условиях сбоев и отказов с различными вариантами пространственного резервирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 39-56. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-39-56

## Введение

В большинстве локальных вычислительных сетей (ЛВС) требуются механизмы парирования сбоев и отказов. В стандарте SpaceFibre [1] специфицированы методы парирования сбоев на уровне звена передачи данных, но не специфицированы конкретные механизмы парирования отказов, а также сбоев, происходящих за пределами звена передачи данных, способы пространственного резервирования. В современных ЛВС используются различные способы пространственного резервирования. Могут использоваться разные схемы подключения резервных компонентов, правила формирования графа связей (структуры) сети.

При использовании различных способов пространственного резервирования достижимые характеристики сети, такие, как количество используемого дополнительного оборудования, дополнительное энергопотребление, время восстановления штатной работы, а также, характеристики живучести сети могут очень существенно различаться. Ни один из существующих способов нельзя считать самым лучшим для всех сетей. Разработчик выбирает наиболее подходящий способ в соответствии с решаемыми в системе задачами и допустимыми накладными расходами.

При выборе способа пространственного резервирования важную роль играют характеристики передачи различных типов данных в условиях отказов и сбоев различной кратности. В частности, очень существенными для многих применений могут быть характеристики передачи широковещательных сообщений (Broadcast), так как они используются для передачи особенно существенной информации. В данной статье мы выполняем оценку зависимости времени распространения широковещательного сообщения от выбранной схемы пространственного резервирования в условиях отказов и сбоев в сети.

Если в сети возникает отказ, то ее структура и пути распространения в ней широковещательного сообщения изменяются на все последующее время эксплуатации сети или до очередного ремонта (если система является ремонтпригодной). Если в сети возникает сбой, то ее структура и пути распространения широковещательного сообщения изменяются на период времени действия сбоя, далее, при восстановлении после сбоя, они могут вновь измениться. Отметим, что не обязательно, что они вернутся к варианту, который существовал до сбоя. И отказы, и сбои могут происходить в сети в периоды времени между распространениями очередных широковещательных сообщений. В этом случае следующее широковещательное сообщение (передаваемое после возникновения сбоя, отказа) будет распространяться по другим путям передачи чем предыдущее, но структура сети в ходе его передачи будет статичной (не будет изменяться). Если отказ, сбой или восстановление после сбоя происходит в момент времени, когда широковещательное сообщение распространяется по сети, то структура сети изменится динамически. Эти случаи существенно различаются с точки зрения оценки характеристик распространения широковещательного сообщения.

Поэтому в данной статье мы используем для них различный математический аппарат. Отметим, что вероятность изменения структуры сети непосредственно во время распространения широковещательного сообщения не высока по

сравнению с вероятностью изменения структуры сети между распространениями широковещательных сообщений. Однако, во многих применениях не учитывать последствия возможного динамического изменения нельзя.

Для выполнения статических оценок был разработан метод, в котором для определения пути передачи широковещательного сообщения до каждого узла используется алгоритм Ли. Далее были разработаны формулы для оценки времени передачи по этому пути.

Для верификации и анализа характеристик передачи широковещательного сообщения в сетях SpaceFibre с учетом динамики происходящих процессов сбоев и отказов, использован математический аппарат временных автоматов. Данный математический аппарат был разработан для верификации и анализа характеристик систем с требованиями реального времени [2-4]. Для обеспечения этого, по сравнению с классическими автоматами, во временные автоматы было добавлено понятие времени. Для работы со временем используются переменные – таймеры (timer, clock) [5,6]. Также в них могут включаться и переменные других типов. Например, они могут использоваться для счета событий [7-10]. Во временных автоматах могут использоваться параметры [8,9,11,12]. Для исследования сложных систем могут формироваться сети из временных автоматов [13-16]. Взаимодействие между автоматами осуществляется через каналы или за счет использования общих переменных [7, 8, 15, 16]. По каналам могут передаваться события (сигналы). У каждого канала есть один источник, и может быть один или несколько приемников. Каналы могут быть реализованы как синхронные или асинхронные. В первом случае переход, при выполнении которого событие помещается в канал, срабатывает только в том случае, если может сработать (и сработает) переход, связанный с чтением события из канала. (Такие переходы могут использоваться для синхронизации отдельных временных автоматов в сети). Если переход является асинхронным, то чтение события из канала может быть отложено во времени по отношению к моменту записи события в канал [15-18]. В данной статье мы предлагаем использовать подход, основанный на сетях на базе временных автоматов с возможностью динамической реконфигурации для динамического анализа характеристик передачи широковещательных сообщений.

## Правила распространения широковещательных сообщений в сетях SpaceFibre

Широковещательное сообщение распространяется в сети SpaceFibre от одного источника ко всем сетевым узлам (маршрутизаторам и терминальным узлам). Конкретный сетевой узел может обрабатывать или отбрасывать широковещательное сообщение в зависимости от его типа (реагировать на получение только конкретных типов широковещательных сообщений). Широковещательное сообщение распространяется по сети SpaceFibre широковещательно, однако при этом используется механизм, позволяющий исключить закликивание широковещательного сообщения в сетях, графы связей между узлами которых содержат циклы. В основе данного механизма лежит использование динамически формируемого дерева распространения широковещательных сообщений.

В маршрутизаторах при приеме очередного широковещательного сообщения выполняются следующие действия. Если широковещательное сообщение данного типа поступило в данный маршрутизатор впервые с начала работы, то оно рассылается во все порты маршрутизатора, кроме того, из которого пришло. Запоминается порт, из которого пришло широковещательное сообщение, и запускается счет таймаута. Длительность таймаута должна превышать время распространения широковещательного сообщения по самому длинному циклу в данной сети. Если широковещательное сообщение данного типа уже поступало в маршрутизатор, то проверяется, из какого порта оно поступило в предыдущий раз. Если в этот раз широковещательное сообщение поступило из того же порта, то оно рассылается далее. Если широковещательное сообщение поступило из другого порта, то проверяется, истек ли таймаут. Если таймаут не истек, то считается, что широковещательное сообщение достигло данного маршрутизатора повторно и оно отбрасывается. Если таймаут истек, то считается, что это новое широковещательное сообщение, которое стало распространяться по сети по-другому из-за того, что изменилась конфигурация сети. Это могло произойти в результате возникновения ошибок в сети. В результате формируется дерево распространения широковещательных сообщений. Это дерево может быть перестроено динамически если в сети происходят отказы. Время распространения широковещательных сообщений до различных сетевых узлов при перестроении дерева может измениться.

Необходимо отметить, что если источник посылает широковещательное сообщение одного и того же типа с одним и тем же идентификатором канала чаще, чем длительность таймаута, то в ходе переформирования дерева распространения широковещательные сообщения могут быть утрачены (не доставлены до части сетевых узлов).

### Оценка времени распространения широковещательных сообщений в сетях SpaceFibre

Максимальное время передачи широковещательного сообщения от узла-источника до различных устройств в сети SpaceFibre различно. Оно зависит от длины маршрута передачи широковещательных сообщений. В данной работе для расчета длин кратчайших маршрутов был использован волновой алгоритм Ли [19, 20].

Также максимальное время передачи широковещательного сообщения зависит от времени его обработки в транзитных маршрутизаторах, расположенных на маршруте передачи, и устройстве-получателе, от задержек прохождения данного сообщения через входные и выходные порты всех устройств в маршруте, а также от времени прохождения его по физическим каналам. Данные параметры известны на этапе проектирования сети.

Так как маршруты передачи широковещательных сообщений в сетях SpaceFibre могут изменяться вследствие динамического изменения дерева распространения, максимальное время передачи такого сообщения также может быть изменено.

Максимальное время передачи широковещательного сообщения для устройства рассчитывается по формуле (1):

$$\lambda t_{\max} = \sum_{j=1}^{N-1} (\lambda port\_out_j) + \sum_{j=2}^N (\lambda port\_in_j) + \sum_{j=2}^N (\lambda n_j) + \sum_{j=1}^{N-1} (\lambda phy_j) \quad (1)$$

где:

- $N$  – число устройств на маршруте передачи широковещательного сообщения, включая узел-источник и узел-приемник,
- $\lambda port\_out_j$  – задержка прохождения широковещательного сообщения через выходной порт устройства  $j$ ,
- $\lambda port\_in_j$  – задержка прохождения широковещательного сообщения через входной порт устройства  $j$ ,
- $\lambda n_j$  – время обработки широковещательного сообщения в устройстве  $j$  (на сетевом уровне),
- $\lambda phy_j$  – канал, соединяющий устройство  $j$  с устройством  $j+1$ .

Отметим, что значения  $\lambda port\_out_j$ ,  $\lambda port\_in_j$ ,  $\lambda n_j$  задаются в соответствии с конкретными реализациями устройств, используемых в сети;  $\lambda phy_j$  определяется в соответствии с физической реализацией линий связи между устройствами.

Для упрощения формулы все устройства на маршруте нумеруются от 1 (узел-источник) до  $N$  (узел-получатель).

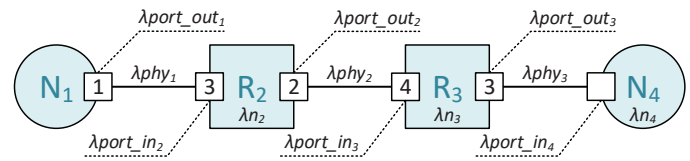


Рис. 1. Пример маршрута передачи Broadcast

На рисунке 1 представлен пример маршрута из четырех устройств. Для данного маршрута максимальное время передачи широковещательного сообщения будет рассчитано по формуле (2):

$$\lambda t_{\max} = \sum_{j=1}^3 (\lambda port\_out_j) + \sum_{j=2}^4 (\lambda port\_in_j) + \sum_{j=2}^4 (\lambda n_j) + \sum_{j=1}^3 (\lambda phy_j) \quad (2)$$

### Способы пространственного резервирования

Можно выделить следующие способы пространственного резервирования, которые получили наибольшее распространение в ЛВС [21, 22].

Первым из них является использование  $K+1$  идентичных сетей (при необходимости парирования  $K$  отказов), никак не связанных между собой (каждый терминальный узел подключается ко всем сетям). Такой подход используется, в частности, в рамках стандарта AFDX [23–25].

При использовании второго способа существует единая сеть, в которую включены и основные, и резервные маршрутизаторы. В ряде случаев за каждым маршрутизатором закрепляется его роль – является ли он основным или резервным. В других случаях деление на основные и резервные маршрутизаторы отсутствует.

Правила добавления резервных маршрутизаторов, количество добавляемых маршрутизаторов, правила связывания резервных и основных маршрутизаторов могут существенно различаться.

В рамках данного способа широкое распространение получил вариант реализации, при котором, как и при использовании первого способа, формируется  $K+1$  идентичных сетей, но между маршрутизаторами из разных сетей существуют «перекрестные» связи [21, 22].

Все рассмотренные выше способы пространственного резервирования могут использоваться в сетях SpaceFibre.

### Оценка изменения времени распространения широковещательного сообщения

#### 1. Парирование отказов путем использования идентичных сетей

При использовании данного способа существует  $K+1$  полностью идентичных сетей SpaceFibre, никак не связанных между собой. В каждой из этих сетей формируется отдельное дерево распространения широковещательных сообщений. Деревья распространения могут быть не полностью идентичными. (Это происходит в тех случаях, когда в сети существует несколько путей передачи широковещательных сообщений с практически одинаковыми характеристиками.) Максимальное время распространения широковещательного сообщения до любого  $i$  терминального узла по всем  $K+1$  деревьям при этом будет почти одинаково.

Если в какой-то из сетей произойдет отказ, это приведет к перестроению дерева распространения широковещательных сообщений в данной сети, и никак не затронет деревья распространения в других сетях. В результате, если произойдет не более  $K$  отказов, то как минимум одно дерево распространения останется неизменным. Таким образом, максимальное время распространения широковещательных сообщений не поменяется. В частности, не поменяется и максимальное время распространения, непосредственно во время передачи которых произошли отказы в сети.

На рисунке 2 представлен пример использования первого способа пространственного резервирования. В примере используется две идентичные сети с топологией дерева. Терминальные узлы данных сетей подключены к обоим сетям. Такое построение позволяет парировать 1 отказ.

Рассмотрим пример парирования отказа посредством первого способа пространственного резервирования для сети, представленной на рисунке 2, при передаче широковещательного сообщения от источника Broadcast  $N_{001}$  до узла  $N_{032}$ .

В исходной сети (рис. 2а) передается одно широковещательное сообщение. В случае отказа коммутатора на пути передачи широковещательных сообщений, узел  $N_{032}$  не получит ни одного широковещательного сообщения. После добавления идентичной сети (рис. 2б), широковещательное сообщение передается по двум маршрутам. Один из маршрутов проходит через Сеть 1 (через маршрутизаторы  $R_{011}$  и  $R_{021}$ ), второй – через Сеть 2 (через маршрутизаторы  $R_{111}$  и  $R_{121}$ ). Длина обоих маршрутов составляет 3 хопа. При корректной работе сети устройство  $N_{032}$  получает два идентичных широковещательных сообщения от источника  $N_{001}$ . В примере, представленном на рисунке 2в произошел отказ маршрутизатора  $R_{021}$ . Благодаря тому, что широковещательное сообщение передается по двум маршрутам, устройство  $N_{032}$  получает данное сообщение (только одну его копию).

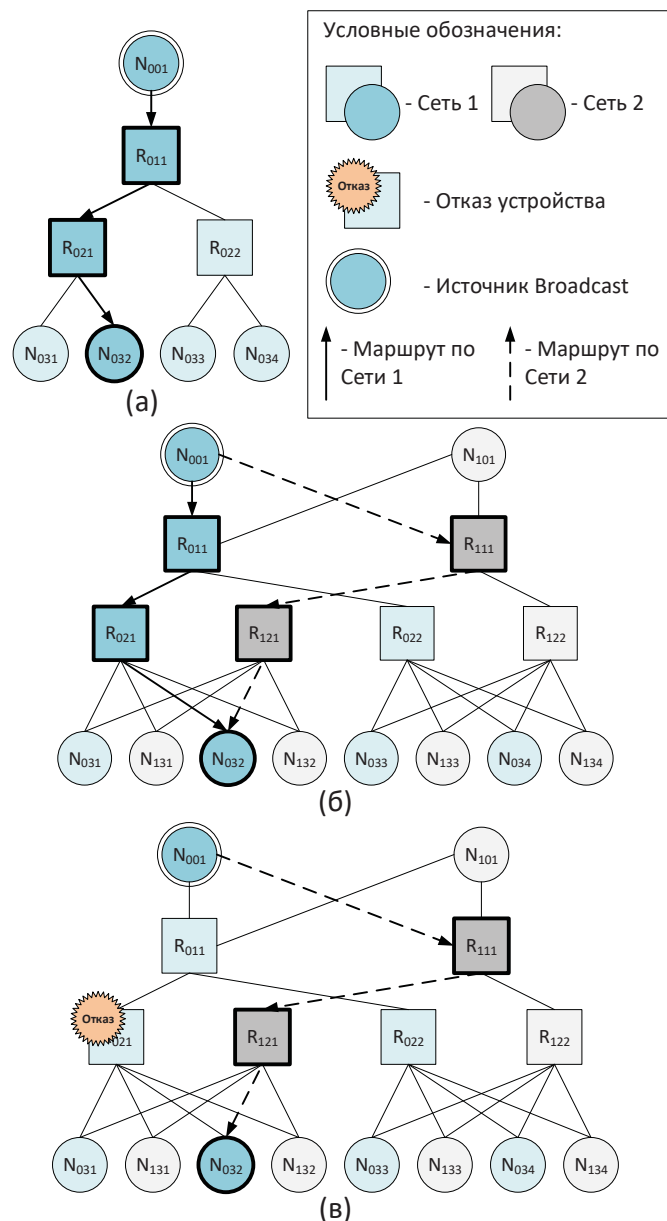


Рис. 2. Сеть с топологией дерева: (а) – без использования идентичных сетей, (б) – с использованием идентичных сетей, (в) – с использованием идентичных сетей и отказом маршрутизатора  $R_{021}$

На рисунке 3 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательных сообщений от узла-источника  $N_{001}$  ко всем устройствам в сети при работе сети без отказов и с отказом маршрутизатора  $R_{021}$ . На данной гистограмме видно, что в случае отказа маршрутизатора  $R_{021}$ , остальные устройства получают два сообщения, причем максимальное время передачи широковещательных сообщений останется неизменным.

На рисунке 3 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательных сообщений от узла-источника  $N_{001}$  ко всем устройствам в сети. На данной гистограмме видно, что маршрутизатор  $R_{021}$  не получили ни одного широковещательного сообщения.



Рис. 3. Максимальное время передачи Broadcast в сети без отказов и в сети с отказом маршрутизатора R021

Остальные устройства получают два сообщения, причем максимальное время передачи широковещательного сообщения останется неизменным.

Аналогично парирование отказов выполняется на других топологиях. На рисунке 4 представлен пример использования первого способа пространственного резервирования для сети с топологией двумерная решетка.

Рассмотрим пример парирования отказа посредством первого способа пространственного резервирования для сети, представленной на рисунке 4, при передаче широковещательного сообщения от источника Broadcast  $N_{001}$  до узла  $N_{014}$ .

В исходной сети (рис. 4а) передается одно широковещательное сообщение. В случае отказа коммутатора на пути передачи широковещательного сообщения, узел  $N_{014}$  не получит ни одного сообщения. После добавления идентичной сети (рис. 4б), широковещательное сообщение передается по двум маршрутам. Один из маршрутов проходит через Сеть 1 (через маршрутизаторы  $R_{002}$ ,  $R_{003}$  и  $R_{013}$ ), второй – через Сеть 2 (через маршрутизаторы  $R_{102}$ ,  $R_{103}$  и  $R_{113}$ ). Длина обоих маршрутов составляет 4 хопа.

При корректной работе сети устройство  $N_{014}$  получает два идентичных пакета Broadcast от источника  $N_{001}$ . В примере, представленном на рисунке 4в произошел отказ маршрутизатора  $R_{013}$ . Благодаря тому, что широковещательное сообщение передается по двум маршрутам, устройство  $N_{014}$  получает одну копию широковещательного сообщения.

На рисунке 5 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательного сообщения от узла-источника  $N_{001}$  ко всем устройствам в сети при работе сети без отказов и с отказом маршрутизатора  $R_{013}$ . На данной гистограмме видно, что в случае отказа маршрутизатора  $R_{013}$ , остальные устройства получают два широковещательных сообщения, причем максимальное время передачи broadcast останется неизменным.

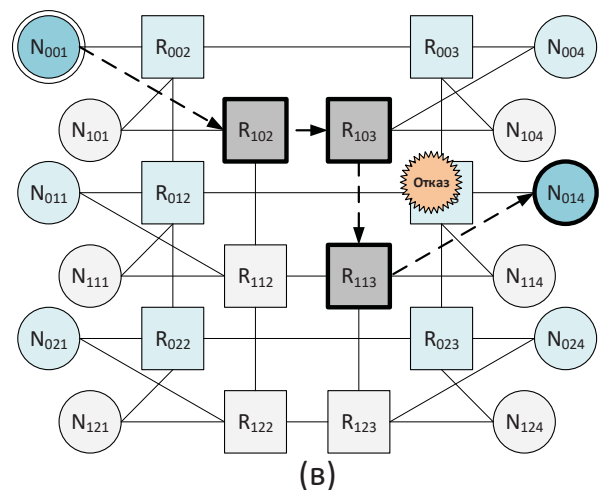
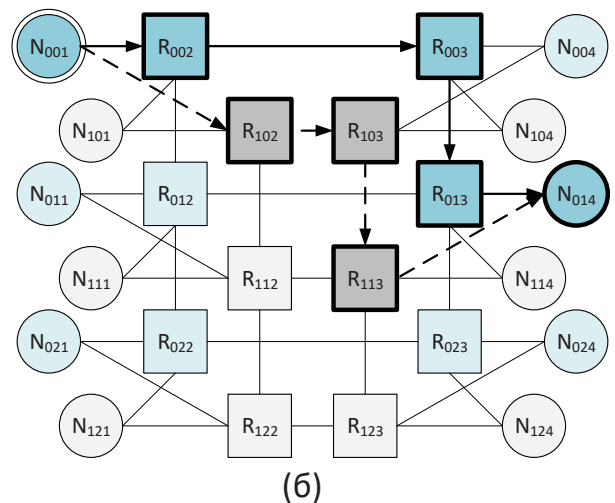
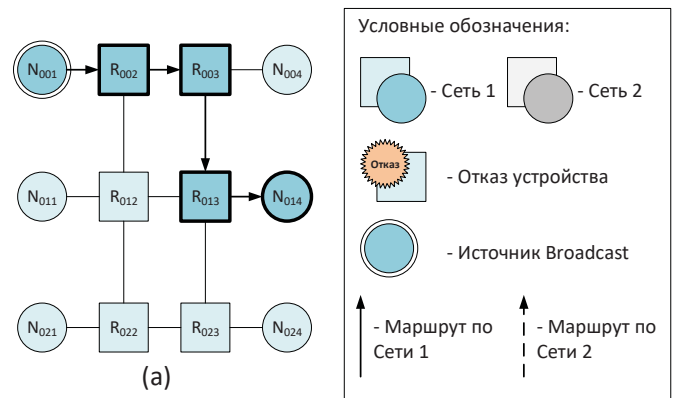


Рис. 4. Сеть с топологией двумерная решетка: (а) – без использования идентичных сетей; (б) – с использованием идентичных сетей; (в) – с использованием идентичных сетей и отказом маршрутизатора  $R_{013}$

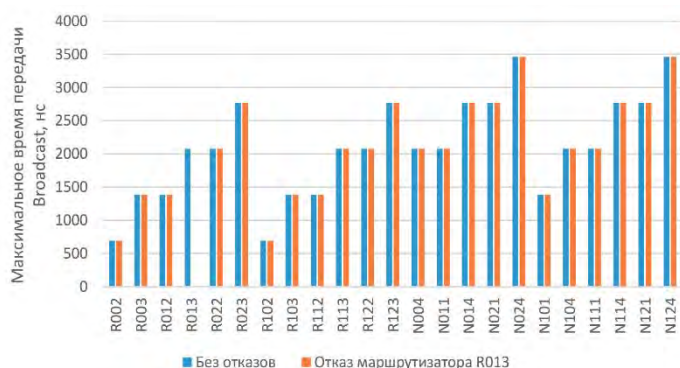


Рис. 5. Максимальное время передачи широковещательного сообщения в сети без отказов и в сети с отказом маршрутизатора  $R_{013}$

Если в сетях, в которых используется данный способ резервирования, имеются циклы, то наличие независимых деревьев распространения обеспечивает возможность посылать широковещательные сообщения одного и того же типа чаще, чем максимальная длительность передачи по циклу (максимальное время таймаута). Такие широковещательные сообщения будут доставлены до сетевых узлов по деревьям, которые не изменились.

## 2. Парирование отказов путем использования резервных маршрутизаторов и перекрестных связей

При использовании данного способа пространственного резервирования строится единое дерево распространения широковещательных сообщений, в которое могут входить как основные, так и резервные маршрутизаторы (за исключением маршрутизаторов, находящихся в холодном резерве). Если какой-то из маршрутизаторов, каналов связи, входящих в состав дерева распространения, выходит из строя, то происходит динамическое изменение дерева распространения широковещательных сообщений.

При этом потенциально возможны варианты, при которых максимальное время распространения по новому дереву будет практически совпадать со временем распространения по исходному дереву будет мало отличаться от исходного.

На рисунке 6 представлен пример использования второго способа пространственного резервирования. В примере используется сеть с топологией двумерная решетка, в которую включены резервные маршрутизаторы таким образом, что в используемой двумерной решетке добавляется дополнительная строка и столбец. После добавления резервных маршрутизаторов каждая строка и столбец замыкаются, преобразовываясь в топологию тор. Также для каждого терминального узла добавляется дополнительная связь с соседним (лежащим в той же строке) маршрутизатором.

Рассмотрим пример парирования отказа посредством второго способа пространственного резервирования для сети, представленной на рисунке 6, при передаче широковещательного сообщения от источника  $N_{111}$  до узла  $N_{132}$ .

В исходной сети (рис. 6а) широковещательное сообщение передается по маршруту длиной 5 хопов. Добавление резервных маршрутизаторов и перекрестных связей позволило сократить маршрут, новый маршрут составляет 4 хопа (рис. 6б).

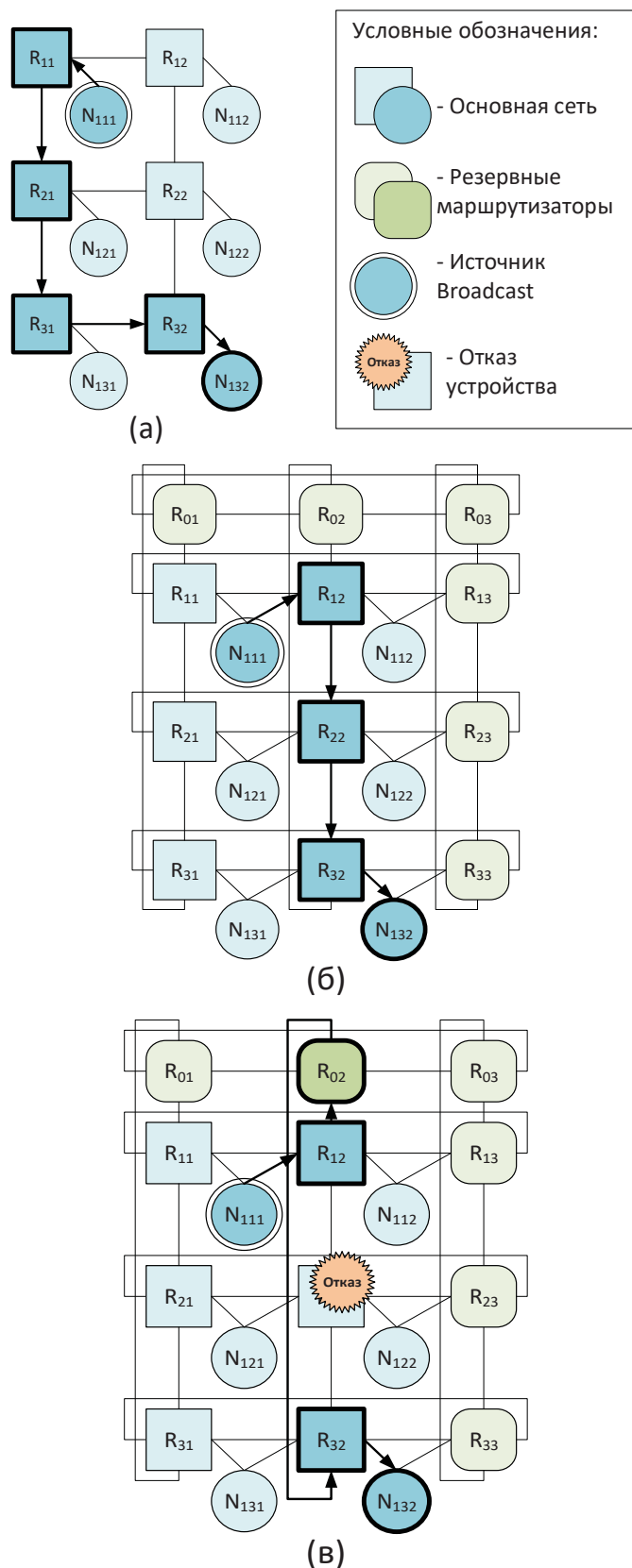
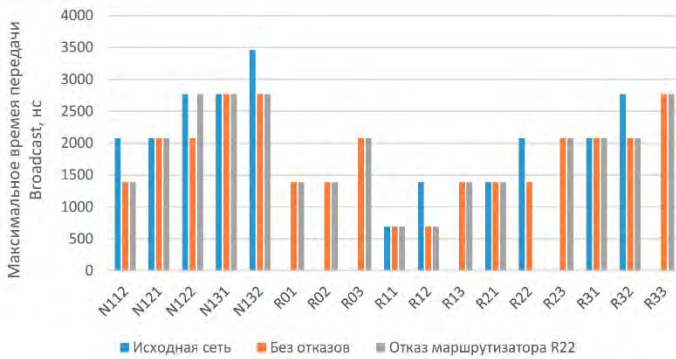


Рис. 6. Сеть с топологией двумерная решетка: (а) – без использования резервных маршрутизаторов; (б) – с использованием резервных маршрутизаторов; (в) – с использованием резервных маршрутизаторов и отказом маршрутизатора  $R_{22}$



В примере, представленном на рисунке 6в, произошел отказ маршрутизатора  $R_{22}$ . Благодаря добавлению перекрестных связей и резервных маршрутизаторов, узел  $N_{132}$  получит Broadcast по измененному маршруту, длина которого также составляет 4 хопа.

На рисунке 7 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательного сообщения от узла-источника  $N_{111}$  ко всем устройствам в сети при работе сети без отказов и с отказом маршрутизатора  $R_{22}$ . На данной гистограмме видно, что при добавлении резервных маршрутизаторов максимальное время передачи широковещательного сообщения от источника  $N_{111}$  либо остается прежним (например, для терминальных узлов  $N_{121}$  и  $N_{131}$ ), либо сокращается. На гистограмме видно, что после отказа маршрутизатора  $N_{22}$  максимальное время передачи Broadcast либо остается неизменным, либо незначительно увеличивается (например, на 1 хоп для узла  $N_{122}$ ).



**Рис. 7.** Максимальное время передачи широковещательного сообщения в сети без отказов и в сети с отказом маршрутизатора  $R_{22}$

Для сетей с топологией двумерная решетка добавление резервных маршрутизаторов и перекрестных связей может позволить сократить маршрут передачи широковещательных сообщений. Для случая, когда источник и получатель широковещательного сообщения соединены с маршрутизаторами, расположенными в одном столбце, длина альтернативного маршрута  $L_{col}$  рассчитывается по формуле (3):

$$L_{col} = N + 2 - H \quad (3)$$

где  $H$  – длина исходного маршрута в хопах,  $N$  – количество устройств в столбце (с учетом резервного маршрутизатора, добавленного в столбец).

Если длина альтернативного маршрута меньше длины исходного маршрута ( $L_{col} < H$ ), то широковещательные сообщения будут передаваться по альтернативному маршруту через резервный маршрутизатор.

Для случая, когда источник и получатель широковещательных сообщений соединены с маршрутизаторами, расположенными в одной строке, длина исходного маршрута сокращается на 1 хоп ( $H' = H - 1$ ). Сокращение исходного маршрута выполняется за счет добавления связей терминальных узлов с соседними (расположенными в одной строке) маршрутизаторами. При этом, длина альтернативного маршрута рассчитывается по формуле (4):

$$L_{row} = N + 2 - H' \quad (3)$$

где  $H$  – длина исходного маршрута в хопах,  $N$  – количество устройств в строке (с учетом резервного маршрутизатора, добавленного в строку). Если длина альтернативного маршрута меньше длины исходного маршрута ( $L_{str} < H'$ ), то широковещательные сообщения будут передаваться по альтернативному маршруту через резервный маршрутизатор.

Для вычисления длины альтернативного маршрута для случая, когда источник и получатель широковещательных сообщений соединены с маршрутизаторами, расположенными в разных строках и столбцах, длина исходного маршрута разбивается на две составляющие: маршрут по столбцу  $H_{col}$  и маршрут по строке  $H_{str}$  ( $H = H_{col} + H_{str}$ ). При этом, длина исходного маршрута должна быть сокращена на 1 хоп ( $H' = H - 1$ ), за счет сокращения на 1 хоп длины маршрута по строкам ( $H'_{str} = H_{str} - 1$ ). При этом, длина альтернативного маршрута рассчитывается по формуле (4):

$$L_{row\_col} = (N_{col} + 2 - H_{col}) + (N_{row} + 2 - H'_{str}) \quad (4)$$

где  $N_{col}$  – количество устройств в столбце (с учетом резервного маршрутизатора, добавленного в столбец),  $N_{str}$  – количество устройств в строке (с учетом резервного маршрутизатора, добавленного в строку).

Если длина альтернативного маршрута меньше длины исходного маршрута ( $L_{str\_col} < H'$ ), то широковещательные сообщения будут передаваться по альтернативному маршруту через резервный маршрутизатор.

Аналогично парирование отказов выполняется на других топологиях. На рисунке 8 представлен пример использования второго способа пространственного резервирования для сети с топологией дерева.

Рассмотрим пример парирования отказа посредством второго способа пространственного резервирования для сети, представленной на рисунке 8, при передаче широковещательного сообщения от источника  $N_{31}$  до узла  $N_{34}$ .

В исходной сети (рис. 8а) широковещательное сообщение передается по маршруту длиной 5 хопов. Добавление резервных маршрутизаторов и перекрестных связей позволило сократить маршрут, новый маршрут составляет 3 хопа (рис. 8б).

В примере, представленном на рисунке 8в, произошел отказ маршрутизатора  $R_{21}$ . Благодаря добавлению перекрестных связей и резервных маршрутизаторов, узел  $N_{34}$  получит широковещательное сообщение по измененному маршруту, длина которого составляет 4 хопа.

На рисунке 9 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательных сообщений от узла-источника  $N_{31}$  ко всем устройствам в сети при работе сети без отказов и с отказом маршрутизатора  $R_{21}$ . На данной гистограмме видно, что при добавлении резервных маршрутизаторов максимальное время передачи широковещательных сообщений от источника  $N_{31}$  либо остается прежним (например, для терминальных узлов  $N_{11}$  и  $N_{12}$ ), либо сокращается. Также, на гистограмме видно, что после отказа маршрутизатора  $N_{21}$  максимальное время передачи широковещательных сообщений либо остается неизменным, либо незначительно увеличивается (например, на 1 хоп для узла  $N_{34}$ ).

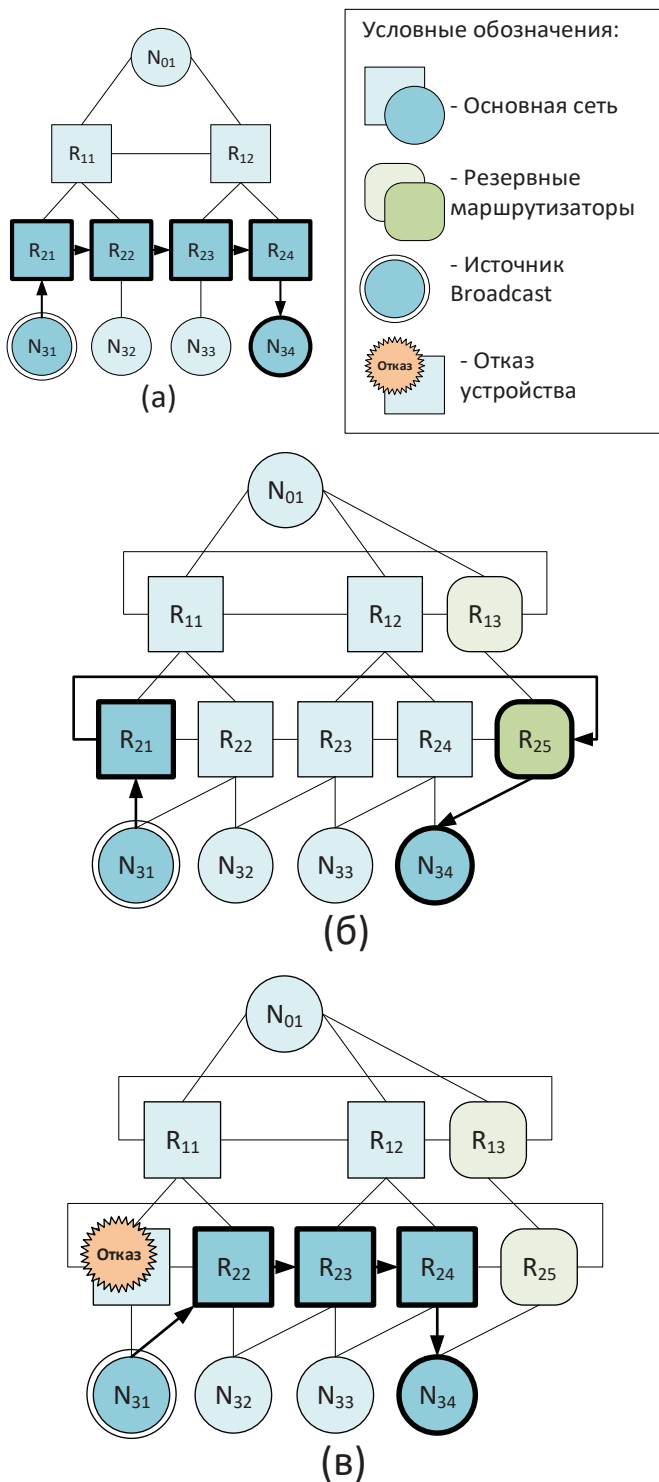


Рис. 8. Сеть с топологией дерева: (а) – без использования резервных маршрутизаторов; (б) – с использованием резервных маршрутизаторов; (в) – с использованием резервных маршрутизаторов и отказом маршрутизатора  $R_{21}$

Для сетей с топологией дерева добавление резервных маршрутизаторов и перекрестных связей может позволить сократить маршрут передачи широковещательных сообщений в случае, если источник и получатель расположены на одном уровне дерева.

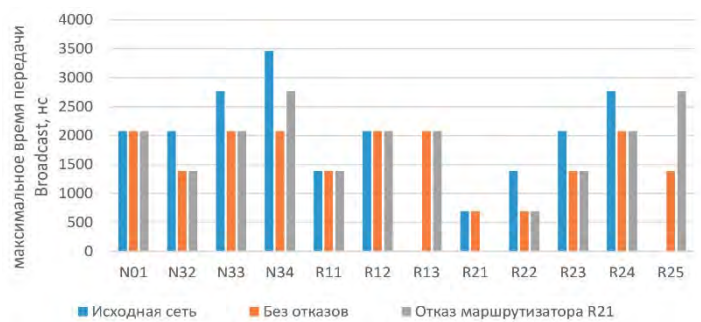


Рис. 9. Максимальное время передачи Broadcast в сети без отказов и в сети с отказом маршрутизатора  $R_{21}$

Для вычисления длины альтернативного маршрута длина исходного маршрута разбивается на две составляющие – длину участка маршрута, пролегающего между уровнями дерева  $H_r$  и длину участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня  $H_s$  по формуле (5):

$$H' = H_r + H'_s \quad (5)$$

где  $H'$  – длина исходного маршрута, сокращенная на 1 хоп ( $H' = H - 1$ ),  $H'_s$  – длина участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня, сокращенная на 1 хоп ( $H'_s = H_s - 1$ ). В случае, если длина участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня равно 0 (т.е. в ситуации, когда источник и приемник широковещательных сообщений подсоединены к одному коммутатору),  $H'_s = H_s$ .

Длина альтернативного маршрута рассчитывается по формуле (6):

$$L = H_r + (N - H'_s) \quad (6)$$

где  $N$  – число устройств внутри одного уровня (включая резервный маршрутизатор). Если длина альтернативного маршрута меньше длины исходного маршрута ( $L < H'$ ), то широковещательные сообщения будут передаваться по альтернативному маршруту через резервный маршрутизатор.

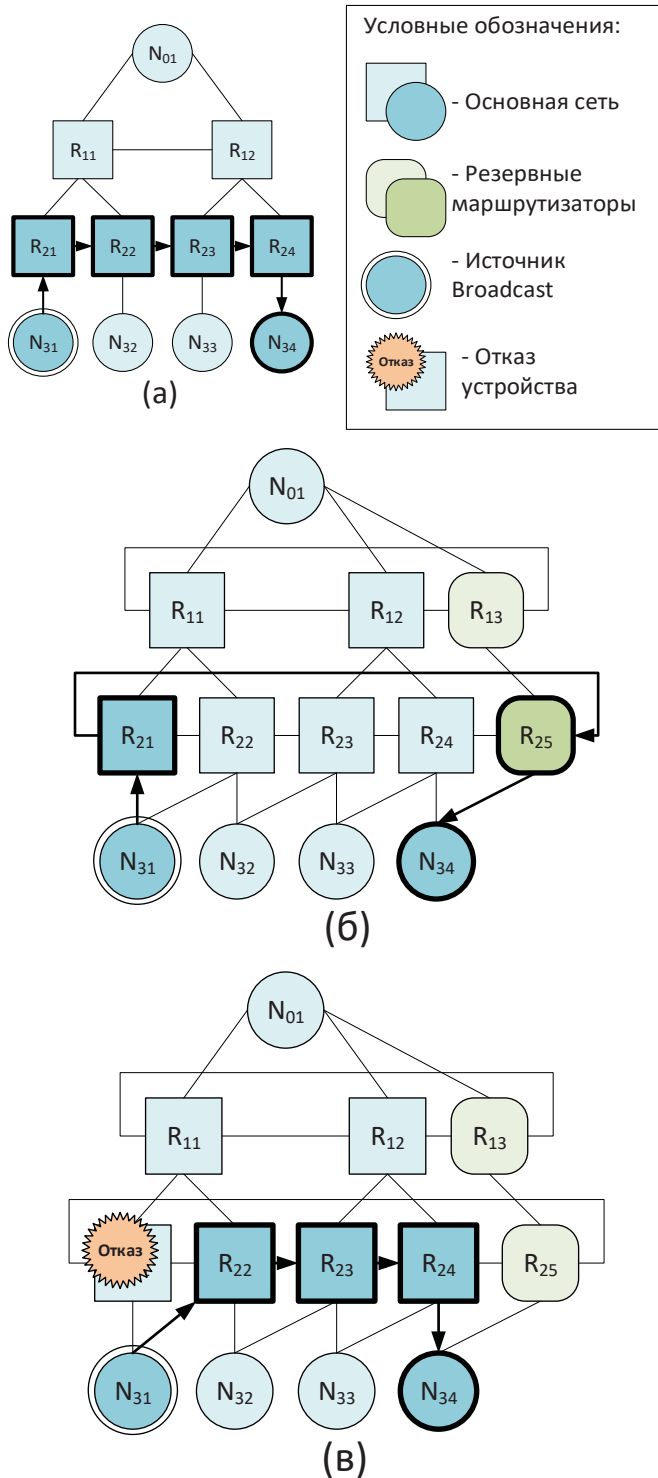
Также для сетей с топологией дерева длина маршрута, построенного при возникновении отказа на маршруте передачи широковещательных сообщений рассчитывается по формуле (7):

$$L_{err} = H_r + (N - H'_s - 2) \quad (7)$$

Худший случай представляет собой ситуацию, при которой  $H'_s = 0$ . Такая ситуация может возникнуть в случае, если отказ произошел в маршрутизаторе, с которым имеют связь как источник, так и приемник широковещательных сообщений. Следовательно, маршрут может увеличиться максимум на  $N-2$  хопа.

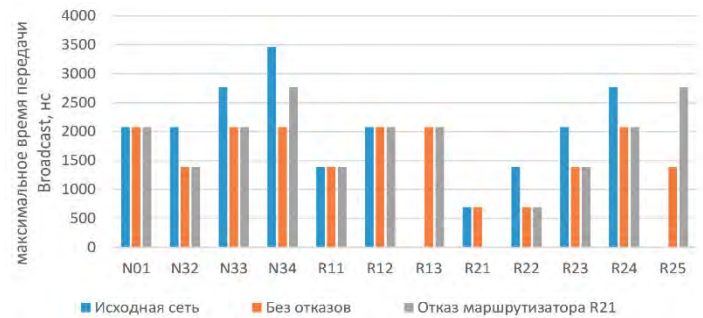
### Сравнительный анализ способов пространственного резервирования

Первый способ пространственного резервирования предполагает использование идентичных сетей. Вне зависимости от топологии, при использовании первого способа число устройств в сети увеличивается в два раза. В отличие от первого способа, второй способ предполагает меньшее число дополнительных устройств.



**Рис. 8.** Сеть с топологией дерева: (а) – без использования резервных маршрутизаторов; (б) – с использованием резервных маршрутизаторов; (в) – с использованием резервных маршрутизаторов и отказом маршрутизатора  $R_{21}$

Для сетей с топологией дерева добавление резервных маршрутизаторов и перекрестных связей может позволить сократить маршрут передачи широковещательных сообщений в случае, если источник и получатель расположены на одном уровне дерева.



**Рис. 9.** Максимальное время передачи Broadcast в сети без отказов и в сети с отказом маршрутизатора  $R_{21}$

Для вычисления длины альтернативного маршрута длина исходного маршрута разбивается на две составляющие – длину участка маршрута, пролегающего между уровнями дерева  $H_r$  и длину участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня  $H_s$  по формуле (5):

$$H' = H_r + H'_s \quad (5)$$

где  $H'$  – длина исходного маршрута, сокращенная на 1 хоп ( $H' = H - 1$ ),  $H'_s$  – длина участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня, сокращенная на 1 хоп ( $H'_s = H_s - 1$ ). В случае, если длина участка маршрута, пролегающего внутри одного уровня равно 0 (т.е. в ситуации, когда источник и приемник широковещательных сообщений подсоединены к одному коммутатору),  $H'_s = H_s$ .

Длина альтернативного маршрута рассчитывается по формуле (6):

$$L = H_r + (N - H'_s) \quad (6)$$

где  $N$  – число устройств внутри одного уровня (включая резервный маршрутизатор). Если длина альтернативного маршрута меньше длины исходного маршрута ( $L < H'$ ), то широковещательные сообщения будут передаваться по альтернативному маршруту через резервный маршрутизатор.

Также для сетей с топологией дерева длина маршрута, построенного при возникновении отказа на маршруте передачи широковещательных сообщений рассчитывается по формуле (7):

$$L_{err} = H_r + (N - H'_s - 2) \quad (7)$$

Худший случай представляет собой ситуацию, при которой  $H'_s = 0$ . Такая ситуация может возникнуть в случае, если отказ произошел в маршрутизаторе, с которым имеют связь как источник, так и приемник широковещательных сообщений. Следовательно, маршрут может увеличиться максимум на  $N-2$  хопа.

### Сравнительный анализ способов пространственного резервирования

Первый способ пространственного резервирования предполагает использование идентичных сетей. Вне зависимости от топологии, при использовании первого способа число устройств в сети увеличивается в два раза. В отличие от первого способа, второй способ предполагает меньшее число дополнительных устройств.

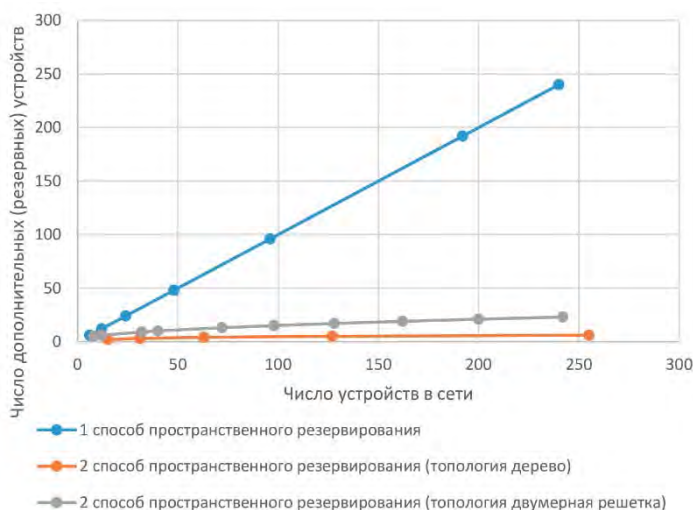


Рис. 10. Зависимость числа дополнительных устройств от числа устройств в сети

При использовании второго способа пространственного резервирования, число резервных устройств, которые необходимо подключить к сети зависит от топологии сети и от числа линий коммутаторов (для топологии решетка – строк и столбцов, для топологии дерево – уровней коммутаторов). На рисунке 10 представлен график зависимости числа дополнительных устройств от числа устройств в сети.

Другим преимуществом второго способа пространственного резервирования является возможность сокращения длин маршрутов. При добавлении резервных маршрутизаторов также добавляются перекрестные связи, а линии коммутаторов замыкаются, преобразовываясь в тор, что позволяет строить альтернативные маршруты меньшей длины.

Однако, сети, в которых используется второй способ пространственного резервирования облают меньшей живучестью в сравнении с сетями с резервными маршрутизаторами.

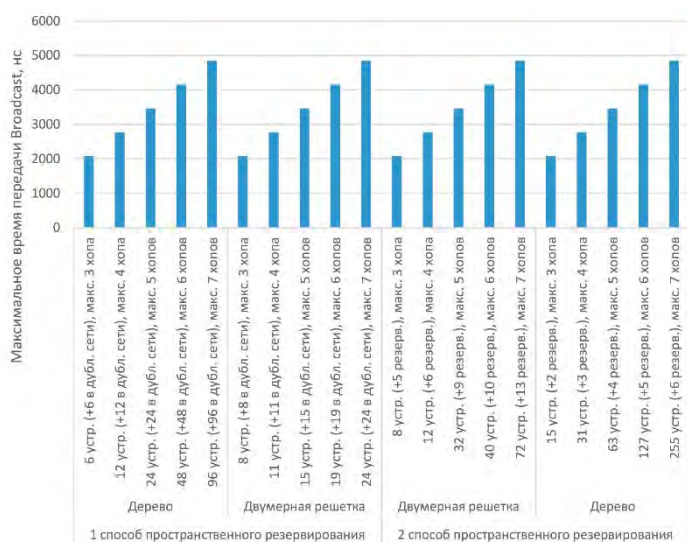


Рис. 11. Максимальное время передачи широковещательных сообщений в сетях с топологией двумерная решетка и дерево с различными длинами маршрутов

Для обоих способов пространственного резервирования, вне зависимости от используемой топологии характерно то, что при увеличении/уменьшении числа устройств в сети, максимальная длина маршрута также может увеличиться/уменьшиться. На рисунке 11 представлена гистограмма, отображающая максимальное время передачи широковещательных сообщений по сетям с топологией дерево и двумерная решетка. На гистограмме видно, что в сетях с одинаковыми максимальными длинами маршрутов максимальное время передачи широковещательных сообщений совпадает вне зависимости от топологии и способа пространственного резервирования.

### Динамическое изменение структуры сети из-за отказов, сбоев, восстановления после сбоев

Сбои и отказы могут быть довольно разнообразными по своей локализации и по формам проявления – в данном случае, ошибкам, к которым они приводят при распространении широковещательных сообщений. Применительно к передаче широковещательных сообщений можно выделить следующий набор типовых ошибок:

- Невозможность принять широковещательное сообщение по одному из каналов (портов маршрутизатора). Происходит в результате физического разрыва линии связи по каналу, в результате длительного действия помехи, в результате сбоев и отказов в блоке порта маршрутизатора/терминального узла. В данном исследовании мы приравниваем ситуацию, когда широковещательное сообщение не принято и ситуацию, когда широковещательное сообщение принято, но имеет не правильный формат (некорректные значения полей), поскольку такое искаженное широковещательное сообщение будет отброшено на приемной стороне на сетевом уровне.

- Невозможность передать широковещательное сообщение в один из каналов. Причины аналогичны причинам при невозможности приема. Отметим, что при возникновении разрыва или длительной помехи в физическом канале, невозможны и прием, и передача. Сбои и отказы внутри блоков контроллеров портов потенциально могут приводить к невозможности либо приема, либо передачи в отдельности

- Невозможность обработать широковещательное сообщение на сетевом уровне. Возникает из-за сбоев и отказов в блоке контроллера широковещательных сообщений сетевого уровня или из-за выхода из строя всего маршрутизатора (а также, отключения питания).

- Невозможность корректно обработать широковещательное сообщение из-за сброса (перезагрузки) маршрутизатора (или отдельного контроллера обработки широковещательных сообщений сетевого уровня), вследствие которого была потеряна информация о предыстории рассылки широковещательных сообщений (счет таймаутов и др.).

- Ситуации типа «бабблинг идиот», при которых в результате сбоев и / или отказов в сеть самопроизвольно начинают отправляться широковещательные сообщения с корректной структурой. Такие ситуации могут возникать, например, вследствие возникновения отказов типа «константная 1» для флагов приема широковещательных сообщений из отдельных портов, признака требования рассылки широковещательного

сообщения на сетевом уровне. В результате такое внешне корректное сообщение может рассылаться во все или какие-то отдельные выходные порты.

Отметим, что сбои и отказы могут происходить в сети по одному или группами. Во втором случае, несколько сетевых устройств, каналов связи переходит в состояние неработоспособности одновременно или почти одновременно (в течении интервала времени, меньшего, чем время распространения широковещательного сообщения по сети). Отказ одного устройства так же может развиваться постепенно. (Сначала может отказать один порт, потом следующий и т.д.)

Если мы оцениваем характеристики (время передачи широковещательного сообщения) с использованием первого метода, то нам необходимо будет выполнить следующие действия:

1. Определять этапы переходного процесса;
2. Определить состояния сети, соответствующие этим этапам, сформировать графы связей для каждого из этих состояний сети;
3. Выполнить расчеты характеристик с использованием алгоритма Ли.

При этом для определения этапов переходного процесса (исследования самого переходного процесса), определения набора состояний сети, графов связей необходим другой математический аппарат. В качестве такого математического аппарата могут использоваться временные автоматы. Отметим, что данный аппарат может использоваться и для оценки временных характеристик (в нем фактически может быть выполнена реализация первого метода).

### **Оценка характеристик передачи широковещательных сообщений с использованием временных автоматов**

Мы предлагаем подход к формированию модели сети SpaceFibre для определения набора состояний, которые проходят сеть в переходном процессе при возникновении сбоев и отказов и при выходе из состояний сбоев в штатную работу и для оценки временных характеристик.

В рамках данного подхода для моделирования сетевых устройств (маршрутизаторов и терминальных узлов) используются временные автоматы. В стандарте SpaceFibre широковещательные сообщения имеют наивысший приоритет по отношению к другим типам передаваемой информации. Для передачи широковещательных сообщений передача объектов данных других типов на время прерывается. Поэтому наличие / отсутствие передачи в сети других типов данных никак не влияет на передачу широковещательных сообщений, несмотря на то что для этого используются те же самые физические каналы между сетевыми устройствами. Вследствие этого в наших временных автоматах мы учитываем только передачу широковещательных сообщений.

Маршрутизаторы и терминальные узлы в сети могут иметь различное количество портов, поэтому необходимо, чтобы в моделях сетей временных автоматов количество портов могло задаваться параметрически (требуются возможности по статической реконфигурации). Как было отмечено выше, математический аппарат временных автоматов исполь-

зуется для оценки характеристик распространения широковещательных сообщений в условиях динамического изменения структуры сети, путей передачи. Для решения этой задачи временные автоматы, сети на базе временных автоматов должны обладать свойствами динамической реконфигурации. В настоящее время существует несколько различных подходов к формированию временных автоматов и сетей на базе временных автоматов, в которых обеспечиваются эти требования.

В [26-28] для исследования планирования в сетях был использован подход, в рамках которого для временных автоматов, используемых для моделирования сетевых устройств разработан универсальный интерфейс, включающий в себя типы каналов и глобальные переменные. Предлагаемая нами модель сети имеет общие черты с этой моделью. Нами также был разработан набор глобальных переменных и типы каналов, используемые для организации интерфейсов моделей. Количество каналов для моделей временных автоматов задается параметрически на этапе формирования сети временных автоматов. Для каждого сетевого устройства значение параметра – количества портов может быть определено индивидуально. В соответствии с этим были разработаны шаблоны временных автоматов, с возможностью задания параметров. Предлагаемые шаблоны будут рассмотрены далее в этом разделе.

Для того, чтобы моделировать изменение структуры сети, которое может происходить, в частности, из-за возникновения сбоев и отказов, могут использоваться динамические временные автоматы (dynamic timed automata (DTA)), предложенные в [29] и реконфигурируемые иерархические временные автоматы (reconfigurable hierarchical timed automata), предложенные в [30,31]. При использовании данного подхода может изменяться структура связей между локациями автоматов. Могут исключаться и добавляться ребра.

Однако, в нашей работе использован другой подход. Он основан на изменении атрибутов переходов между локациями автоматов в зависимости от значений глобальных переменных. За счет этого изменения автомат может использоваться для моделирования корректного и не корректного поведения сетевого устройства. (В разработанных шаблонах определено поведение, соответствующее корректной работе устройств и работе при возникновении сбоев и отказов.) Причем переход из состояния корректной работы в состояние не корректной работы может быть выполнен в любой момент времени. Моделирование исключения устройства из сети (моделирование ситуации отказа устройства) осуществляется без изменения структуры связей. Это позволяет устранить необходимость перехода от автоматов с реконфигурируемой структурой к альтернативным классическим временным автоматам для формальной верификации.

Для управления процессом генерации широковещательных сообщений терминальными узлами и моментами времени, в которые в сетевых устройствах должны возникать сбои и отказы, в сети используется служебный временной автомат – менеджер процесса моделирования. Данному временному автомату не соответствует никакое реальное устройство в сети.

Такой централизованный автомат позволяет «создавать» сбои и отказы в различные моменты времени по отношению к моментам времени, в которые рассылаются широковещательные сообщения. Это позволяет исследовать любые граничные ситуации. Также данный автомат используется для выполнения оценки времени распространения широковещательных сообщений по сети. Обобщенная схема предложенной сети временных автоматов представлена на рисунке 12. Она включает в себя автоматы четырех типов (на рисунке они представлены прямоугольниками):

- маршрутизаторы (на рисунке помечены  $R_j$ );
- терминальные узлы (на рисунке помечены  $T_j$ );
- физические каналы передачи данных (на рисунке помечены  $Ch_j$ );
- менеджер процесса моделирования ( $M$ ).

Для сети временных автоматов определены следующие глобальные параметры:

- $L$  – количество маршрутизаторов,
- $K$  – количество терминальных узлов,
- $C$  – количество каналов связи между маршрутизаторами и терминальными узлами

При исследовании некоторой сети количество маршрутизаторов, терминальных узлов и каналов связи между ними задается в соответствии с графом связей между сетевыми узлами

Для шаблонов временных автоматов, соответствующих маршрутизаторам и терминальным узлам определен параметр  $N_j$  – количество внешних портов соответствующего сетевого устройства. (Внутри шаблона для краткости будем обозначать данный параметр –  $N$ .) В модели автомата каждому порту ставится входной канал  $chi_l$  и выходной канал  $cho_l$ , где  $l \in [1, N]$  (в стандарте SpaceFibre внешние порты нумеруются с 1, порт с номером 0 зарезервирован как внутренний порт устройства, используемый для служебных приложений). Данные каналы используются для связи между маршрутизаторами и терминальными узлами. Передаваемые по ним события соответствуют широковещательным сообщениям, передаваемым в сети SpaceFibre. Для связи между соответствующими шаблонами автоматов используются глобальные каналы, которые названы  $chs_{i,j}$ , где  $i \in [0, C-1]$ ,  $j \in [0, 1]$ . (Двойная нумерация используется, поскольку физические каналы связи являются двунаправленными.

Одно из направлений имеет номер 0, второе – номер 1.) При исследовании некоторой сети каналы  $chs_{i,j}$  связывают временные автоматы в соответствии с графом связей для данной сети. На рисунке 12 наименования входных и выходных каналов по отношению к временным автоматам обозначены внутри прямоугольников, соответствующих конечным автоматам. На этом рисунке стрелками показаны связи между временными автоматами на базе каналов. Над стрелками подписаны глобальные идентификаторы каналов.

Шаблоны временных автоматов терминальных узлов связаны с менеджером процесса моделирования. Для этого используется набор каналов  $send_i$  и  $rec_i$ , где  $i \in [0, K-1]$ . Каналы  $send$  являются выходными для автомата менеджера и входными для автомата терминального узла. По ним передаются события, соответствующие командам отправки широковещательного.

Каналы  $rec$  являются выходными для автомата терминального узла и входными для автомата менеджера. Автомат терминального узла отправляет в этот канал событие при приеме очередного широковещательного сообщения.

Поскольку для многих задач необходимо оценивать и время распространения широковещательных сообщений до маршрутизаторов, шаблоны маршрутизаторов также связаны с менеджером процесса моделирования каналами  $rec$ .

Для сети определены две глобальные переменные –  $ERR[L+K]$  и  $\{ERR\_chs\}$ . Переменная  $ERR$  представляет собой массив с элементами булевского типа. Элементы  $ERR[0] - ERR[L-1]$  соответствуют автоматам – маршрутизаторам, элементы  $ERR[L] - ERR[K-1]$  соответствуют автомата – терминальным узлам. Если  $ERR[i] = false$ , то соответствующий автомат функционирует в соответствии со схемой поведения для исправного устройства. В противном случае – в соответствии со схемой поведения для отказа.

Значениями данной переменной управляет автомат менеджера процесса моделирования (в соответствии со сценарием теста). Для остальных временных автоматов они доступны на чтение.  $\{ERR\_chs\}$  представляет собой множество глобальных каналов, для которых произошел отказ или сбой. Автомат – менеджер процесса моделирования управляет добавлением каналов в это множество и исключением их из него в соответствии со сценарием теста. Для остальных временных автоматов данное множество доступно на чтение.

Использование отдельных переменных для моделирования отказов, сбоев в маршрутизаторе в целом и отдельных каналах позволяет увеличить степень детализации возможных ошибочных сценариев, по сравнению с подходом, предложенным в [32], в котором такая градация отсутствует

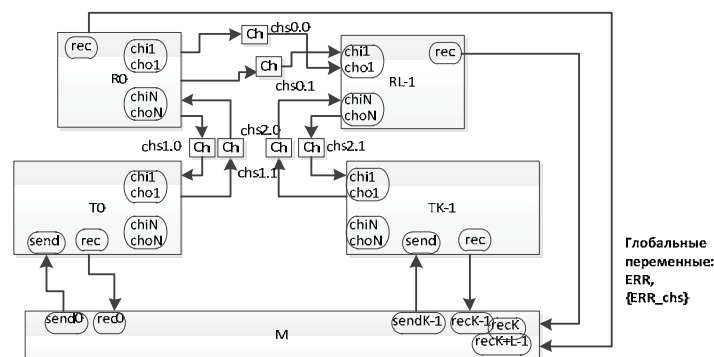


Рис. 12. Обобщенная схема сети временных автоматов

На рисунке 13 представлен предлагаемый шаблон временного автомата для маршрутизатора. На этом рисунке овалами обозначены локации. Для каждой локации указан уникальный идентификатор и мнемоническое обозначение. Для тех локаций, для которых инвариант не является константным значением true, указан также инвариант. На этом рисунке переходы обозначены стрелками. Для каждого перехода указан уникальный идентификатор, условие перехода и связанные с ним действия. Более жирными линиями выделены стрелки, которые соответствуют переходам, используемым для моделирования ситуаций сбоев и отказов.

Эти переходы могут быть выполнены в любой момент времени, что позволяет промоделировать возникновение сбоев и отказов в любые моменты времени функционирования системы.

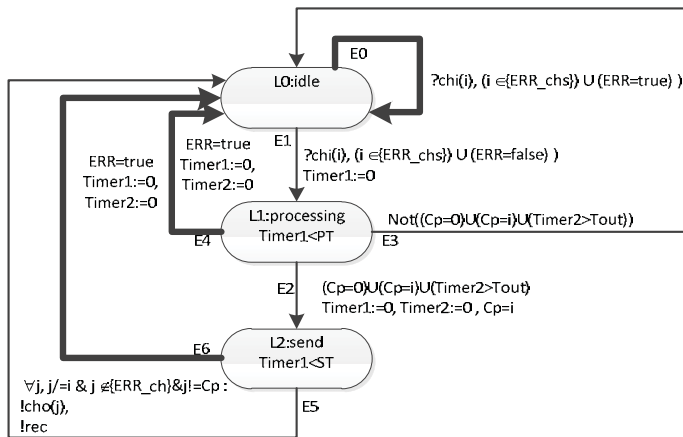


Рис. 13. Шаблон временного автомата, соответствующего маршрутизатору

В данном шаблоне автомата имеется 3 локации (L0, L1, L2) и 6 переходов (E0 – E5). В шаблоне используется 2 переменные – таймера (Timer1, Timer2). Для шаблона определены параметры:

PT – время обработки ширококестельного сообщения ( $\lambda n$ )

ST – время передачи ширококестельного сообщения через входные и выходные порты маршрутизатора ( $\lambda port\_out + \lambda phy + \lambda port\_in$ )

Для шаблона определена локальная переменная Cp для хранения номера порта, из которого поступило ширококестельное сообщение.

Для шаблона определен параметр N – количество входных каналов и выходных каналов, по которым передаются события, соответствующие ширококестельным сообщениям. Входные каналы обозначены  $chi(i)$ , в скобках указан порядковый номер канала. Выходные каналы обозначены  $cho(i)$ , в скобках указан порядковый номер канала.

Для шаблона наблюдаема переменная ERR (глобальная переменная ERR(i) в соответствии с номером сетевого устройства, которому соответствует данный шаблон). Если она принимает значение true, то это соответствует состоянию невозможности обработать ширококестельное сообщение на сетевом уровне. Для шаблона определена глобальная переменная – множество  $\{ERR\_chs\}$ . Оно содержит номера каналов, по которым невозможна передача или прием ширококестельного сообщения. (В данном рассмотрении для сокращения условий переходов мы объединили эти две ошибки в одну.) Значениями этих переменных управляет менеджер процесса моделирования.

Рассмотрим более подробно атрибуты переходов и инварианты. Переход E0 используется для моделирования сбоев и отказов. Если входной канал, по которому пришло очередное событие (ширококестельное сообщение), в текущий момент времени принадлежит к множеству ERR\_chs, то событие отбрасывается без каких-либо дополнительных действий.

Это позволяет промоделировать ситуации отсутствия возможности передачи из-за физического разрыва соединения, действия долговременной помехи. Если ERR = true, то событие также отбрасывается, что позволяет промоделировать текущую неработоспособность данного маршрутизатора. (В реальной сети в подобных ситуациях соответствующие ширококестельные сообщения также будут отброшены/не отправлены.) По этому переходу временной автомат возвращается обратно в локацию L0. Отметим, что в общем случае в этой локации автомат может находиться сколько угодно долго, поэтому инвариант для нее имеет значение true.

Переход E1 срабатывает, если событие пришло по каналу, не принадлежащему в текущий момент времени ERR\_chs и ERR=false. Это соответствует исправности канала и маршрутизатора в текущий момент времени. Автомат переходит в локацию L1. Переменная Timer1 сбрасывается. В локации L1 автомат будет находиться или до истечения времени, задаваемого параметром PT (время обработки ширококестельного сообщения в маршрутизаторе) или до момента, когда переменная ERR примет значение true (маршрутизатор перешел в неработоспособное состояние).

Если автомат находился в локации L1 до  $Timer1=PT$ , то он перейдет по переходу E2, если ширококестельное сообщение было признано корректным и по переходу E3, если ширококестельное сообщение было признано не корректным. По E3 осуществляется переход в локацию L0, что соответствует отбрасыванию некорректного ширококестельного сообщения. Если переменная ERR принимает значение true, когда автомат находится в локации L1, то он переходит в локацию L0 по переходу E4, что соответствует выходу маршрутизатора из строя.

В локации L2 автомат может находиться либо до момента, когда ERR=true, либо пока Timer1 меньше параметра ST. (Значение данного параметра определяет время рассылки ширококестельного по каналам). Если ERR = true, то автомат переходит в локацию L0, что соответствует выходу маршрутизатора из строя. Если же автомат выполняет переход E5, то события, соответствующие ширококестельным сообщениям рассылаются во все исправные выходные каналы, кроме того, из которого он пришел. Автомат переходит в локацию L0.

Таким образом, переходы E0, E4, E6 обеспечивают возможность моделирования отказов и сбоев маршрутизаторов и каналов связи сети в ходе ее функционирования.

На рисунке 14 представлен предложенный шаблон для терминального узла. На этом рисунке жирными линиями выделены переходы, позволяющие выполнить моделирование сбоев и отказов.

В отличие от модели маршрутизатора, модель терминального узла при приходе события, соответствующего ширококестельному сообщению, регистрирует его, но не посылает события, соответствующие рассылке ширококестельного сообщения, в выходные каналы. В менеджер процесса моделирования по каналу gес посылается событие.

Отправка события, соответствующего рассылке ширококестельного сообщения осуществляется по команде от менеджера процесса моделирования (для этого используется канал send).

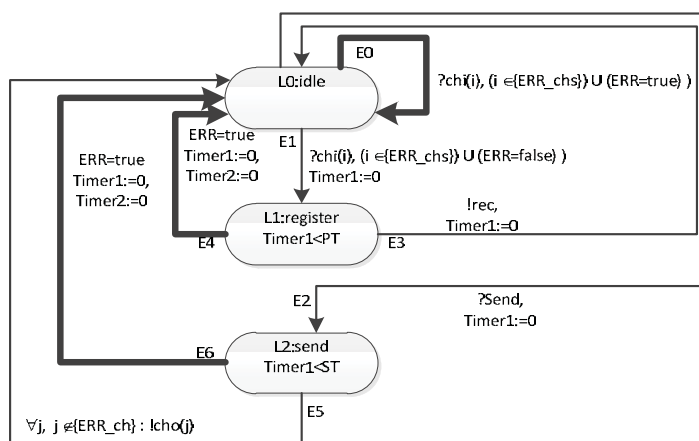


Рис. 14. Шаблон временного автомата, соответствующего терминальному узлу

На рисунке 15 представлен временной автомат, использующийся для моделирования канала связи.

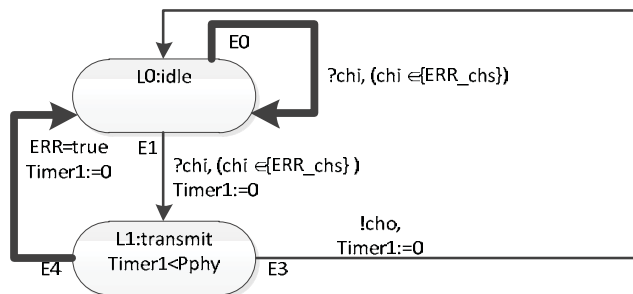


Рис. 15. Шаблон временного автомата, соответствующего физическому каналу связи

Данный временной автомат имеет две локации и 4 перехода. Переходы, отмеченные жирными линиями, позволяют промоделировать сбои и отказы в физической линии связи. У автомата имеется входной канал  $ch_i$  и выходной канал  $cho$ .

Для данного временного автомата определен параметр:

$P_{phy}$  – время передачи широкополосного сообщения через данную физическую линию связи ( $\lambda_{phy}$ )

На базе таких шаблонов временных автоматов могут быть сформированы сети с произвольной топологией (любым графом связей между маршрутизаторами и терминальными узлами). Пример фрагмента такой сети представлен на рисунке 16.

Каждому терминальному узлу и маршрутизатору поставлена в соответствие переменная  $ERR.T_i$  или  $ERR.R_i$  соответственно (из массива  $ERR$ ).

Для того, чтобы промоделировать сбой или отказ сетевого узла, происходящий в некоторый момент времени, менеджер процесса моделирования устанавливает соответствующую переменную в значение  $true$ . В случае моделирования сбоя, через некоторое время данная переменная может быть вновь установлена в значение  $false$ .

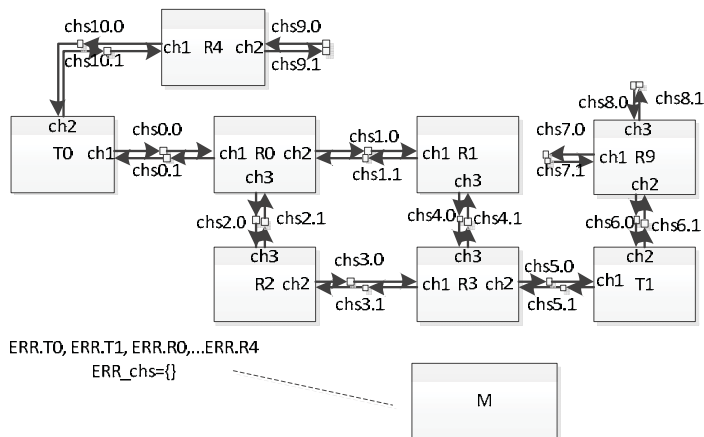


Рис. 16. Пример фрагмента сети временных автоматов

Для того, чтобы промоделировать сбой или отказ канала связи, идентификатор соответствующего канала помещается в множество  $ERR\_chs$ . Если выполняется моделирование сбоя, то через некоторое время идентификатор данного канала может быть исключен из этого множества. Например, в некоторый момент времени менеджер процесса моделирования может присвоить переменной  $ERR.R2=true$ ,  $ERR\_chs=\{chs6\}$ . В результате текущая конфигурация сети будет выглядеть так, как показано на рисунке 17.

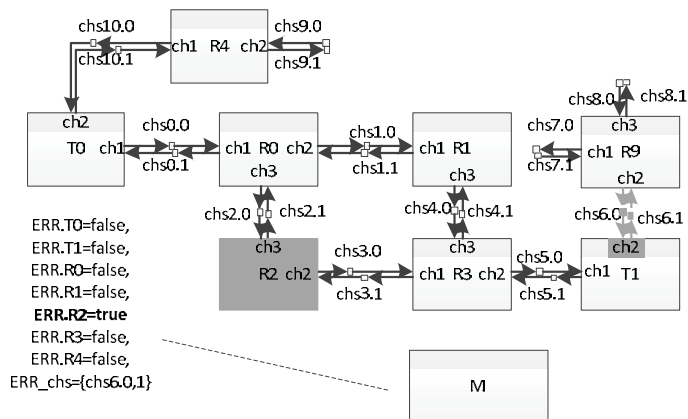


Рис. 17. Пример текущей конфигурации сети с отключенным маршрутизатором и каналом связи

На этом рисунке светло серым отмечены компоненты, которые в текущей конфигурации считаются не работоспособными. Если в момент изменения конфигурации автомат, соответствующий маршрутизатору R2 не находился в локации L0, то он перейдет в локацию L0. Если в него по каналам  $chs2$ ,  $chs3$  будут поступать события (соответствующие Бродкасте), то они будут отброшены. В автомате, соответствующем маршрутизатору R9 отправка событий в канал  $ch2$  (глобальный идентификатор  $chs6$ ) не будет осуществляться. Аналогично, в автомате, соответствующем терминальному узлу T1 отправка событий в канал  $ch2$  (глобальный идентификатор  $chs6$ ) не будет осуществляться.

Автомат – менеджер процесса моделирования функционирует в соответствии со сценарием теста. Он изменяет значения  $ERR$  и  $\{ERR\_chs\}$ , отправляет события в каналы  $send_i$ , принимает события из каналов  $rec_i$ . Для менеджера тестов определено  $L+K$  таймеров  $Timer\_ti, i \in [0, L+K-1]$  для оценки времени распространения Бродкаст до терминальных узлов и маршрутизаторов. Данные таймеры сбрасываются в момент отправки события по каналу  $send_i$ . Значения соответствующих таймеров в момент приема событий по канала  $rec_i$ , позволяют определить время доставки до соответствующих сетевых устройств.

В сеть временных автоматов могут быть добавлены служебные переменные, позволяющие собирать в процессе моделирования различную статистическую информацию. В частности, для каждого канала может быть добавлена переменная – счетчик широковещательных сообщений ( $Broadcast\_counter$ ), позволяющая оценить загрузку каналов распространением широковещательных сообщений, фактическую долю пропускной способности каналов, занимаемую передачей широковещательных сообщений. Для шаблона автомата маршрутизатора и терминального узла для этого в набор действий, связанных с переходом  $E5$  необходимо добавить действие  $Broadcast\_counter = Broadcast\_counter + 1$ ;

Использование данного подхода, позволяет получить более точную оценку времени распространения широковещательных сообщений в условиях наличия сбоев в сети. Использование данного подхода позволило показать, что итоговое дерево распространения широковещательного сообщения и, соответственно, время распространения широковещательного сообщения до терминальных узлов может быть существенно больше того, которое получается с использованием алгоритма Ли при возникновении одного из следующих условий:

- продолжительность действия сбоя меньше времени распространения широковещательного сообщения по сети;
- восстановление после сбоя происходит в процессе распространения широковещательного сообщения по сети.

Далее приведем пример, иллюстрирующий это.

Пример фрагмента сети, представлен на рисунке 18.

В этом примере кратчайший путь распространения широковещательного сообщения между  $T1$  и  $T7$ , получаемый с использованием первого метода:

$$T1 \rightarrow R4 \rightarrow R5 \rightarrow R51 \rightarrow R52 \rightarrow T7$$

Для него может быть определено время распространения широковещательного сообщения с использованием алгоритма Ли.

Рассматривался следующий сценарий поведения системы. В момент прохождения очередного широковещательного сообщения через маршрутизатор  $R5$  его канал  $ch14$ ,  $ch4$  находился в состоянии неисправности (рисунок 18(а)). Сразу после прохождения широковещательного сообщения для данного маршрутизатора переменная  $ERR$  была установлена в значение  $true$  (рис. 18б). Далее, через время меньшее, чем время распространения широковещательного сообщения по пути  $R6 - R50$  данная переменная была установлена в значение  $false$  (рис. 18в). (Это соответствует перезагрузке маршрутизатора.)

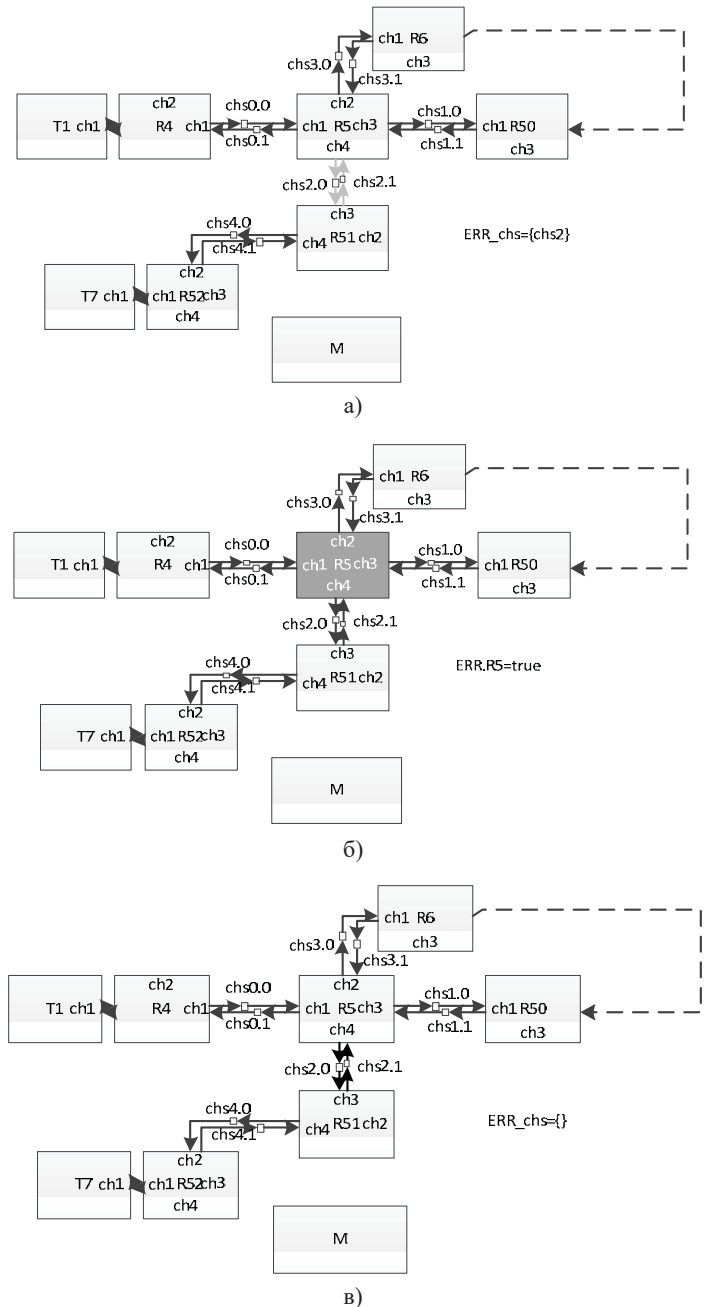


Рис. 18. Пример разных конфигураций фрагмента сети

Далее широковещательное сообщение пришло по каналу 3 в маршрутизатор и был разослан им в каналы 1, 2, 3, 4. В результате данное широковещательное сообщение достигло маршрутизатора  $R51$  по следующему пути:

$$T1 \rightarrow R4 \rightarrow R5 \rightarrow R6 \rightarrow \dots \rightarrow R50 \rightarrow R5 \rightarrow R51 \rightarrow R52 \rightarrow T7$$

Для этого понадобилось время существенно большее того, которое может быть рассчитано при построении дерева распространения без учета такой возможной схемы сбоя – восстановление. (Маршрутизаторы  $R4$ ,  $R6$ ,  $R50$  он также достиг, но поскольку для них не выполнялось сброса, в них он был определен как дублированный.)

Потенциально такая ситуация может привести к некорректной интерпретации данного широковещательного сообщения (последовательности широковещательных сообщений) в соответствующих терминальных узлах. Применительно к нашему примеру, это будут терминальные узлы, подключенные к маршрутизатору R51. Если, например, другое широковещательное сообщение (широковещательное сообщение, соответствующее другому событию, имеющий другой номер канала, но логически связанный с рассматриваемым) отправляется по сети через время, достаточное для распространения первого широковещательного сообщения в условиях отсутствия сбоев, то до этих терминальных узлов оно будет доставлено раньше, чем предыдущее.

Если для парирования отказов в сети используются подходы [23–25], то за счет наличия независимых деревьев распространения некоторое количество широковещательных сообщений достигнет всех терминальных узлов вовремя. Однако, и в этом случае в алгоритмах обработки широковещательных сообщений в терминальных узлах потенциальную возможность запаздывания из-за сбоев необходимо учитывать хотя бы для того, чтобы корректно их отбросить.

Таким образом, использование данного метода позволяет получить более точные характеристики времени распространения широковещательных сообщений в условиях динамически изменяющейся структуры сети.

### Заключение

В статье предложены методы оценки характеристик передачи широковещательных сообщений для сетей SpaceFibre с использованием различных способов пространственного резервирования для парирования отказов и сбоев. Первый метод ориентирован на оценку характеристик в условиях, когда структура сети не изменяется непосредственно в процессе распространения широковещательного сообщения.

Второй метод позволяет оценить характеристики передачи широковещательных сообщений с учетом возможности динамического изменения структуры сети, в случаях, если отказы, сбои, восстановление после сбоев происходят непосредственно во время распространения широковещательного сообщения.

Для реализации второго метода предложена схема сети временных автоматов, шаблоны временных автоматов, позволяющие оценивать характеристики в условиях динамически возникающих сбоев и отказов.

При использовании данного метода обеспечивается возможность оценить последствия динамического изменения структуры сети в процессе распространения широковещательного сообщения, оценить характеристики передачи широковещательных сообщений при возникновении сбоев и отказов отдельных портов маршрутизатора (в частности, последовательной деградации маршрутизатора), при которых остальная часть маршрутизатора сохраняет корректное функционирование. Это позволяет более точно оценивать характеристики системы при различных сценариях возникновения сбоев и отказов.

С использованием данного подхода были определены условия, при которых дерево распространения широковещательного сообщения, и, соответственно время его распространения оказываются существенно больше, чем при оценках, получаемых с использованием алгоритма Ли.

Оценки, получаемые с использованием этих методов, могут быть использованы при выборе схем структурного резервирования, конфигурировании сети (выборе параметров конфигурации) т.к. они позволяют оценить достижимое время передачи широковещательных сообщений.

### Благодарности

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".*

### Литература

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C // ESA-ESTEC: Noordwijk, Netherlands, 2019.
2. Alur R., Dill D. A theory of timed automata // Theoretical Computer Science, 1994, 126(2), pp. 183–235. doi:10.1016/0304-3975(94)90010-8
3. Карпов Ю.Г. Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем // СПб.: БХВ-Петербург, 2010. С. 1–560.
4. Abd Alrahman Y., Azzopardi S., Piterman N. Model Checking Reconfigurable Interacting Systems // In Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Adaptation and Learning, 2022. Vol. 13703, pp. 59–72. doi: 10.1007/978-3-031-19759-8\_
5. Вельдер С.Э., Лукин М.А., Шальто А.А., Яминов Б.Р. Верификация автоматных программ // Санкт-Петербург «Наука» 2011. С 1–247.
6. Govind R., Herbreteau F., Srivathsan B., Walukiewicz I. Abstractions for the local-time semantics of timed automata: a foundation for partial-order methods // 37th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS), 2022. pp. 1–22. doi: 10.1145/3531130.3533343
7. Alur R., La Torre S., Pappas G. Optimal Paths in Weighted Timed Automata // Theoretical Computer Science, 2004, 318(3), pp. 297–322. doi: 10.1016/j.tcs.2003.10.038
8. André E., Lime D., Roux O.H. Decision Problems for Parametric Timed Automata // ICFEM, Lecture Notes in Computer Science, Springer: Tokyo, Japan, 2016. Vol. 10009, pp. 400–416. doi: 10.1007/978-3-319-47846-3\_25
9. André E., Lime D., Ramparison M. TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants // FORMATS: Lecture Notes in Computer Science, Springer: Beijing, China, 2018. Volume 11022, pp. 37–52. doi: 10.1007/978-3-030-00151-3\_3
10. Jensen P.G., Kiviriga A., Guldstrand Larsen K., Nyman U., Mijaika A., Høiriis Mortensen J. Monte Carlo Tree Search for Priced Timed Automata // Quantitative Evaluation of Systems: 19th International Conference, QEST 2022, Springer: Cham, Switzerland: 2022. Vol. 13479, pp. 381–398. doi:10.1007/978-3-031-16336-4\_19
11. Beneš N., Bezděk P., Larsen K.G., Srba J. Language Emptiness of Continuous-Time Parametric Timed Automata // In ICALP: Lecture Notes in Computer Science, Part II, Springer: Kyoto, Japan, 2015. Vol. 9135, pp. 69–81. doi: 10.1007/978-3-662-47666-6\_6
12. André E. What's decidable about parametric timed automata? // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2019. Vol. 21.2, pp. 203–219. doi: doi.org/10.1007/s10009-017-0467-0

# METHODS FOR ESTIMATING THE PROPAGATION TIME OF BROADCAST MESSAGES IN SPACEFIBRE NETWORKS UNDER FAILURE AND FAULTS WITH VARIOUS SPATIAL REDUNDANCY TYPES

ELENA A. SUVOROVA

Saint Petersburg, Russia, wildcat15@yandex.ru

NADEZHDA YU. CHUMAKOVA

Saint Petersburg, Russia, nadezhda.chumakova@guap.ru

**KEYWORDS:** *SpaceFibre, broadcast messages, dynamic reconfiguration, structural redundancy, timed automata.*

## ABSTRACT

**Introduction:** Introduction: the reliability and propagation time of broadcast messages are important characteristics for computer networks based on the SpaceFibre standard. To faults and failures mitigation in these networks, various mechanisms of structural redundancy can be used, which affect the propagation time of broadcast messages. Due to the peculiarities of broadcast message propagation rules in SpaceFibre networks, manually evaluation of their characteristics is very problematic, errors are possible due to the fact that not all factors will be taken into account. Therefore, there is a requirement to develop automated methods for assessing characteristics. **Purpose:** the purpose of the study is to develop methods for evaluating the transmission characteristics of broadcast messages in SpaceFibre networks. **Methods:** the developed methods and algorithms are based on the elements of graph theory (searching for the shortest paths), on the theory of timed automata, networks of timed automata. An approach has been developed to the development of timed

automata and a network based on timed automata for estimating the transmission time of broadcast messages, which differs from known methods with the possibility of dynamic reconfiguration. **Results:** The use of the developed methods makes it possible to evaluate the propagation characteristics of broadcast messages under conditions of static and dynamic changes in the network structure due to failures and faults. The obtained results can be used to select structural redundancy approach for the network and can significantly simplify the process of generating configuration parameters for network devices. Practical relevance: The proposed method made it possible to identify the conditions under which the propagation time of broadcast messages in the presence of failures and recovery after failures turns out to be significantly higher than that obtained in the analysis without taking into account the possibility of dynamic changes in the network structure.

**Discussion:** There are no analogues of the proposed method for estimating the propagation characteristics of broadcast messages for SpaceFibre networks.

## REFERENCES

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. ESA-ESTEC: Noordwijk, Netherlands, 2019.
2. R. Alur, D. Dill. A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science*, 1994, no. 126(2), pp. 183-235. doi: 10.1016/0304-3975(94)90010-8
3. Yu.G. Karpov. Model checking. Verification of parallel and distributed software systems. *BHV: Saint Petersburg*, Russia, 2010, pp. 1-560. (In Russian)
4. Y. Abd Alrahman, S. Azzopardi, N. Piterman. Model Checking Reconfigurable Interacting Systems. In *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Adaptation and Learning*. 2022. Vol. 13703, pp. 59-72. doi: 10.1007/978-3-031-19759-8\_23
5. S.E. Velder, M.A. Lukin, A.A. Shalyto, B.R. Yaminov. Verification of automata-based programs. Saint Petersburg: Nauka. 2011, pp. 1-102. (In Russian)
6. R. Govind, F. Herbreteau, B. Srivathsan, I. Walukiewicz. Abstractions for the local-time semantics of timed automata: a foundation for partial-order methods. *37th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS)*, 2022, pp. 1-22. doi: 10.1145/3531130.3533343
7. R. Alur, S. La Torre, G. Pappas. Optimal Paths in Weighted Timed Automata. *Theoretical Computer Science*, 2004, no. 318(3), pp. 297-322. doi: 10.1016/j.tcs.2003.10.038
8. E. Andre, D. Lime, O.H. Roux. Decision Problems for Parametric Timed Automata. *ICFEM, Lecture Notes in Computer Science*, Springer: Tokyo, Japan, 2016. Vol. 10009, pp. 400-416. doi: 10.1007/978-3-319-47846-3\_25
9. E. Andre, D. Lime, M. Ramparison. TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants. *FORMATS: Lecture Notes in Computer Science*, Springer: Beijing, China, 2018. Vol. 11022, pp. 37-52. doi: 10.1007/978-3-030-00151-3\_3
10. P.G. Jensen, A. Kiviriga, K. Guldstrand Larsen, U. Nyman, A. Mijaika, J. Hoiris Mortensen. Monte Carlo Tree Search for Priced Timed Automata. *Quantitative Evaluation of Systems: 19th International Conference, QEST 2022*, Springer: Cham, Switzerland: 2022. Vol. 13479, pp. 381-398. doi: 10.1007/978-3-031-16336-4\_19
11. N. Benes, P. Bezdek, K.G. Larsen, J. Srba. Language Emptiness of Continuous-Time Parametric Timed Automata. *ICALP: Lecture Notes in Computer Science, Part II*, Springer: Kyoto, Japan, 2015. Vol. 9135, pp. 69-81. doi: 10.1007/978-3-662-47666-6\_6
12. E. Andre What's decidable about parametric timed automata? *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2019. Vol. 21.2, pp. 203-219. doi: doi.org/10.1007/s10009-017-0467-0
13. S. Chakraborty, L.T.H. Phan, P.S. Thiagarajan. Event Count Automata: A State-based Model for Stream Processing Systems. *26th IEEE Real-Time Systems Symposium*, 2005, pp. 87-98. doi:10.1109/RTSS.2005.21
14. M. Boyer, P. Roux. Embedding network calculus and event stream theory in a common model. *21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2016*, pp. 1-8. doi: 10.1109/ETFA.2016.7733565
15. Y. Hammal, Q. Monnet, L. Mokdad, J. Ben-Othman, A. Abdelli. Timed automata based modeling and verification of denial of service attacks in wireless sensor networks. *Studia Informatica Universalis*. 2014, no. 12 (1), pp. 1-46.

16. M. Anand, S. Dajani-Brown, S. Vestal, I. Lee. Formal Modeling and Analysis of AFDX Frame Management Design. *9th IEEE International Symposium on Object-oriented Real-time Distributed Computing (ISORC 2006)*, 2006, pp. 393-399. doi: 10.1109/ISORC.2006.35
17. R. Govind, F. Herbreteau, B. Srivathsan, I. Walukiewicz. Revisiting local time semantics for networks of timed automata. *30th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2019)*. 2019, pp. 1-16. doi: 10.48550/arXiv.1907.02296
18. S. Akshay, P. Gastin, R. Govind, B. Srivathsan. Simulations for Event-Clock Automata. *33rd International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2022)*, 2022. Vol. 243. pp. 13:1-13:18. doi: 10.48550/arXiv.2207.02633
19. Y. Zhan, M.S. Hsiao. Breaking Down High-Level Robot Path-Finding Abstractions in Natural Language Programming. *AlxIA 2020 - Advances in Artificial Intelligence*, Springer: Cham, Switzerland, 2021. Vol. 12414, pp. 59-72.
20. N. Sherwani. Algorithms for VLSI Physical Design Automation, 3rd ed. Springer: New York, USA. 1998, pp. 247-290. doi: 10.1007/b116436
21. J. Baillieul, P.J. Antsaklis. Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. *Proc. IEEE 2007*. Vol. 95, no. 1, pp. 9-28. doi: 10.1109/JPROC.2006.887290
22. M.L. Shooman. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. John Wiley & Sons, Inc: New York, USA, 2002, pp. 1-528.
23. R.L. Alena, J.P. Ossenfort, K.I. Laws, A. Goforth. Communications for Integrated Modular Avionics. *IEEE Aerospace Conference*, 2007, pp. 1-18. doi: 10.1109/AERO.2007.352639
24. H. Butz. The airbus approach to open integrated modular avionics (IMA): technology, methods, processes and future road map. *Aircraft System Technologies*, 2007, pp. 1-11.
25. Aircraft Data Network Part 7 Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network. *ARINC Specification 664*, Part 7. Aeronautical Radio, Inc., 2005.
26. A.B. Glonina, V.V. Balashov. On the Correctness of Real-Time Modular Computer Systems Modeling with Stopwatch Automata Networks. *Modeling and Analysis of Information Systems*, 2018. Vol. 25, no. 2 (74), pp. 174- 192. doi:10.18255/1818-1015-2018-2-174-192
27. A.B. Glonina. A tool system for schedulability analysis of modular computer systems configurations. Lomonosov Moscow State University, 2020, No. 3, pp. 16-29. (In Russian)
28. A.B. Glonina. General model of real-time modular computer systems operation for checking acceptability of such systems configurations. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Informatics"*, 2018. Vol. 6, No. 4, pp. 43-59. doi:10.14529/cmse170404
29. S. Tigane, F. Guerrouf, N. Hamani, L. Kahloul, M. Khalgui, M.A. Ali. Dynamic Timed Automata for Reconfigurable System Modeling and Verification. *Axioms*. 2023, no. 12, pp. 1-230. doi:10.3390/axioms12030230
30. R. Bettira, L. Kahloul, M. Khalgui, Z. Li, Reconfigurable Hierarchical Timed Automata: Modeling and Stochastic Verification. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2019, pp. 2364-2371. doi: 0.1109/SMC.2019.8913890
31. R. Bettira, L. Kahloul, M. Khalgui. A Novel Approach for Repairing Reconfigurable Hierarchical Timed Automata. *15th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE 2020)*. 2020. pp. 398-406. doi:10.5220/0009408503980406
32. I. Tahiri, A. Philippot, V. Carre-Menetrier, A. Tajer. TimeBased Estimator for Control Reconfiguration of Discrete Event Systems (DES). *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2019, pp. 1-7. doi:10.1109/CoDIT.2019.8820585

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS:

**Elena A. Suvorova**, PhD, docent of Department of aerospace computer and software systems, Head of the "Systems and Networks-on-Chip" laboratory of Aerospace R&D Centre of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

**Nadezhda Yu. Chumakova**, assistant of the Department of aerospace computer and software systems, engineer of Aerospace R&D Centre of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

---

**For citation:** Suvorova E.A., Chumakova N.Yu. Methods for estimating the propagation time of broadcast messages in Spacefibre networks under failure and faults with various spatial redundancy types. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No 5. P. 39-56. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-39-56 (In Rus)



# АКТОРНО-СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**ИСКАНДЕРОВ**

**Юрий Марсович<sup>1</sup>**

**СМОЛЕНЦЕВ**

**Сергей Викторович<sup>2</sup>**

**БУЦАНЕЦ**

**Артем Александрович<sup>2</sup>**

**ПАУТОВ**

**Михаил Дмитриевич<sup>3</sup>**

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** В настоящее время десятки логистических сетей (ЛС) успешно функционируют по всему миру, а их число постоянно увеличивается. Выявлены тенденции формирования и развития разного рода альянсов между независимыми логистическими провайдерами. Таким образом развивается новая форма взаимодействия – рынок ЛС, работающий с группами организаций, ориентированными на конкретные географические регионы или рыночные ниши. Предпринимаются также попытки интеграции отдельных ЛС в гиперсети. **Методы:** Акторно-сетевая теория (АСТ) и основанные на ее положениях прикладные методы исследования социо-технологических систем рассмотрены в данной статье в контексте "сетевого мышления", все более активно проявляющего себя в качестве доминирующей парадигмы в исследованиях сложных систем, составленных из разнородных элементов. АСТ ранее рассматривалась как двухфакторная система - человеческая и не-человеческая, создавая своим ходом двухмерные гибриды, ныне приобретает третий фактор: искусственные интеллектуальные объект-субъекты в их взаимодействиях с людьми и материальными объектами. Это вызывает растущую потребность в интеграции акторно-сетевого метода с исследованиями в области искусственного интеллекта, многоагентных систем, синергетики, инженерии знаний, эргономики и других направлений. **Результаты:** В данной статье продемонстрировано, что АСТ предлагает новую семантику для некоторых концепций, принятых в исследованиях многоагентных систем. Также предложена акторно-сетевая модель мультимодального логистического процесса, в которой гетерогенные акторы представлены четырехкомпонентными знаками. Эта же модель на метауровне может быть применена к логистическим сетям, в которых отдельные мультимодальные терминалы являются узлами. Теоретической платформой предложенной модели служит АСТ с интегрированными в нее элементами формальных логик действия и метода нечетких индикаторов. Описываемое в рамках представленной модели виртуальное автоматическое устройство может быть реализовано на платформе "Интернета вещей", обеспечивающего поддержку принятия решений и координацию взаимодействий в реальном времени между мобильными акторами, в том числе "интеллектуальными грузами".

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова", г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Foscote Group, Лимассол, Меса Гейтония, Кипр

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *акторно-сетевая теория, мультимодальные грузоперевозки, транспортные коридоры, логистические провайдеры, нечеткие индикаторы.*

**Для цитирования:** Искандеров Ю.М., Смоленцев С.В., Буцанец А.А., Паутов М.Д. Акторно-сетевое моделирование мультимодальных логистических процессов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 57-67. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-57-67

## Введение

При стратегическом планировании, предусматривающем развитие транспортных коридоров, крайне важно учитывать проблемы, с которыми сталкиваются мультимодальные грузоперевозки на транснациональных маршрутах. Транспортные пути проходят по территории множества стран с их собственными национальными правилами и ограничениями, системой контроля грузов и документооборота, которая, в принципе, должна адаптироваться к наднациональным интересам развития транспортных коридоров, увеличения материального обмена, а также появления и роста новых международных цепочек поставок, принося пользу всем странам вдоль формируемого маршрута. Однако, в действительности, указанная адаптация всегда испытывает значительные трудности. Некоторые субъекты (особенно частные компании) на практике часто оказываются ограниченными правилами и различными мерами регуляторного характера.

Во многих случаях подобные ограничения оказываются контрпродуктивными по отношению к усилиям, направленным на повышение эффективности логистики, и оказывают существенное влияние на затраты на логистическую деятельность компаний [1]. Большое количество обязательных проверок, с которыми сталкиваются грузопотоки, может существенно снизить их скорость вплоть до полной остановки.

Грузоотправители (грузовладельцы) несут значительные расходы, связанные с неготовностью груза к прохождению обязательного инспекционного контроля. Например, обнаружение карантинных объектов в зерновых грузах может повлечь за собой фумигацию зерна в трюмах судна и последующую обязательную вентиляцию трюмов, что неизбежно приведет к задержке выгрузки на несколько дней и даже недель и колоссальным дополнительным затратам, которые несут грузовладельцы.

В целом, объекты транспортной инфраструктуры на государственных границах (например, морские порты) обладают чрезвычайно высокой логистической устойчивостью, в том смысле, что такие объекты формируют «костяк» мультимодальных грузоперевозок [2]. Отсюда важность эффективной координации действий между субъектами, участвующими и/или влияющими на транзит грузопотоков через порты и терминалы с целью ускорения грузопотоков и минимизации затрат.

В течение последних трех десятилетий международный логистический рынок был свидетелем роста глобальной тенденции формирования и развития разного рода альянсов между независимыми логистическими провайдерами. Эта тенденция сопровождалась все большей диверсификацией и виртуализацией логистических услуг, их географической интеграцией (глобальным пространственным перераспределением центров производства и цепей поставок для достижения экономического эффекта масштаба и проникновения в новые рыночные области) и социальной интеграцией (социальной адаптацией новейших логистических концептов) [1].

Альянсы между локальными независимыми логистическими провайдерами (как правило, представителями малого и среднего бизнеса) быстро развернулись в глобально распределенные логистические сети, вступающие в активную и

успешную конкуренцию с транснациональными корпорациями. В настоящее время десятки логистических сетей (ЛС) успешно функционируют по всему миру, и их число постоянно увеличивается. Таким образом, сформировался и постоянно развивается новый рынок – рынок ЛС – со своими лидерами, специализированными игроками, ориентированными на конкретные географические регионы или рыночные ниши. Предпринимаются также попытки интеграции отдельных ЛС в гиперсети.

Еще одна важная тенденция имеет шанс стать доминирующей на глобальном логистическом рынке в ближайшее время: ряд глобальных ЛС работает над интеграцией онлайн-новых B2B и B2C платформ и «Интернета вещей» (IoT) с целью превращения таких виртуально-материальных сетей в глобально распределенных многофункциональных кибер-логистических провайдеров. Успешный опыт в этом направлении демонстрирует, в частности, применение технологий, подобных UBER [1,2].

## Акторно-сетевой подход к представлению логистической сети

Концепция актор-сети (АС) впервые была сформулирована в конце 20 века в работах основателей метода – Б.Латура, М.Каллона, Дж.Ло и ряда других авторов [3-6]. Основной принцип акторно-сетевой теории заключается в представлении, согласно которому действия любого агента (субъекта действия или «актора» в терминах акторно-сетевой теории) обуславливаются или опосредуются действиями множества других гетерогенных агентов. Иными словами, любые действия распределены на множестве, включающем людей и неодушевленные объекты (или шире: на множестве, объединяющем акторов с естественным интеллектом, акторов с искусственным интеллектом и акторов без интеллекта, представленных, в частности, разного рода машинами и оборудованием, элементами природной среды, текстами и пр.). Таким образом, в общем виде актор-сеть  $AN$  можно представить следующим образом:

$$AN = AN_H \cup AN_{AI} \cup AN_{NH},$$

где  $AN_H$  – люди (естественный интеллект), т.е. одушевленные акторы,  $AN_{AI}$  – ИИ-акторы,  $AN_{NH}$  – акторы без интеллекта.

Акторно-сетевой подход предлагает принципиально новый взгляд на понятие агентности, которая понимается как эффект взаимодействия гетерогенных акторов (людей и наделенных или не наделенных интеллектом *не-людей*). Любая АС – объект динамический, существующий исключительно в процессе постоянного формирования и изменений [7]. При этом все гетерогенные акторы, входящие в АС, наделяются одинаковой агентностью вне зависимости от природы этих акторов.

Истоком любой АС служит так называемая «ризоморфная» структура, определенная как самоорганизующаяся множественность с полностью децентрализованной организацией и отсутствием каких-либо иерархических взаимоотношений между составляющими ее гетерогенными элементами, имеющими лишь виртуальное родство по отношению друг к другу [6].

Типичная современная ЛС может быть представлена в виде АС, формируемой динамическими взаимодействиями гетерогенных (одушевленных и неодушевленных) акторов: глобально распределенными независимыми логистическими провайдерами (участниками сети); координационным советом и специализированными комитетами; перемещаемыми материальными объектами (грузами); циркулирующей информацией (текстами, знаниями); финансами; различными видами транспорта; контейнерами; цепями поставок; их инфраструктурой и внешней средой, в которую они погружены; местными, национальными и международными правилами и обычаями; контролирующими организациями; портами; терминалами; распределительными центрами, их персоналом и оборудованием; производителями и потребителями товаров и услуг; информационными и иными технологиями и др.

В акторно-сетевом подходе к формированию и самоорганизации глобальных ЛС важная роль отводится фундаментальному положению, связанному с отказом от представления об АС как предсуществующих (ready-made) структурах. Для АС не существует готовых заданных групп, есть лишь процесс их формирования – гетерогенная инженерия [8]. Глобальная самоорганизующаяся ЛС как организация, с учетом акторно-сетевого подхода, представляется непрерывным процессом стабилизации через преодоление множественных сопротивлений. Структура ЛС отражает не только общую волю и интерес ее членов к поиску общих материализуемых решений, но также и баланс между силами, мобилизуемыми сетью для поддержания стабильности, и силами, мобилизуемыми конкурентами сети [6,8].

Сила самоорганизующихся ЛС в их мобильности и адаптивности: несовместимые с сетью элементы (участники сети или вовлекаемые ими в сеть гетерогенные акторы) отторгаются сетью, и сеть постоянно обновляется за счет замены акторов. Каждый новый участник сети представляет собой АС из взаимодействующих и связанных с ним производителей, поставщиков и потребителей, товаров, контейнеров, локального транспорта, местных представительства международных морских, воздушных, железнодорожных и автоперевозчиков, портов, аэропортов, логистических хабов и терминалов, местных властей и действующих правил, знаний национального рынка, культуры и традиций ведения бизнеса.

Любой участник глобальной ЛС действует как посредник между акторами, связанными со страной, которую он представляет в сети, и участниками сети из других стран через создание Р2Р-альянсов с этими участниками. В этом процессе проявляет себя конкурентоспособность глобальных ЛС: локальные акторы, представляемые в сети ее участниками, начинают тяготеть к взаимодействию с сетью через ослабление (или даже разрыв) их ранее стабильных связей с транснациональными корпорациями. Эти новые альянсы акторов с ЛС могут создавать условия для запуска международных логистических проектов и формирования новых цепей поставок.

Архитектура автономной логистики основана на процессах децентрализованного принятия решений и координации действий акторов в гетерархических структурах. Автономное управление в ЛС предполагает способность акторов обрабатывать информацию, независимо принимать и исполнять решения [9].

Для поддержки взаимодействия в автономных ЛС акторы могут использовать Р2Р технологии, которые полностью децентрализованы, т.е. не нуждаются в какой-либо централизованной/иерархической структуре для управления взаимодействиями акторов. В [10] приводится пример успешного временного альянса между компаниями IBM и Maersk, созданного для оптимизации работы с транспортными документами. Результатом стало блокчейновое решение, позволившее собрать обширную сеть грузоотправителей, перевозчиков, портов и таможенных служб, и обеспечивающее создание и подтверждение любого документа в виде соответствующей транзакции.

Амбициозная цель проекта «Физического интернета» (PI или  $\pi$ ) была определена как создание открытой глобальной ЛС, основанной на физической, цифровой и операционной взаимосвязанности ее элементов посредством инкапсуляции, интерфейсов и протоколов [11]. Эта идея, расширяющая мир «Интернета вещей», включая в него процессы сетевого обмена материальными объектами в физическом пространстве, и подводящая вплотную к концепции «Интернета всего» (IoA), вполне вписывается в современную интеллектуальную тенденцию «поворота к материальному», в которой АСТ играет авангардную роль. Концепция «Физического интернета» предполагает формирование открытой, глобальной, эффективной, устойчиво развивающейся логистической гиперсети, собранной из взаимосвязанных сетей материальных, виртуальных (цифровых) и социальных акторов. Для создания стабильно функционирующей системы авторы проекта предполагают ассоциировать пять сетей – с большим числом гетерогенных компонентов:

- сет мобильности;
- сет распределения;
- сеть реализации;
- сет поставок;
- сет обслуживания.

Система как целое может достигнуть цели, заложенной в нее ее создателями, только через тщательно определенные отношения и взаимосвязи между пятью формирующими ее сетями. Набор стандартизированных протоколов, основанных на оценке критических факторов (скорость, уровень обслуживания, надежность, безопасность) был предложен для мониторинга действий  $\pi$ -акторов. Интеллектуальный продукт как АС ассоциирует информацию и правила, относящиеся к его подготовке, хранению, обработке, пространственному перемещению, что наделяет его способностью поддержки указанных операций [12].

Важным функциональным элементом в архитектурах «Интернета вещей» и «Физического интернета» является информационно-коммуникационная инкапсуляция, представленная, в частности, концепцией интеллектуальных  $\pi$ -контейнеров, перемещающих интеллектуальные продукты и обменивающихся информацией с ними.

Интеллектуальные продукты создают вокруг себя устойчивую систему, обеспечивающую их оптимальное прохождение по цепи поставок, через взаимодействие и альянсы с другими акторами.

### Формализация мультимодальных логистических процессов на основе метода акторно-сетевого моделирования

Поскольку акторно-сетевое моделирование использует фундаментальные положения семиотики, покажем каким образом строится модель АС [13,14].

Пусть знак  $s$  формально представляет собой кортеж из четырех компонентов:  $\langle n, p, m, a \rangle$ , где  $n$  – имя знака  $s$ ;  $p$  – портрет знака  $S$ , соответствующий узлу  $wp(s)$  причинной сети на портретах ( $Wp$ );  $m$  – значение знака  $s$ , соответствующего узлу  $wm(s)$  причинной сети значений ( $Wm$ );  $a$  – приписывание (индивидуальный смысл или атрибуция) знака  $s$ , соответствующего узлу  $wa(s)$  причинной сети на приписываниях ( $Wa$ ).  $Rn$  определяет отношения на множестве знаков;  $\Theta$  определяет операции над множеством знаков на основе фрагментов причинных сетей, которым принадлежат соответствующие знаковые компоненты.

Кортеж из пяти элементов  $\langle Wp, Wm, Wa, Rn, \Theta \rangle$  представляет собой семиотическую модель актора  $A1$  [14]. Предположим, что актор  $A1$  имеет заранее определенную цель  $G1(A1)$ , недостижимую собственными усилиями из-за существующих препятствий. В этой ситуации актор  $A1$  может либо отказаться от цели, либо попытаться достичь ее, выбрав альтернативный маршрут (обходной путь) за счет привлечения других акторов  $A2, A3...$  [15]. Вместе они могут либо стремиться к достижению первоначальной цели  $G1$ , либо выбирать альтернативные цели  $G2, G3...$ . Возврат к исходной цели  $G1$  – это лишь один виртуальный сценарий из множества альтернативных сценариев (рис.1) [15].

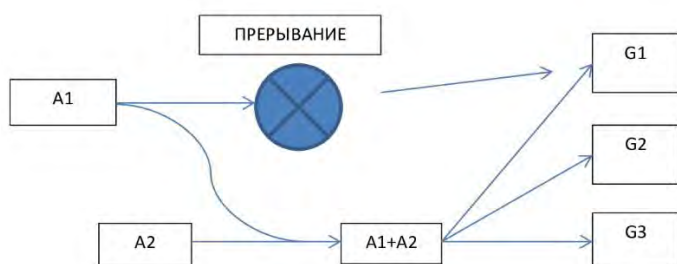


Рис 1. Виртуальный сценарий

Указанная модель АС используется как базовый инструмент представления знаний каждым участвующим актором для индивидуального и коллективного планирования и дальнейшей реализации созданных планов. Процедура планирования основана на видении акторами целевой ситуации, которую они стремятся достичь.

Рассмотрим построение акторно-сетевой модели логистического терминала, в которой ключевая роль в планировании, координации и частичной интеллектуализации логистических процессов отводится логистическим операторам [16–18]. Основная цель деятельности логистического оператора понимается как обеспечение оптимального прохождения людей (пассажиров) и материалов (грузов, почты) через мультимодальные транспортные интерфейсы (терминалы), рассматриваемые как узлы наивысшего логистического сопротивления транспортным потокам, пространственно-распределенные на

транспортной сети. Логистические терминалы являются ключевыми узлами (хабами) любой транспортной сети. В предлагаемой модели мультимодальный терминал представлен как среда взаимодействия между логистическим оператором и другими акторами, вовлеченными в процесс перемещения людей и материалов. Не углубляясь в специфику функционирования терминала (представляя отдельные функциональные блоки терминала как «черные ящики»), можно определить пять принципиальных акторов ( $N_{act} = 5$ ), участвующих в процессе перемещения людей и материалов через терминал:

- собственно терминал (**TERM**), объединяющий одушевленных (администрация, персонал) и неодушевленных (сооружения, оборудование, технологии, документация) акторов;
- локальный транспорт (**LT**), используемый для подвозки людей и грузов к терминалу и их отвозки от терминала;
- транспорт дальнего следования (**LDT**), представленный морскими, железнодорожными, авиа- или автоперевозчиками;
- пункты контроля (**CNTR**), представленные множеством контролирующих организаций (инспекций);
- логистический оператор **nPL**, где  $n \geq 3$ , играющий роль планирующего актора.

Далее, рассмотрим две основные стадии процесса внутри-терминального перемещения ( $N_{ops} = 2$ ): подготовительную и стадию операций. Для целей исследования акторно-сетевой подход скомбинирован с модифицированной методикой, предложенной в [2]. Семиотическая модель АС, указанная выше, использована в качестве основного инструмента представления знаний каждым вовлеченным в логистический процесс актором для целей индивидуального и коллективного планирования и дальнейшей реализации построенных планов [14]. Процедура планирования основана на видении акторами целевой ситуации.

Знание потенциала актора, осуществляющего планирование, и потенциала других акторов представляется так называемыми каузальными матрицами (семантическими сетями) на сетях «личностного смысла» [14] знака “**nPL**” (планирующего актора) и знаков других вовлеченных акторов, соответственно. Это знание делает возможной оценку значений индексов прескрипции (и, соответственно, индексов транслируемости) акторов, определенных выше. Акторы строят планы достижения целевой ситуации (цели) и распределяют роли, руководствуясь критерием выполнимости различных действий.

Как любой другой знак “**nPL**” содержит атрибуции («личностные смыслы») планирующего актора, его образ и значение. Значения знака “**nPL**” и знаков других акторов представляют обобщенные сценарии, в которых действия актора могут быть как самостоятельными, так и опосредованными другими акторами. Любые действия актора представлены в атрибуциях его знака. Сеть атрибуций планирующего актора содержит матрицы действий [14]. Знаки других акторов связаны с абстрактным знаком актор-сети “**Others**” отношениями типа «подкласс-класс». Знаки акторов содержат знания и представления о других акторах, основанные на общем описании планируемых и выполняемых действий. Каузальная матрица на сети значений абстрактного знака “**Others**” содержит ссылки на знаки других акторов [14]. Знаки акторов “**nPL**” и “**Others**” символически изображены в виде пирамид

с вершинами  $n, p, m, a$ , представляющими компоненты этих знаков (см. рис. 2).

Логистический оператор **nPL**, играющий роль планирующего актора в модели [16], мобилизует других вовлеченных в логистический процесс одушевленных и неодушевленных акторов (представленных знаком “Others”) для преодоления логистического сопротивления системы и достижения целевой ситуации (цели) логистического процесса через его оптимизацию.

Цель мультимодального логистического процесса может быть сформулирована как одновременное выполнение следующих условий: беспрепятственное прохождение людей и материалов через систему с минимальными задержками (логистический эффект), минимальные издержки для **nPL** и других акторов (экономический эффект), минимальная нагрузка на окружающую среду (экологический эффект), минимальные риски для безопасности людей, материалов, финансов и информации (асфалический эффект).

Для целей указанной модели рассматривается материальный (грузовой) поток (**T**), генерируемый одним оператором поставок (**ТО**), получающим грузы от множества отправителей (**SH**) и распределяющим их на множестве получателей (**C**) [2]. **ТО** заключает контракт с **nPL** на организацию и осуществление логистических операций: перевозки грузов различными видами транспорта, интермодальная перевалка грузов на терминале, прохождение всех необходимых контролей. Таким образом, **ТО** в модели выступает как шестой принципиальный актор в дополнение к пяти ранее определенным. Основные функции **ТО** включают: передачу в адрес **nPL** данных и информации (заявки, инструкции, сообщения, цифровые и бумажные документы)  $D=\{d_1...d_n\}$ , необходимых для успешного транзита грузов через терминал; передачу в адрес **nPL** и других акторов финансовых средств. Также **ТО** информирует **nPL** о готовности отправителей  $SH=\{sh_1...sh_p\}$  к отправке и получателей  $C=\{c_1...c_m\}$  – к получению грузов из потока **T**.

Начальным моментом логистического процесса в рассматриваемой модели можно считать подачу **ТО** заявки ( $d_{or} \in D$ ) в адрес **nPL**. Периодически подаваемые заявки в обязательном порядке должны содержать план поставок на конкретный период времени и подробные количественные и качественные спецификации планируемых грузов. Также **ТО** передает **nPL** полный пакет цифровых и бумажных документов (**D**), необходимых **nPL** для организации терминальной обработки грузов и иных логистических операций. Нечеткий индикатор  $F(D,s) \in [0,1]$  выражает степень готовности **nPL** к началу логистического процесса.  $F(D,s)=1$ , когда **ТО** передает всю необходимую информацию и документы  $d_i \in D$  и финансовые средства  $s = s_f + s_r + s_p + \sum_i s_i$  в адрес **nPL**.

Здесь  $s_f$  – сумма фрахта,  $s_r$  – общая стоимость подвозки грузов на терминал (или отвозки с терминала) локальным транспортом,  $s_p$  – общая стоимость терминальных операций,  $s_i$  – стоимость прохождения грузами  $i$ -го контроля. В противном случае:  $F(D,s) < 1$ , и в отношении **nPL** применим К-критерий логики действий [19]:

$$[p]nPL \supset \tilde{M}[\sim p]nPL,$$

согласно которому актор **nPL** может либо совершить действие  $[p]$  (где  $[p]$  означает запуск логистического процесса), либо отказаться от его совершения. Помимо нечеткого индикатора  $F(D,s)$  в рассматриваемой модели учитывается еще один критический фактор – значения индексов транслируемости  $\tau$  (“Others”) других акторов, которые отражают возможность **nPL** мобилизовывать этих акторов для совершения необходимых действий и достижения целевых ситуаций. **nPL** может отказаться от совершения действия  $[p]$  в случаях, когда  $F(D,s) < 1$ , и когда **nPL** не может создать альянсов с другими акторами, вовлеченными в логистический процесс, через *detour*. Чем выше значения  $F(D,s)$  и  $\tau(ТО, D, s | nPL)$ , тем выше возможность начала логистического процесса (здесь нотация “ $|nPL$ ” означает, что акторы **ТО, D, s** транслируемы к **nPL**). Что на языке логики действий выражается следующим образом:

$$\tilde{M}[p]nPL \ \& \ \sim[p]nPL \supset [p]nPL$$

или

$$\tilde{M}[p]nPL \supset [p]nPL \vee [\tilde{p}]nPL$$

Это означает, что если актор **nPL** может совершить действие  $[p]$  (т.е. запустить логистический процесс) и не отказывается от его совершения, и совершает это действие. Как будет продемонстрировано далее, эти же критерии логики действий применимы и к другим (нечетким) индикаторам, используемым в рассматриваемой модели. Актор-планировщик **nPL** на основании заявок **ТО** включает ожидаемые грузы в оперативный план терминала и мобилизует локальный транспорт (**LT**) для обеспечения необходимого числа транспортных единиц для перемещения запланированных грузов от/к терминалу.

Финансовые суммы, получаемые **nPL** от **ТО**, распределяются между другими акторами через оплату фрахтовых сборов ( $s_f$ ), терминальных операций и сервисных сборов ( $s_p$ ), локальных перевозок ( $s_r$ ), сборов контролирующих организаций ( $s_i$ ). К моменту прибытия на терминал **LDT** морского или воздушного судна и объявления готовности к грузовым операциям, грузы должны быть доставлены на терминал (самими отправителями или через посредство **nPL**), а вся необходимая информация и документы переданы **nPL**. Получатели грузов должны быть во всех отношениях готовы к приему грузов.

Степень готовности грузоотправителя  $sh_i$  и грузополучателя  $c_j$  описывается нечеткими индикаторами  $r(sh_i) \in [0,1]$  и  $r(c_j) \in [0,1]$  соответственно, где:  $sh_i \in SH$ ,  $c_j \in C$ . Очевидно, что в случае полной готовности всех грузоотправителей и грузополучателей:  $r(sh_i)=1$ ,  $r(c_j)=1$ , для всех  $i$  и  $j$ . В противном случае возможны следующие ситуации:

$$\begin{aligned} r(sh_i) < 1 \vee r(c_j) < 1 &\supset \\ [\sim \text{READY}]T([\text{READY}]I[\sim \text{READY}]) & \\ r(sh_i) < 1 \vee r(c_j) < 1 &\supset \\ [\text{READY}]T([\text{READY}]I[\text{READY}]) & \\ r(sh_i) < 1 \vee r(c_j) < 1 &\supset \\ [\sim \text{READY}]T([\sim \text{READY}]I[\sim \text{READY}]) & \end{aligned}$$

Предполагается, что отправители, получатели, грузы, финансовые средства, документы, данные и информация изначально переведены (транслированы) через **ТО**, следовательно, значение индекса транслируемости  $\tau(\text{SH}, \text{C}, \text{Cargo}, \text{Funds}, \text{D}, \text{Shipping\_Data} | \text{ТО})$  обеспечивает успешность такого транслирования. Подготовительная стадия перед началом терминальных грузовых операций включает в себя передачу релевантной информации и финансовых сумм Терминалу, службам контроля и локальному транспорту, что выражается соответствующими нечеткими индикаторами:  $\mathbf{P}(\mathbf{D}_p, \mathbf{s}_p)$ ,  $\mathbf{S}(\mathbf{D}_i, \mathbf{s}_i)$  и  $\mathbf{R}(\mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r)$ . Взаимодействие между акторами, вовлеченными в мультимодальный логистический процесс, схематически изображено на рисунке 2:

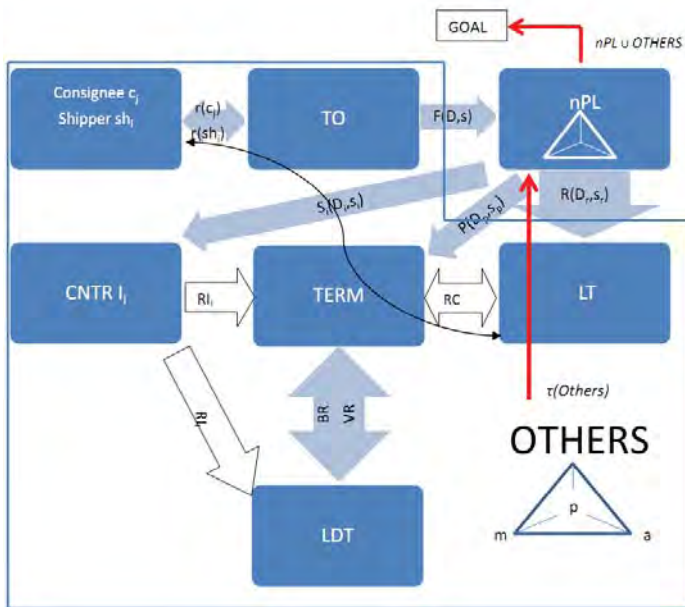


Рис. 2. Взаимодействие акторов, вовлеченных в мультимодальный логистический процесс на терминале [16]

Для полного описания взаимодействия акторов в модель вводятся дополнительные – в целом нечеткие – индикаторы (используем синтаксис логики действий в предлагаемых ниже определениях):

а) Индикатор включения груза в оперативный план терминала:

$$\mathbf{PP}([\text{incl\_plan}] \text{TERM}) = \begin{cases} 1, [\text{incl\_plan}] \text{TERM} \\ \tau(\text{nPL}, \text{Cargo}, \text{LDT}, \text{Shipping\_Data}, \mathbf{D}_p, \mathbf{s}_p | \text{TERM}), \\ \tilde{\mathbf{M}}[\text{incl\_plan}] \text{TERM} \\ 0, \sim \tilde{\mathbf{M}}[\text{incl\_plan}] \text{TERM} \end{cases}$$

Для целей транспортной и терминальной безопасности следующие два индикатора не допускают нечеткости и должны однозначно подтверждать или исключать готовность транспорта (**LDT**) и терминала к грузовым операциям:

б) Индикатор готовности **LDT** к грузовым операциям на терминале:

$$\mathbf{VR} = \begin{cases} 1, [\text{NOR}] \text{LDT} \\ 0, [\sim \text{NOR}] \text{LDT} \end{cases}$$

Здесь **[NOR]** – действие по подаче уведомления о прибытии транспортной единицы на терминал (например, уведомления о готовности судна, подаваемого в портовую администрацию, или сообщение пилота диспетчерской службе о приземлении).

в) Индикатор готовности терминала к грузовым операциям:

$$\mathbf{BR} = \begin{cases} 1, \mathbf{PP} = 1 \wedge \mathbf{P}(\mathbf{D}_p, \mathbf{s}_p) > 0 \\ 0, \mathbf{PP} < 1 \vee \mathbf{P}(\mathbf{D}_p, \mathbf{s}_p) = 0 \end{cases}$$

Следующий индикатор не может быть нечетким по юридическим причинам и должен однозначно определять успех или неудачу прохождения грузов через *i*-й контроль:

$$\mathbf{RI}_i = \begin{cases} 1, [\text{release}] I_i \\ 0, [\sim \text{release}] I_i \end{cases}$$

Здесь **[~release]** означает любое действие *i*-го контроля ( $I_i \in \text{CNTR}$ ), кроме пропуска груза через контрольный пункт.

г) Индикатор готовности локального транспорта (экспортный сценарий):

$$\mathbf{RC} = \begin{cases} 1, \mathbf{R}(\mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r) = 1 \wedge \mathbf{r}(\text{sh}_i) = 1 \\ \tau(\text{nPL}, \text{Shipper}, \text{Cargo}, \text{Shipping\_Data}, \mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r | \text{LT}), \\ \mathbf{R}(\mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r) < 1 \vee \mathbf{r}(\text{sh}_i) < 1 \\ 0, \mathbf{R}(\mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r) = 0 \wedge \mathbf{r}(\text{sh}_i) = 0 \end{cases}$$

д) Индикатор погоды:

$$\mathbf{W} = \tau(\text{Weather} | \text{Others} \cup \text{nPL})$$

е) Индикатор форс-мажорных обстоятельств:

$$\mathbf{FM} = \tau(\text{Force\_Majeure} | \text{Others} \cup \text{nPL})$$

Кортеж  $\mathbf{w}_T = \langle \mathbf{F}(\mathbf{D}, \mathbf{s}), (\mathbf{r}(\mathbf{c}) \vee \mathbf{r}(\text{sh}_i)), \mathbf{R}(\mathbf{D}_r, \mathbf{s}_r), \mathbf{P}(\mathbf{D}_p, \mathbf{s}_p), \mathbf{S}(\mathbf{D}_i, \mathbf{s}_i), \mathbf{PP}, \mathbf{VR}, \mathbf{BR}, \mathbf{RC}, \mathbf{RI}_i, \mathbf{W}, \mathbf{FM} \rangle$  отражает статус логистического процесса в момент времени *T*.

В таблице 1 (10-csoc) отражены статусы акторов в логистическом процессе, где: **TERM** = Порт, **LDT** = Судно, **LT** = Наземный Транспорт.

Как было отмечено выше:

$$\mathbf{F}(\mathbf{D}, \mathbf{s}) = 0 \ \& \ \tau(\text{TO}, \mathbf{D}, \mathbf{s} | \text{nPL}) = 0 \supset \sim \tilde{\mathbf{M}}[\mathbf{p}] \text{nPL}$$

$$0 < \mathbf{F}(\mathbf{D}, \mathbf{s}) < 1 \vee 0 < \tau(\text{TO}, \mathbf{D}, \mathbf{s} | \text{nPL}) < 1 \supset \tilde{\mathbf{M}}[\mathbf{p}] \text{nPL} \ \& \ \tilde{\mathbf{M}}[\sim \mathbf{p}] \text{nPL}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{D}, \mathbf{s}) = 1 \ \& \ \tau(\text{TO}, \mathbf{D}, \mathbf{s} | \text{nPL}) = 1 \supset \sim \tilde{\mathbf{M}}[\sim \mathbf{p}] \text{nPL} \supset [\mathbf{p}] \text{nPL},$$

Это означает, что **nPL** запускает логистический процесс, постоянно координируя свои действия с другими акторами в соответствии с изменяющимися значениями индикаторов.

Используя язык логики **SAL**, предложенный в [20] для описания взаимодействий в многоагентных техно-социумах, ситуация, когда **PP=1**, может быть представлена следующим образом:

$$\text{Agree}_{\{\text{nPL}, \text{Port}\}} \text{Sat}_{\{\text{nPL}, \text{Port}\}} \text{Do}_{\{\text{nPL}\}} ([\text{Transfer}(\mathbf{D}_p)], [\text{Pay}(\mathbf{s}_p)]), \text{Port} : [\text{incl\_plan}] > \mathbf{T},$$

т.е. **nPL** и **Порт** соглашаются, что ситуация, когда **nPL** переводит информацию, документы (**D<sub>p</sub>**) и финансовые суммы (**s<sub>p</sub>**), а **Порт** включает грузы в свой оперативный план, является удовлетворительной для обоих акторов.

Таблица 1

Статусы акторов в мультимодальном логистическом процессе (по [2])

Символ	Значение	СТАТУС				
		Судно	Порт	CNTR I <sub>i</sub>	Наземный транспорт	shi/cj
F(D,s)	0	ожидание	ожидание	ожидание	ожидание	ожидание
	(0,1)	готовность → погрузка → движение	ожидание	ожидание	ожидание	ожидание
	1	ожидание: VR=1; BR=1	ожидание: P(D <sub>p,sp</sub> )=1; PP=1; BR=1; VR=1	ожидание: Si(D <sub>i,si</sub> )=1; BR=1; VR=1	ожидание: (r(shi)=1 ∨ r(cj)=1); R(D <sub>r,sr</sub> )=1	ожидание
r(shi) r(cj)	[0,1)				ожидание: (r(shi)=1 ∨ r(cj)=1); R(D <sub>r,sr</sub> )=1	ожидание
	1				ожидание: R(D <sub>r,sr</sub> )=1	готовность
R(D <sub>r,sr</sub> )	[0,1)				ожидание: R(D <sub>r,sr</sub> )=1	готовность
	1				ожидание: BR=1; RI <sub>i</sub> =1	готовность
P(D <sub>p,sp</sub> )	[0,1)		ожидание: P(D <sub>p,sp</sub> )=1; PP=1; BR=1; VR=1			готовность
	1		ожидание: PP=1; BR=1; VR=1			готовность
Si(D <sub>i,si</sub> )	[0,1)			ожидание: Si(D <sub>i,si</sub> )=1; BR=1; VR=1		готовность
	1			ожидание: BR=1; VR=1		готовность
PP	[0,1)		ожидание: PP=1; BR=1; VR=1			готовность
	1		ожидание: BR=1; VR=1			готовность
VR	0	ожидание: BR=1; VR=1	ожидание: BR=1; VR=1			готовность
	1	ожидание: BR=1	ожидание: BR=1	ожидание: BR=1		готовность
BR	0	ожидание: BR=1	ожидание: BR=1	ожидание: BR=1		готовность
	1	швартовка → ожидание: RI <sub>i</sub> =1	швартовка → ожидание: RI <sub>i</sub> =1	готовность → действие		готовность
RC	[0,1)				ожидание: RC=1	
	1				готовность	готовность
RI <sub>i</sub>	0	ожидание: RI <sub>i</sub> =1	ожидание: RI <sub>i</sub> =1			готовность
	1	готовность к грузовым операциям	выгрузка → погрузка	выпуск груза	доставка	готовность
W	0	остановка грузовых операций	остановка грузовых операций			
	(0,1]	возобновление (продолжение) грузовых операций	возобновление (продолжение) грузовых операций			
FM	0	остановка процесса	остановка процесса	остановка процесса	остановка процесса	остановка процесса
	1					

Представленные значения в таблице 2 отражают возможные состояния готовности/неготовности **Порта** к грузовым операциям.

Таблица 2

Возможные состояния готовности/неготовности Порта к грузовым операциям

P(D <sub>p,sp</sub> )	PP	BR
[0,1)	[0,1)	0
1	[0,1)	0
1	1	0
1	1	1

Для успешной постановки **Судна** к причалу должны одновременно выполняться следующие критерии:

**VR=1, BR=1, W=1, FM=1**

Для бесперебойной выгрузки/погрузки **Судна** должны выполняться следующие критерии:

**VR=1, BR=1, Si(D<sub>i,si</sub>)=1 & RI<sub>i</sub>=1 (для всех I<sub>i</sub> ∈ CNTR), W=1, FM=1**

Для отправки импортных грузов из **Порта** конечным получателям (**C**) должны выполняться следующие критерии: **r(c<sub>j</sub>)=1 for all c<sub>j</sub> ∈ C, RC=1, RI<sub>i</sub>=1** для всех **I<sub>i</sub> ∈ CNTR**. В таблице 3 [2] представлены индикаторы, отражающие функциональные взаимодействия между акторами, вовлеченными в логистический процесс, представленный выше (табл. 1).

Таблица 3

Индикаторы функциональных взаимодействий между акторами в мультимодальном логистическом процессе (по [2])

	ТО	nPL	Порт	Наземный Транспорт	Судно	Контроль I <sub>i</sub>	Отправитель/ Получатель	Окружающая среда
ТО		F(D,s)						FM
nPL	F(D,s)		P, PP	R		S <sub>i</sub>	r(sh <sub>i</sub> ),r(c <sub>j</sub> )	FM
Порт		P, PP		RC	VR, BR	RI <sub>i</sub>		W, FM
Наземный Транспорт		R	RC			RI <sub>i</sub>	r(sh <sub>i</sub> ),r(c <sub>j</sub> ),RC	FM
Судно			VR, BR			RI <sub>i</sub>		W, FM
Контроль I <sub>i</sub>		S <sub>i</sub>	RI <sub>i</sub>	RI <sub>i</sub>	RI <sub>i</sub>		RI <sub>i</sub>	FM
Отправитель/ Получатель		r(sh <sub>i</sub> ), r(c <sub>j</sub> )		r(sh <sub>i</sub> ),r(c <sub>j</sub> )		RI <sub>i</sub>		FM
Окружающая среда	FM	FM	W, FM	FM	W, FM	FM	FM	

На основе рассмотренной акторно-сетевой модели для поддержки координации взаимодействия акторов и принятия решений в мультимодальном логистическом процессе в [16] было предложено виртуальное автоматическое устройство, которое в каждый момент времени  $T$  генерирует строку  $w_t = \langle F(D,s), r(c_j), Vr(sh_i), R(D_r, s_r), P(D_p, s_p), S_i(D_i, s_i), PP, VR, BR, RC, RI_i, W, FM \rangle$ , отражающую текущее состояние системы. Это же виртуальное устройство генерирует множество сообщений  $\{msg_i(w_t)\}_i$  как функций  $w_t$  в момент времени  $T$ .

Например, строка  $w_t = \langle 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0, 2\ 1 \rangle$  генерирует следующие сообщения (для простоты общее число контролей сокращено до 1):

1)  $msg_1(w_t) = \text{‘ГРУЗ ОЖИДАЕТ ПРОХОЖДЕНИЯ КОНТРОЛЯ <ссылка>’}$ . Это сообщение содержит ссылку на подробную информацию о статусе груза, вводимую в систему соответствующей контролирующей организацией.

2)  $msg_2(w_t) = \text{‘ВОЗМОЖНА ОСТАНОВКА ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ИЗ-ЗА ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ <ссылка>’}$ . Это сообщение содержит ссылку на признаваемый всеми акторами метеорологический информационный ресурс.

### Заключение

Акторно-сетевая теория (АСТ) и основанные на ее положениях прикладные методы исследования социо-технологических систем рассмотрены в данной статье в контексте «сетевого мышления», все более активно проявляющего себя в качестве доминирующей парадигмы в исследованиях сложных систем, составленных из разнородных элементов.

Гетерогенность акторов, традиционно понимаемая в АСТ как их принадлежность к одному из противоположных миров (одушевленного/социального с одной стороны, и неодушевленного/природно-технологического – с другой) и способность формирования устойчивых социо-технологических альянсов (антропо-неантропо гибридов или квазиобъектов), требует уточнения в контексте быстро эволюционирующих систем

искусственного интеллекта. Маятник АСТ, ранее раскачивавшийся в двухмерном мире между двумя противоположными полюсами – человеческим и не-человеческим, – создавая своим ходом двухмерные гибриды, ныне приобретает третий полюс и третье измерение: искусственные интеллектуальные объект-субъекты в их взаимодействиях с людьми и материальными объектами.

Это вызывает растущую потребность в интеграции акторно-сетевого метода с исследованиями в области искусственного интеллекта, многоагентных систем, синергетики, инженерии знаний, эргономики и других направлений. Очевидно, что траектория дальнейшего развития акторно-сетевого подхода от описательной теории через формализацию и интеграцию с другими релевантными методами исследования систем, к созданию на основе АСТ эффективного прикладного инструмента для моделирования социо-технологических систем.

В данной статье продемонстрировано, что АСТ предлагает новую семантику для некоторых концепций, принятых в исследованиях многоагентных систем. Также предложена акторно-сетевая модель мультимодального логистического процесса, в которой гетерогенные акторы представлены четырехкомпонентными знаками, согласно методу, изложенному в [14]. Эта же модель на метауровне может быть применена к логистическим сетям, в которых отдельные мультимодальные терминалы являются узлами.

Теоретической платформой предложенной модели служит АСТ с интегрированными в нее элементами формальных логик действия и метода нечетких индикаторов, ранее предложенного в [2]. Описываемое в рамках представленной модели виртуальное автоматическое устройство может быть реализовано на платформе «Интернета вещей», обеспечивающего поддержку принятия решений и координацию взаимодействий в реальном времени между мобильными акторами, в том числе «интеллектуальными грузами».



Настоящая статья направлена на привлечение внимания широкого круга специалистов, связанных с задачами самоорганизации, теории управления, многоагентных, эргатических, социотехнических, информационных систем, к ключевым положениям АСТ и служит своего рода приглашением к диалогу, конструктивной критике и дальнейшему раскрытию прикладного потенциала описываемого метода.

## Литература

1. *Van Duin, J.h.r.* (Ron). Logistics Concept Development in Multi-Actor Environments // Aligning stakeholders for successful development of public/private logistics systems by increased awareness of multi-actor objectives and perceptions. 2012. 10.13140/2.1.1426.9122.
2. *Паутов М.Д.* Модель перевалки импортных зерновых грузов через морские порты России // Наука и технологии на транспорте. №2, 2015. С. 55-61. ISSN 2074-9325
3. *Latour B.* Networks, Societies, Spheres – Reflections of an Actor-Network Theorist // International Journal of Communication. 2011. Vol. 5. P. 796–81
4. *Latour B.* An Inquiry Into Modes of Existence: An Anthropology of the Moderns / C. Porter (trans.). Cambridge, MA: Harvard University Press, 2013. 486 p.
5. *Callon M.* Techno-economic networks and irreversibility. In J. Law (Ed.), A sociology of monsters, 1991, pp. 132-161. London: Routledge.
6. *Law J.* Technology and Heterogeneous Engineering: The Case of Portuguese Expansion // The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology / W. E. Bijker et al. (eds). Cambridge, MA: MIT Press, 2012, pp. 105-127.
7. *Ерофеева М.* О возможности акторно-сетевой теории действия. Социология власти, 2015, no. 27 (4), pp. 51-71.
8. *Bencherki N.* Actor-Network Theory. In Craig Scott & Laurie Lewis (eds.). The International Encyclopedia of Organizational Communication. New York, NY: Wiley. 2017. <http://doi.org/10.1002/9781118955567.wbieoc002>
9. *Hülsmann M., Windt K.* Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics: The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow, Springer, 2007.
10. *Hackius N., Petersen M.* Blockchain in Logistics and Supply Chain: Trick or Treat? // Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL). 23, 2017.
11. *Montreuil B.* Toward a physical internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge // Logistics Research, 2011, no. 3 (2-3), pp. 71-87.
12. *McFarlane D., Giannikas V., Wong A.C., Harrison M.* Product intelligence in industrial control: Theory and practice, Annual Reviews in Control, 2013, no. 37 (1).
13. *Latour B.* On Actor-Network Theory. A Few Clarifications Plus More than a Few Complications // Soziale Welt. 1996. Vol. 47, pp. 369-381.
14. *Киселев Г.А., Панов А.И.* Знаковый подход к задаче распределения ролей в коалиции когнитивных агентов // Труды СПИИРАН. 2018. Выпуск 2(57). ISSN 2078-9181 (печать), ISSN 2078-9599 (онлайн). С. 161-187. DOI 10.15622/сп.57.7
15. *Широков А.А.* Политика объяснения и стратегия описания Бруно Латура: Как писать инфрарефлексивные тексты // Российское социологическое обозрение. 2019. Том. 18. НЕТ 1. С. 186-216.
16. *Iskanderov Y., Pautov M.* (Actor-Network Method of Assembling Intelligent Logistics Terminal. In: Silhavy R. (eds) Applied Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2020 // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, vol 1226. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51974-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51974-2_4)
17. *Iskanderov Y., Pautov M.* Agents and Multi-Agent Systems as Actor-Networks // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2020, 22-24 February 2020, Vol.1, edited by: A. Rocha, L. Steels, J. van den Herik, pp. 179-184. DOI: 10.5220/0008935601790184
18. *Iskanderov Y., Pautov M.* Heterogeneous Engineering in Intelligent Logistics. In: Abraham A., Shandilya S., Garcia-Hernandez L., Varela M. (eds) Hybrid Intelligent Systems. HIS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, vol 1179. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49336-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49336-3_9)
19. *Iskanderov Y., Pautov M.* Actor-Network Approach to Self-organisation in Global Logistics Networks // Kotenko I., Badica C., Desnitsky V., El Baz D., Ivanovic M. (eds) Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence, 2020, vol. 868. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_14)
20. *Блинов А.Л., Петров В.В.* Элементы логики действий. М.: Наука, 1991. ISBN 5-02-008150-7
21. *Lorini E., Verdicchio M.* Towards a Logical Model of Social Agreement for Agent Societies // Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems. Vol. 2010, pp. 147-162.

## ACTOR-NETWORK MODELING MULTIMODAL LOGISTICS PROCESSES

**YURI M. ISKANDEROV**

St-Petersburg, Russia

**SERGEY V. SMOLENTSEV**

St-Petersburg, Russia

**ARTEM A. BUTSANETS**

St-Petersburg, Russia

**MIKHAIL D. PAUTOV**

Limassol, Mesa Geitonia, Cyprus

**KEYWORDS:** *actor-network theory, multimodal freight transportation, transport corridors, logistics providers, fuzzy indicators.*

### ABSTRACT

**Introduction:** Currently, dozens of logistics networks are successfully operating around the world, and their number is constantly increasing. Trends in the formation and development of various types of alliances between independent logistics providers have been identified. Thus, a new form of interaction, namely, the logistics network market, working with groups of organizations focused on specific geographic regions or market niches, is developing. Attempts to integrate individual logistics networks into hypernets are also being made. **Method:** Actor-network theory and applied methods for studying socio-technological systems based on its provisions are discussed in this article in the context of "network thinking", which is increasingly manifesting itself as the dominant paradigm in the study of complex systems composed of heterogeneous elements. Actor-network theory was previously considered as a two-factor system – human and non-human, creating two-dimensional hybrids on its own, but now it acquires a third factor, namely, artificial intellectual object-

subjects in their interactions with people and material objects. **Results:** This creates a growing need for the integration of the actor-network method with research in the field of artificial intelligence, multi-agent systems, synergetics, knowledge engineering, ergonomics and other areas. Actor-network theory offers new semantics for some concepts adopted in multi-agent systems research. An actor-network model of a multimodal logistics process, in which heterogeneous actors are represented by four-component signs, is also proposed. The same model at meta-level can be applied to logistics networks in which individual multimodal terminals are nodes. The theoretical platform of the proposed model is the actor-network theory with elements of formal logics of action and the method of fuzzy indicators integrated into it. The virtual automatic device described within the framework of the presented model can be implemented on the Internet of Things platform, providing decision support and coordination of interactions in real time between mobile actors, including "smart loads".

### REFERENCES

1. Van Duin, J.h.r. (Ron). Logistics Concept Development in Multi-Actor Environments. *Aligning stakeholders for successful development of public/private logistics systems by increased awareness of multi-actor objectives and perceptions*. 2012. 10.13140/2.1.1426.9122.
2. M.D. Pautov. Model of transshipment of imported grain cargo through Russian seaports. *Science and technology in transport*. No.2. 2015, pp. 55-61. ISSN 2074-9325
3. B. Latour. Networks, Societies, Spheres – Reflections of an Actor-Network Theorist. *International Journal of Communication*. 2011. Vol. 5, pp. 796-810.
4. B. Latour. An Inquiry Into Modes of Existence: An Anthropology of the Moderns / C. Porter (trans.). Cambridge, MA: Harvard University Press, 2013. 486 p.
5. M. Callon. Techno-economic networks and irreversibility. In J. Law (Ed.), *A sociology of monsters*, 1991, pp. 132-161. London: Routledge.
6. J. Law. Technology and Heterogeneous Engineering: The Case of Portuguese Expansion. *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology* / W. E. Bijker et al. (eds). Cambridge, MA: MIT Press, 2012, pp. 105-127.
7. M. Erofeeva. On the possibility of an actor-network theory of action. *Sociology of power*, 2015. No. 27 (4), pp. 51-71.
8. N. Bencherki. Actor-Network Theory. In Craig Scott & Laurie Lewis (eds.), *The International Encyclopedia of Organizational Communication*. New York, NY: Wiley. 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118955567.wbieoc002>
9. M. Hulsmann, K. Windt. Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics: The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow, Springer, 2007.
10. N. Hackius, M. Petersen. Blockchain in Logistics and Supply Chain: Trick or Treat? *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, 23, 2017.
11. B. Montreuil. Toward a physical internet: meeting the global



logistics sustainability grand challenge, *Logistics Research*, 2011, no. 3 (2-3), pp. 71-87.

12. D. McFarlane, V. Giannikas, A.C. Wong, M. Harrison. Product intelligence in industrial control: Theory and practice, *Annual Reviews in Control*, 2013, no. 37 (1).

13. B. Latour. On Actor-Network Theory. A Few Clarifications Plus More than a Few Complications. *Soziale Welt*. 1996. Vol. 47, pp. 369-381.

14. G.A. Kiselev, A.I. Panov. A sign approach to the problem of role distribution in a coalition of cognitive agents. *Proceedings of SPIIRAN*. 2018. No. 2(57). ISSN 2078-9181, pp. 161-187. DOI 10.15622/cn.57.7

15. A.A. Shirokov. The Politics of Explanation and the Strategy of Description by Bruno Latour: How to Write Infrareflexive Texts. *Russian Sociological Review*, 2019. Vol. 18. No. 1, pp. 186-216.

16. Y. Iskanderov, M. Pautov. Actor-Network Method of Assembling Intelligent Logistics Terminal. In: Silhavy R. (eds) *Applied Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1226. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51974-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51974-2_4)

17. Y. Iskanderov, M. Pautov. Agents and Multi-Agent Systems as Actor-Networks. *Proceedings of the 12th International Conference on*

*Agents and Artificial Intelligence ICAART 2020*, 22-24 February 2020, Vol. 1, edited by: A. Rocha, L. Steels, J. van den Herik, pp. 179-184. DOI: 10.5220/0008935601790184

18. Y. Iskanderov, M. Pautov. Heterogeneous Engineering in Intelligent Logistics. In: Abraham A., Shandilya S., Garcia-Hernandez L., Varela M. (eds) *Hybrid Intelligent Systems. HIS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1179. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49336-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49336-3_9)

19. Y. Iskanderov, M. Pautov. Actor-Network Approach to Self-organisation in Global Logistics Networks. In: Kotenko I., Badica C., Desnitsky V., El Baz D., Ivanovic M. (eds) *Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence*, vol 868. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_14)

20. A.L. Blinov, V.V. Petrov. Elements of action logic. Moscow: Science. 1991. ISBN 5-02-008150-7

21. E. Lorini, M. Verdicchio. Towards a Logical Model of Social Agreement for Agent Societies. *Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems*. Vol. 2010, pp. 147-162.

---

**For citation:** Iskanderov Y.M., Smolentsev S.V., Butsanets A.A., Pautov M.D. Actor-network modeling multimodal logistics processes. *H&ES Reserch*. 2023. Vol. 15. No 5. P. 57-67. doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-57-67 (In Rus)

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В ПОТОКОВОМ РЕЖИМЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ШЕЛУХИН

Олег Иванович<sup>1</sup>

ВАНЮШИНА

Анна Вячеславовна<sup>2</sup>

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Внедрение методов машинного обучения, позволяет производить автоматическую классификацию, анализ и фильтрацию вредоносных и нежелательных мобильных приложений сетевого трафика, которые могут представлять собой угрозу целостности или доступности данных, а нежелательные – угрозу конфиденциальности. Поскольку характеристики таких данных меняются с течением времени, это создает проблемы для точного прогнозирования классификационных моделей. Явление, когда характеристики и распределение данных меняются, что приводит к необходимости обновления модели, называется "дрейфом концепции", а адаптация модели к новым изменениям – "адаптация дрейфа концепции".

**Цель:** В таких нестационарных средах, предварительно подготовленные модели машинного обучения быстро устаревают и возникает необходимость в их непрерывном обновлении, что приводит к необходимости обнаружения дрейфа концепции. При нестационарном характере данных, обнаружение и адаптация дрейфа концепции являются важным компонентом решений машинного обучения, работающих в потоках данных, чтобы поддерживать их целостность, достоверности и уровня доверия. **Результаты:** Для решения подобных задач в настоящее время широкое распространение получили методы, основанные на технологиях математической статистики и машинного обучения, с помощью которых даже неизвестные вредоносные приложения могут быть детектированы с определенной степенью вероятности. На основании систематического обзора литературы представлено основные группы недавних научных публикаций по детекторам концептуального дрейфа. Рассмотрены контролируемые (статистические, оконные и ансамблевые), полу контролируемые, не контролируемые, ансамблевые методы обнаружения дрейфа концепции. Анализируются особенности онлайн обнаружения дрейфа основанные на методах оконной и пакетной обработки. Предложена таксономия современных подходов к неконтролируемому дрейфу концепций.

## Сведения об авторах:

<sup>1</sup> Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), д.т.н., заведующий кафедрой "Информационная безопасность", Москва, Россия  
sheluhin@mail.ru

<sup>2</sup> Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), к.т.н., доцент кафедры "Информационная безопасность", Москва, Россия  
a.v.vaniushina@mtuci.ru

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Нежелательные приложения, потоковый режим, дрейф концепции, методы обнаружения, статистические методы, опорное окно, пакетные методы, неконтролируемые методы, потоковый режим.

**Для цитирования:** Шелухин О.И., Ванюшина А.В. Сравнительный анализ методов обнаружения нежелательных сетевых приложений в потоковом режиме для обеспечения информационной безопасности // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 15. № 5. С. 68–80 doi: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-68-80

## Введение

Определение статистики приложений вредоносных и нежелательных мобильных приложений сетевого трафика помогает не только отслеживать состояние сети, выявлять сбои, но и при необходимости ограничивать доступ к сетевым ресурсам, которые с точки зрения информационной безопасности могут нанести вред пользователю.

Первая задача, которая встает перед администраторами, это определить, какой тип сетевого трафика генерируется пользователями. Трафик может быть вредоносным (например, кража данных или разведка сети), неприемлемым и нарушающим политику (например, использование служб обмена файлами) или выходящим за рамки обычных бизнес-процессов (например, генерирование трафика в нерабочее время). Приложения, соответствующие вредоносному трафику, называют нежелательными.

Это могут быть потенциально опасные приложения. У разных сетевых приложений (для использования социальных сетей, служб обмена мгновенными сообщениями, служб обмена файлами, одноранговых служб и др.) разные риски безопасности. Они могут ставить под угрозу данные и системные активы, влиять на производительность труда сотрудников и использовать пропускную способность сети.

Таким образом, проблема контроля доступа к Интернет ресурсам актуальна и имеет важное значение по следующим основным причинам:

- блокирование доступа к нелегальной (экстремистской, антисоциальной и другой) информации;
- предотвращение использования Интернет ресурсов не по назначению, в частности, ограничение и контроль доступа к развлекательным и другим ресурсам для личного пользования;
- предотвращение утечки конфиденциальной информации через Интернет.

Существует множество как коммерческих, так и некоммерческих продуктов, решающих подобные задачи.

Основные количественные показатели при оценке работы систем фильтрации Интернет-трафика, следующие:

- точность анализа – процент верно отфильтрованных Интернет-ресурсов;
- излишнее блокирование или ложноположительные ошибки – процент «хороших» ресурсов, ошибочно запрещенных системой фильтрации;

Для решения подобных задач в настоящее время широкое распространение получили методы, основанные на технологиях математической статистики и машинного обучения, с помощью которых даже неизвестные вредоносные приложения могут быть детектированы с определенной степенью вероятности.

В реальных сценариях машинного обучения характеристики и распределение данных меняются со временем, что создает проблемы для точного прогнозирования моделями классификации [91]. В таких нестационарных средах, где данные могут меняться очень быстро, предварительно обученные модели машинного обучения могут устареть, и возникает необходимость обновления модели таким образом,

чтобы она учитывала новые закономерности в данных и оставалась актуальной.

Явление, когда характеристики и распределение данных меняются, что приводит к необходимости обновления модели, называется "дрейфом концепции", а адаптация модели к новым изменениям – "адаптация дрейфа концепции" [23, 78, 54, 77].

В зависимости от источника дрейфа и его влияния на совместное распределение вероятностей признаков, дрейф концепции может быть виртуальным или реальным.

В случае реального дрейфа производительность классификатора ухудшится [51] с точки зрения метрики оценки, и потребуется обновление модели. Изменения в распределении данных могут происходить по разным шаблонам, которые могут влиять или не влиять на принятие решения (реальный или виртуальный дрейф концепции) в сценарии контролируемого обучения. Эти изменения могут быть измерены с помощью некоторых статистических показателей, таких как среднее значение, дисперсия и т.д. Исходя из модели изменения статистических показателей, дрейф концепции можно разделить на "внезапный" (резкий), "инкрементный", "постепенный" и "повторяющийся" [24]. Типы дрейфа концепции и другие паттерны изменения показаны на рисунке 1.

Помимо этих типов дрейфа, в течение определенного периода могут возникать и другие модели шума и выбросов (всплесков). В случае внезапного / резкого дрейфа данные (распределение) меняются мгновенно без изменений [34], например, это могут быть показания только что замененного датчика. При постепенном дрейфе распределение данных смещается постепенно, проходя через различные промежуточные стадии, например, датчики изнашиваются и становятся менее точными. В случае постепенного дрейфа концепция или распределение данных чередуется между старым и новым уровнями случайным образом, прежде чем стабилизируется на новом уровне, например, изменения в предпочтениях пользователя в целом. При повторяющемся дрейфе концепций предыдущие концепции повторяются случайным образом, например, в моде [24].

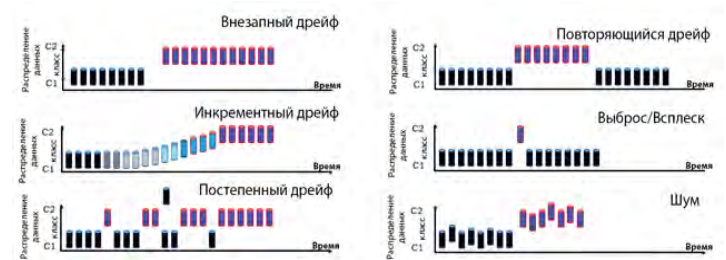


Рис. 1. Типы дрейфа концепции и другие паттерны изменения

Таким образом, при нестационарном характере данных, обнаружение и адаптация дрейфа концепции являются важным компонентом решений машинного обучения, работающих в потоках данных, чтобы поддерживать их целостность, достоверности и уровня доверия.

Методы обнаружения дрейфа концепции могут быть классифицированы по типу механизма обнаружения дрейфа

на контролируемые [91], неконтролируемые [25], и полуконтролируемые [18].

### Контролируемое обнаружение дрейфа концепции

В сценариях с контролируемым обнаружением дрейфа и машинным обучением предполагается, что метки классов доступны сразу после предсказания, а дрейф обнаруживается на основе функционирования классификатора. Если в рамках определенного размера окна точность или другие показатели оценки качества классификации, такие как precision и recall, падают ниже порога то считается, что произошел дрейф. Однако на практике предположение относительно доступности истинных меток не реалистично, и в большинстве случаев истинные метки не доступны [25]. В таких ситуациях, если требуется реальная и быстрая реакция, подобные детекторы дрейфа теряют свою значимость. Контролируемые методы обнаружения дрейфа могут обнаружить только реальный дрейф.

Контролируемые методы обнаружения дрейфа можно разделить на статистические, оконные и ансамблевые (на основе блоков и на основе инкрементов) [91].

### Статистические методы обнаружения дрейфа

Статистические методы обнаружения дрейфа применяют статистические тесты к окну оценок работы классификатора, чтобы обнаружить любые значительные изменения в его работе. Последовательный тест SPRT (Sequential Probability Ratio Test), введенный в [86] лежит в основе нескольких алгоритмов обнаружения дрейфа, созданных позднее. Тест SPRT используется для проверки гипотезы о принадлежности поступающих данных к распределению  $P_0$  или  $P_1$  или о необходимости большего количества выборок для получения заключения. Основанная на SPRT кумулятивная сумма (CUSUM), схема непрерывной проверки для обнаружения изменений в параметрах распределения  $\theta$ , использует остатки в качестве входных данных для обнаружения изменений, если среднее значение изменяется более чем на установленный порог [68].

Разновидностью CUSUM является тест Пейджа-Хинкли РН (Page-Hinckley), который используется для обнаружения резкого изменения среднего значения гауссовского сигнала [4]. Хотя CUSUM и РН – похожи, они используются в разных потоковых средах. CUSUM применяется к остаткам от предиктора и используется для обнаружения аномалий, в то время как РН лучше подходит для обнаружения внезапных изменений.

Метод обнаружения дрейфа DDM (drift Detection Method) [23] является одним из самых популярных в области обнаружения дрейфа концепций. DDM моделирует коэффициент ошибок онлайн-классификатора с помощью биномиального распределения и генерирует предупреждение. Если коэффициент ошибок превышает заданные пороговые значения – подается сигнал тревоги. DDM может обнаружить внезапный или резкий дрейф, но в случае, если концепция меняется постепенно, изменения остаются незамеченными, и предупреждение не генерируется.

Аналогом DDM является метод раннего обнаружения EDDM (Early Detection Method) [1], и использует расстояние между двумя ошибками классификации для обнаружения дрейфа. EDDM способен обнаруживать медленные постепенные изменения более эффективно чем DDM. EDDM дополнительно определяет уровни предупреждения и уровни дрейфа для обнаружения дрейфа. Требуется, чтобы произошло порядка 30 ошибок классификации, прежде чем он сможет обнаружить дрейф.

Поскольку и DDM и EDDM рассматривают изменение точности или коэффициента ошибок как признак дрейфа, они чувствительны к сценариям дисбаланса классов и, таким образом, не могут правильно отслеживать изменения в миноритарном классе.

В сценарии дисбаланса классов миноритарный класс может вносить очень малый вклад в точность, как и в показатели эффективности, и может потребоваться много времени для появления экземпляров из миноритарного класса. Чтобы решить эти проблемы с DDM и EDDM в [90] предложен метод обнаружения дрейфа для онлайн-обучения дисбалансу классов DDM-OCI (Drift Detection Method for Online Class Imbalance Learning), который использует изменение полноты миноритарного класса для обнаружения дрейфа. Метод DDM-OCI предполагает, что наличие дисбаланса классов известно заранее, и оценивается в задачах двоичной классификации. Другая проблема DDM-OCI заключается в том, что вполне возможно, что дрейф может произойти без изменения полноты миноритарного класса, например, в случае перехода от распределения дисбалансных классов к распределению балансных классов.

Другой подход, работающий подобно DDM и EDDM это STEPД (Statistical Tests for Equal Proportions) [65], использует два дополнительных параметра в качестве уровней значимости для предупреждений и определения уровня дрейфа на основе изменений в точности старого и последнего окна. STEPД поддерживает два окна: старое окно, которое содержит все точки данных, наблюдаемые с момента последнего дрейфа, и последнее окно с размером по умолчанию 30, и сравнивает точность этих двух окон с помощью проверки гипотезы равных пропорций. Основная проблема STEPД заключается в том, что при небольшом размере выборки использованный статистический тест оказался неэффективным.

В [5] предложен метод обнаружения дрейфа на основе адаптивного окна ADWIN2 (adaptive-window based drift detection method), как усовершенствование их первоначальной работы ADWIN в котором используется окно переменного размера, которое регулирует свой размер в зависимости от изменений в распределении данных. В ADWIN пользователю необходимо указать только размер одного большого окна  $W$ , которое разбивается на два оптимальных под-окна  $W_{hist}$  и  $W_{new}$  на основе обнаруженного значительного изменения в средних значениях любых двух таких окон. Размер окна увеличивается, если изменений не обнаружено, и уменьшается, если обнаружен дрейф или изменение.

В [67] предложен метод обнаружения дрейфа с использованием границ Хеффдинга (HDDM -Hoeffding's bounds Drift Detection Method), который использует скользящие средние

и взвешенные скользящие средние для обнаружения внезапного и постепенного дрейфа.

Для решения таких проблем, как дисбаланс классов и ложные срабатывания, с которыми сталкивались предыдущие подходы, в [89] предложен эффективный метод обнаружения дрейфа, основанный на отслеживании всех четырех элементов матрицы ошибок. Эти элементы включают TPR, TNR, FPR и FNR, называемые четверкой линейных коэффициентов (LFR Linear Four Rates), а также recall и precision как для миноритарного, так и для мажоритарного классов.

LFR работает как с пакетными, так и с потоковыми данными и превосходит DDM и DDM OCI в раннем обнаружении дрейфов, при высокой частоте обнаружения и низком уровне ложных срабатываний.

Улучшение LFR в отношении ложных срабатываний было предложено в [95] под названием HLFR (Hierarchical Linear Four Rates), которая использует иерархическую проверку гипотез для обнаружения и подтверждения дрейфа.

Уровень 1 используется для обнаружения дрейфа на основе пороговых уровней всех четырех элементов в матрице ошибок.

Уровень 2 использует тест на перестановку для подтверждения истинности или ложности дрейфа. Метод HLFR превосходит методы DDM, EDDM и LFR, при раннем обнаружении и низком количестве ложных срабатываний как на сбалансированных, так и на несбалансированных наборах данных. В [2], предложен основанный на DDM метод RDDM (Reactive Drift Detection Method), который решает проблему меньшей чувствительности к постепенным дрейфам для больших концепций (с которой сталкивается DDM) путем отбрасывания старых наблюдений из окна.

Усовершенствование STEPД было предложено в [9] для решения проблемы разреженных и несбалансированных данных, когда статистический тест для равных пропорций считался непригодным для небольшого размера выборки предложено три варианта на основе теста Фишера.

Метод FPDD (Fisher Proportion Drift Detector) использует точный тест Фишера, если ошибки или правильные предсказания меньше 5 в любом окне, в противном случае он работает как STEPД.

Метод FSDD (Fisher-based Statistical Drift Detector) использует точный тест Фишера, если ошибки или правильные предсказания меньше 5 в любом окне, однако использует критерий хи-квадрат на однородность пропорций вместо статистического теста на равенство пропорций в другом случае.

Тест FTDD (Fisher Test Drift Detector) использует точный тест Фишера в явном виде.

Все три метода были протестированы на четырех искусственных и трех реальных наборах данных с резкими и постепенными дрейфами. Все они оказались лучше, чем STEPД и DDM в плане обнаружения дрейфов и повышения точности.

Метод MDDMs (The McDiarmid Drift Detection Methods), предложенный в [70], используют скользящее окно для хранения результатов предсказания в виде 0, если предсказание неверно, и 1 в противном случае. Веса присваиваются этим значениям таким образом, что  $w_i < w_{i+1}$ , тем самым придавая большее значение недавним наблюдениям по сравнению с более старыми. Он сохраняет среднее значение скользящих

окон и сравнивает его со средним значением окна, включающего текущее предсказание  $t$ . Значительная разница между двумя средними значениями, указывает на дрейф.

На основе схем взвешивания были предложены три варианта: MDDM-A, MDDM-G и MDDM-E, основанные на арифметической, геометрической и Эйлеровой схемах взвешивания, которые были протестированы на различных искусственных и реальных наборах данных. Эти методы оказались лучше, чем EDDM, CUSUM и Page-Hinckley с точки зрения задержки обнаружения и точности классификатора.

### Ансамблевые методы обнаружения дрейфа

Ансамблевые методы используют группу классификаторов и их среднюю частоту ошибок для обнаружения таких изменений в базовых концепциях. Их использование в машинном обучении оказалось более эффективным по сравнению с одиночным классификатором. Одна из первых работ, связанных с обнаружением дрейфа концепций в ансамблях [64], широко известна как алгоритм потокового ансамбля SEA (Streaming Ensemble Algorithm). Алгоритм SEA последовательно строит  $K$  классификаторов C4.5 на фиксированном размере фрагмента для создания ансамбля C.

Когда ансамбль заполнен, он используется для предсказания входящего фрагмента данных. Он также строит один классификатор C4.5 и сравнивает производительность ансамбля и одного классификатора. Если производительность одиночного классификатора выше, чем у ансамбля, то классификатор с наихудшими показателями удаляется, а новый классификатор добавляется в ансамбль. Был протестирован искусственно созданный набор данных с четырьмя внезапными дрейфами, и найдено, что SEA смог быстро восстановиться по сравнению с одиночным классификатором.

Один из недостатков SEA заключается в его механизме удаления из ансамбля классификатора с наихудшими показателями без учета периодичности данных, на которых он был обучен. Ансамбль с заранее определенным размером может все еще иметь много классификаторов с плохими показателями, обученных на довольно старых концепциях. Эта проблема была решена с помощью AWE (Accuracy Weighted Ensemble) [87], который строит новый классификатор на каждом поступающем фрагменте, как и SEA. Однако вместо удаления из ансамбля классификатора с наихудшими показателями, он полностью строит новый ансамбль, включающий только те классификаторы, у которых MSE меньше заранее определенного порога. Это позволяет получить ансамбль с переменным размером реальных наборов данных.

Очевидным недостатком AWE является эффект заглушения, приводящий к отсутствию предсказания класса, если ни один из классификаторов не соответствует порогу MSE в случае внезапного дрейфа. Улучшение AWE было сделано алгоритмом AUE (Accuracy Updated Ensemble) [6], позволяющим обновлять отдельные классификаторы напрямую, а не только обновляя веса. Метод инкрементного ансамбля на основе динамически взвешенного большинства DWM (Dynamically Weighted Majority) был предложен в [44], который поддерживает взвешенный набор экспертов в качестве базовых моделей.

Если ансамбль допускал ошибку, в набор добавлялся новый эксперт. Если ошибку допускал эксперт или базовая модель, его вес уменьшался. Если эксперт постоянно совершал ошибки, он удалялся из ансамбля на основе установленного порога. Метод DWM использует предсказания каждой базовой модели и ее вес для вычисления прогноза ансамбля.

Семейство Learn++ представляет собой серию алгоритмов, использующих инкрементально обученные классификаторы, работающие на пакетах данных со взвешенным мажоритарным голосованием. В [72] представлен инкрементальный ансамблевый алгоритм Learn++, который использует различные слабые обучающие механизмы на основе нейронных сетей для создания нескольких гипотез, а затем использует большинство голосов для классификации экземпляра. Алгоритм Learn++ использует механизм взвешивания, как в Adaboost, и поддерживает инкрементное обучение, сохраняя знания, полученные из предыдущих данных, без необходимости хранить исторические данные.

Недостатком Learn++ является то, что сохранение старых наблюдений, полученных на старых образцах, на неопределенный срок может превзойти знания, полученные на новых данных. В результате обнаружение дрейфа может оказаться невозможным без забывания старой информации. Кроме того, экземпляры из нового класса могут генерировать множество классификаторов, поскольку все старые классификаторы также сохраняются. Эта проблема была решена в [62], где была предложена система Learn++.MT, которая использовала динамическое взвешенное голосование DWV (Dynamic Weighted Voting) для корректировки весов базовых моделей на основе их производительности на тестовых данных. Если базовая модель не видела класс ранее, то его вес в предсказании данного экземпляра уменьшается.

Улучшением Learn++.MT стал алгоритм Learn++.NC (New Class) [61], который использует механизм DW-CAV (Dynamically Weighted Consult and Vote). В алгоритме отдельные базовые модели консультируются друг с другом перед голосованием, на основании чего они либо обновляют свой вес, либо снимаются с голосования. Все эти алгоритмы Learn++ предполагают стационарную среду данных и не обнаруживают, и не адаптируют дрейф концепций в явном виде. В [60] предложен алгоритм Learn++ Learn++NSE, алгоритм инкрементального обучения в нестационарных средах, который изменяет веса базовых моделей на основе их производительности на текущих данных.

Learn++NSE сохраняет все предыдущие базовые модели и одновременно генерирует новый классификатор на новом фрагменте данных, который становится доступным. Для решения проблемы дисбаланса классов [15] предложен алгоритм Learn++NIE (Non-Stationary and Imbalanced Environments), который строит новые sub-ансамбли на каждом новом фрагменте данных и использует recall для оценки ансамблей и формулировки составной гипотезы. В [14] предложен алгоритм Learn++.CDS (Learn++ for Concept Drift with SMOTE), который вместо использования метрик recall или F-Measure для обработки дисбаланса классов, использует SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) для добавления дополнительных образцов миноритарных классов.

Было обнаружено, что производительность алгоритмов серии Learn++ сильно зависит от базовых моделей [47]. Хотя подход в Learn++.NSE отдает предпочтение вновь созданным классификаторам, он все же может быть использован для обнаружения дрейфа концепций и может стать основой для дальнейших улучшений [91].

Зависимость детекторов дрейфа от наличия меток классов в контролируемых методах обнаружения дрейфа и связанные с этим затраты и задержки в получении истинных меток в реальных приложениях привлекли внимание к методам построения структуры, которые либо не зависят от меток классов, либо зависят в ограниченной степени. Для начального обучения классификаторов и инициализации детекторов дрейфа некоторые из этих работ требуют маркированных данных, а уровни доверия классификатора нужны только для обнаружения дрейфа. Эти методы были классифицированы как полуконтролируемые методы обнаружения дрейфа [34].

### Полуконтролируемое обнаружение дрейфа

Полуконтролируемые методы обнаружения дрейфа требуют ограниченного количества маркированных данных для первоначального обучения классификатора или ансамбля. Дрейф обнаруживается на основе изменений в уровне доверия к предсказанию. Для обновления модели требуются метки только для тех случаев, когда уровень доверия низкий.

В [28] предложен полуконтролируемый метод обнаружения дрейфа SAND (Semi-Supervised Adaptive Novel Class Detection), который для обнаружения дрейфа концепций использует достоверность классификатора и размер пакета. SAND использует полуконтролируемый ансамблевый классификатор, которому для обновления модели требуется ограниченное количество данных, если уровень доверия ниже определенного порога. Метод SAND также способен обнаруживать выбросы и определять новый класс, если таких выбросов много, и они расположены близко друг к другу. Из-за обнаружения изменений после вычисления каждого значения достоверности SAND становится неэффективным из-за большого времени выполнения. Для решения этой проблемы в [29] предложен метод ECHO (Efficient Handling of Concept Drift Evolution over Stream Data), который использует динамическое моделирование и выборочно выполняет обнаружение изменений. Экспериментальные результаты показали улучшение времени выполнения и точности по сравнению с SAND.

В [34] представлен обзор способов дрейфа концепций, а также классификацию существующих методов обнаружения и обработки дрейфа как контролируемые, полуконтролируемые и неконтролируемые.

Среди них полуконтролируемые подходы OLINDA (Online Novelty and Drift Detection Algorithm) [85], который использует кластеризацию k-means для обнаружения дрейфа, и ECSMiner (Enhanced Classifier for data Streams with novel class Miner). Другие рассмотренные в обзоре методы в большей степени направлены на обнаружение новых классов, чем на обнаружение дрейфа.

## Неконтролируемое обнаружение дрейфа

Ограничения контролируемых и полуконтролируемых методов обнаружения дрейфа, привели к использованию неконтролируемых методов обнаружения дрейфа, направленных на выявление дрейфа концепций путем мониторинга изменений в распределении данных [25]. Алгоритмы реализующие неконтролируемые методы обнаружения дрейфа обычно поддерживают два окна: эталонное (историческое) и окно обнаружения (новые данные). Для количественной оценки разницы между распределением исторических и новых данных используют меру расстояния. Историческое окно остается фиксированным, в то время как окно обнаружения является скользящим. Если разница в распределении данных в двух окнах значительна, то дрейф обнаруживается [51]. Неконтролируемое обнаружение дрейфа также известно как "обнаружение дрейфа на основе распределения данных".

В обзорных статьях [39, 31, 51, 34], посвященных обнаружению дрейфа, неконтролируемые методы обнаружения дрейфа обсуждаются довольно подробно наряду с контролируемыми или ансамблевыми методами. В [25] представлен подробный обзор только неконтролируемых методов.

Большинство неконтролируемых методов обнаружения дрейфа поддерживают эталонное окно, содержащее экземпляры данных, на которых был обучен последний классификатор, и окно обнаружения, которое рассматривается с точки зрения обнаружения дрейфа. Если дрейф обнаруживается на основе пакета элементов данных в окне обнаружения, то эти методы называются методами обнаружения дрейфа на основе пакета. Если дрейф обнаруживается на основе каждого отдельного экземпляра в окне обнаружения, то они называются методами обнаружения дрейфа в режиме онлайн.

Алгоритмы обнаружения, основанные на пакетном подходе, выявляют дрейф на основе изменений в распределении данных в пакете фиксированного или динамического размера. Некоторые из этих методов используют весь пакет для обнаружения дрейфа. Другие используют часть пакета или подмножество образцов в окне обнаружения.

Одна из первых работ, связанных с неконтролируемыми пакетными методами обнаружения дрейфа, основана на оценке плотности распределения и называется MD3 (Margin Density Drift Detection) [79]. MD3 использует обученный SVM-классификатор с известным набором минимальных и максимальных значений плотности  $[min, max]$  вместе с порогом  $\theta$ . Для входящего пакета данных MD3 проверяет каждый экземпляр, лежит ли он в полях или нет, и подсчитывает количество экземпляров, лежащих в полях. После чего сравнивает это количество с предыдущими значениями  $[min, max]$  и обновляет  $[min, max]$  для текущего пакета. Если  $max - min > \theta$ , то дрейф обнаруживается. Увеличение или уменьшение плотности распределения полей свидетельствует о наличии дрейфа.

Одной из основных проблем MD3 является зависимость от классификатора SVM. В [80] предложена независимая от классификатора версия MD3 с использованием ансамбля классификаторов. Для обнаружения дрейфа можно отслеживать области обобщения или слепые зоны, которые являются областями с высокой неопределенностью. Этот модифици-

рованный вариант MD3 отслеживает эти слепые зоны нескольких классификаторов, и если между отдельными классификаторами имеются значительные разногласия, то это свидетельствует о высокой неопределенности.

MD3 использует плотность поля в случае линейного SVM и плотность слепых пятен в случае других классификаторов, таких как деревья решений и ближайшие соседи, в качестве базовых моделей в ансамбле. Значительная разница между плотностью поля или плотностью слепых пятен в двух окнах данных (опорном и окне обнаружения) указывает на дрейф в наборе данных. Эта модифицированная техника MD3 названа MD3-RS (Random Subspace) по сравнению с прежней MD3-SVM. MD3-RS требует маркированных образцов для подтверждения обнаруженного дрейфа, что делает этот подход практически неприменимым в средах с потоковой передачей данных, поскольку такие метки не всегда доступны.

Иногда изменения в распределении данных не обусловлены нестационарностью исследуемой системы, а намеренно вносятся злоумышленниками, чтобы вывести из строя систему обнаружения дрейфа и остаться непойманными. Такой тип дрейфа называется состязательным дрейфом, когда злоумышленники используют уязвимости классификатора или защитной системы, чтобы получить доступ к системе, обходя механизм обнаружения. В [81] предложена потоковая структура predict-detect – механизм обнаружения дрейфа с целью обнаружения таких атак противника на классификатор или систему обнаружения дрейфа.

Предложенный метод использует два независимых классификатора  $C_{predict}$  и  $C_{detect}$ , обученных на несовпадающих подмножествах признаков, где  $C_{detect}$  полностью скрыт от злоумышленника. Когда злоумышленник узнает об уязвимостях  $C_{predict}$ , он создает образцы атак, попадающие в "слепые пятна" или слабые области классификатора, что приводит к высокому уровню разногласий между  $C_{predict}$  и  $C_{detect}$ . Когда разногласия превышают установленный порог, обнаруживается дрейф, и запрашиваются метки для образцов, имеющих разногласия.

В [10] предложен метод обнаружения дрейфа без наблюдения на основе активного обучения, который не требует маркированных образцов для обнаружения дрейфа. Первоначально классификатор обучается на полностью маркированных обучающих данных, а минимальная и максимальная плотность наиболее значимых экземпляров на основе виртуальных полей и фиксированной неопределенности [96] вычисляется в качестве эталона с помощью  $k$ -кратной кросс-валидации. Для каждого окна обнаружения отслеживается плотность наиболее значимых экземпляров, и дрейф обнаруживается, если разница превышает пороговый уровень.

После обнаружения дрейфа запускается модуль реакции, который обновляет классификатор на основе помеченных образцов (когда они становятся доступными) текущей партии. Это новое обучение обновляет минимальные и максимальные значения плотности наиболее значимых экземпляров. Эта технология называется методом обнаружения дрейфа на основе активного обучения DDAL (Drift Detection

Method based on Active Learning) и может быть использована с любым классификатором, обеспечивающим высокую степень уверенности в предсказании.

Все описанные выше неконтролируемые методы обнаружения дрейфа, такие как MD3, MD3-RS, Predict-Detect и DDAL, используют неполный пакет для обнаружения дрейфа концепций.

Помимо этих методов, обнаруживающих дрейф концепций с помощью неполного пакета, было предложено несколько методов, использующих полный пакет для обнаружения дрейфа концепций, которые называются методами обнаружения полного пакета.

В [3] предложен неконтролируемый метод обнаружения дрейфа в распознавании активности под названием  $U_{\text{detect}}$ . Метод использует изменение в распределении принадлежности к классу, предсказанном классификатором, по сравнению с эталонным распределением из маркированных обучающих данных. Хотя метод и не требует истинных меток, он зависит от предсказаний классификатора. Классификатор необходим для предсказания меток, чтобы обнаружить дрейф в наборе данных.

В [48] был предложен метод обнаружения дрейфа на основе несходства показателей плотности, который использует KNN (K-Nearest Neighbour) для определения различий в распределениях. В [46] предложен метод быстрого и точного обнаружения аномалий FAAD (Fast and Accurate Anomaly Detection) для обнаружения аномалий в последовательности многомерных данных без влияния дрейфа концепций. Будучи прикладным подходом к обнаружению аномалий FAAD, фокусируется на обнаружении аномалий, а не на обнаружении дрейфа. В [58] предложена расширенная версия SQSI (Stream Quantification by Score Inspection) [57], которая использует выбор экземпляров для обнаружения изменений в распределении классов неконтролируемым способом. При этом данные делятся на партии и предсказываются классификатором. Чтобы проверить, совпадает ли распределение классов с контрольной партией или нет выполняется KS-тест (тест Колмогорова-Смирнова).

Если тестовая статистика  $< 0,001$ , то выполняется еще один KS-тест, преобразующий окна эталона и обнаружения таким образом, чтобы оба окна имели одинаковые среднее и стандартное отклонение. Если тест не проходит, это означает, что дрейф подтверждается, и чтобы обновить модель с текущим окном обнаружения запрашиваются метки для выбранных экземпляров. SQSI-IS нуждается в классификаторе, который может предсказать доверительные интервалы или вероятности классов, прежде чем обнаружить дрейф.

Помимо пакетных методов, исследовательским сообществом были предложены неконтролируемые методы обнаружения дрейфа в режиме онлайн.

### Основанные на онлайн неконтролируемые методы обнаружения дрейфа

В отличие от пакетных методов, которые накапливают экземпляры в пакет определенного размера и затем используют некоторый алгоритм обнаружения дрейфа для сравнения текущего пакета с некоторым эталонным пакетом, он-

лайн методы выполняют обнаружение дрейфа при поступлении каждого отдельного экземпляра. Для инициализации эти методы должны накопить некоторое количество экземпляров в самом начале. После инициализации поддерживается эталонное окно, которое может быть фиксированным на обучающих экземплярах или скользящим по входящему потоку данных. Другое скользящее окно определяется по входящему потоку данных и называется окном обнаружения. Для обнаружения дрейфа распределение эталонного окна и окна обнаружения сравниваются, и выполняется статистический тест для проверки значимости сходства или несходства.

На основе опорного окна - фиксированного или скользящего, онлайн методы могут быть классифицированы как с фиксированным опорным окном или скользящим опорным окном.

### Фиксированное опорное окно

Онлайн-методы обнаружения дрейфа, основанные на фиксированном опорном окне, поддерживают неизменным опорное окно (основанное на данных обучения). В [21] предложен метод обнаружения дрейфа на основе инкрементального теста Колмогорова-Смирнова (IKS-bdd Incremental Kolmogorov Smirnov) для проверки того, принадлежат ли две выборки к одному распределению данных или нет. При добавлении каждой новой выборки выполняется KS-тест для проверки сходства или различия между двумя окнами.

В случае отклонения нулевой гипотезы обнаруживается дрейф. IKS-bdd пытается обнаружить дрейф в каждом атрибуте окна обнаружения, а не использовать многомерную модель. В [43] предложен метод CD-TDS (Change Detection in Transactional Data Streams), который обнаруживает как локальные, так и глобальные дрейфы в наборах элементов. Изменения в элементах представляют только локальный дрейф, в то время как изменения в связях между элементами представляют сценарий глобального дрейфа. Модуль обнаружения локального дрейфа поддерживает два окна, используя границу Хеффдинга. Если разница между средними значениями двух окон превышает значение  $\epsilon$ , определенное границей Хеффдинга, то дрейф обнаруживается. Для обнаружения глобального дрейфа используется парный статистический тест для сравнения структуры дерева в обоих с помощью расстояния правки Левенштейна.

### Скользящее опорное окно

Для онлайн обнаружения дрейфа в подходах с использованием скользящего окна опорное окно перемещается по входящему потоку данных. В [56] предложен метод онлайн неконтролируемого обнаружения дрейфа использующего модифицированную версию теста PageHinkley для обнаружения дрейфа OMV-PHT (Online Modified Version of Page Hinkley Test) [25]. Предложенная методика предназначена для обнаружения дрейфа как полуконтролируемым, так и полностью неконтролируемым способом. В случае полуконтролируемой части, активное обучение используется для выбора наиболее значимых образцов с точки зрения надежности предсказаний классификаторов, и поиск меток для

наиболее неопределенных предсказаний. В случае неконтролируемой версии, изменение распределения надежности классификаторов отслеживается с помощью модифицированной версии теста Пейджа Хинкли для определения дрейфа.

В [63] предложен непараметрический многомерный метод обнаружения дрейфа NM-DDM (non-parametric multidimensional drift detection method), основанный на устраняющих шум автокодировщиках и использует для обнаружения дрейфа каждого признака логарифмическое отношение правдоподобия между эталонным окном и окном обнаружения. Если наибольшее отношение для признака превышает предварительно установленный порог, то дрейф обнаружен. В [12] предложен алгоритм обнаружения дрейфа Plover, который гарантирует обучение и использует расхождение между эталонным окном и окном обнаружения для обнаружения дрейфа. Для обнаружения дрейфа используются различные функции измерения, такие как спектральная плотность и статистические моменты. Чтобы использовать Plover, данные должны быть идентично и независимо распределены, а функции измерения должны быть независимы от входных данных. В [41] предложен подход к обнаружению дрейфа на основе распределения DbDDA (Distribution based Drift Detection Approach), который использует апостериорную оценку классификатора для обнаружения дрейфа концепции.

Все вышеперечисленные неконтролируемые методы обнаружения дрейфа были рассмотрены и упомянуты в [25].

### Заключение

В работе предложена таксономия современных подходов к неконтролируемому дрейфу концепций. На основании систематического обзора литературы представлено основные группы научных публикаций по детекторам концептуально-го дрейфа:

- статьи, в которых рассматриваются и анализируются различные подходы к концептуальному дрейфу, и
- статьи, предлагающие неконтролируемые методы концептуального дрейфа.

Первая группа показала, что очень мало работ посвящено обобщению неконтролируемых подходов к дрейфу концепций.

Вторая группа, привела к объединению неконтролируемых и полу управляемых методов обнаружения дрейфа в две основные категории: пакетные методы и Неконтролируемые методы.

Оперативные и пакетные методы обнаружения дрейфа относятся только к компоненту обнаружения стратегии. С одной стороны, онлайн-методы указывают на возникновение дрейфа в потоке данных по одному экземпляру за раз. С другой стороны, пакетные методы должны обрабатывать набор экземпляров одновременно, чтобы иметь возможность подписывать дрейф.

Проанализированы пакетные методы. Отмечено, что основное различие между этими методами заключается в том, отслеживаются ли существенные изменения распределения данных во всей поступающей партии или только в выбранном наборе экземпляров.

Проанализированы известные онлайн-методы, подразделяющиеся на два типа в соответствии с тем, как они сравнивают два окна, задействованных при обнаружении дрейфа.

Эти окна называются соответственно эталонным и окном обнаружения. Одна группа отличается от другой использованием фиксированных или скользящих опорных окон для обнаружения смещения концепции.

### Литература

1. Baena-García M., del Campo-Ávila J., Fidalgo R., Bifet A., Gavalda R., Morales-Bueno R. Early Drift Detection Method // 4th ECML PKDD International Workshop on Knowledge Discovery from Data Streams, 2006, no. 6, pp. 77-86. <https://doi.org/10.1.1.61.6101>
2. Barros R.S.M., Cabral D.R.L., Gonçalves P.M., Santos S.G.T.C. RDDM: Reactive drift detection method // Expert Systems with Applications, 2017, no. 90, pp. 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.023>
3. Bashir S.A., Petrovski A., Doolan D. A framework for unsupervised change detection in activity recognition // International Journal of Pervasive Computing and Communications, 2017, no. 13(2), pp. 157-175. <https://doi.org/10.1108/IJPC-03-2017-0027>
4. Bifet A. Classifier concept drift detection and the illusion of progress // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 10246 LNAI, 2017, pp. 715-725. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59060-8\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59060-8_64)
5. Bifet A., Gavalda R. Learning from time-changing data with adaptive windowing // Proceedings of the 7th SIAM International Conference on Data Mining, 2007, pp. 443-448. <https://doi.org/10.1137/1.9781611972771.42>
6. Brzeziński D., Stefanowski J. Accuracy updated ensemble for data streams with concept drift // International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 6679 LNAI (PART 2), 2011, pp. 155-163. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21222-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21222-2_19)
7. Bu L., Alippi C., Zhao D. A pdf-Free Change Detection Test Based on Density Difference Estimation // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, no. 29(2), pp. 324-334. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2619909>
8. Bu L., Zhao D., Alippi C. An Incremental Change Detection Test Based on Density Difference Estimation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, no. 47(10), pp. 2714-272. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2682502>
9. Cabral D.R. de L., Barros R.S.M. de. Concept drift detection based on Fisher's Exact test // Information Sciences, 2018, pp. 442-443, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.02.054>
10. Costa A.F.J., Albuquerque R.A.S., Santos E.M. Dos. A Drift Detection Method Based on Active Learning // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2018-July. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489364>
11. Dasu T., Krishnan S., Venkatasubramanian S., Yi K. An information-theoretic approach to detecting changes in multi-dimensional data streams // In Proc. Symp. on the Interface of Statistics, Computing Science, and Applications, 2006.
12. de Mello R.F., Vaz Y., Grossi C.H., Bifet A. On learning guarantees to unsupervised concept drift detection on data streams // Expert Systems with Applications, 2019, no. 117, pp. 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.054>
13. Ditzler G., Polikar R. An ensemble based incremental learning framework for concept drift and class imbalance // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2010. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596764>
14. Ditzler G., Polikar R. Incremental Learning of Concept Drift from Streaming Imbalanced Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2013, no. 25(10), pp. 2283-2301. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2012.136>
15. Ditzler G., Polikar R. An ensemble based incremental learning framework for concept drift and class imbalance // The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2010, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596764>
16. Ditzler G., Polikar R. Incremental learning of concept drift from streaming imbalanced data Ditzler, 2013.
17. Polikar R. Incremental learning of concept drift from streaming imbalanced data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2013, no. 25(10), pp. 2283-2301. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2012.136>
18. Ditzler G., Roveri M., Alippi C., Polikar R. Learning in Nonstationary Environments: A Survey // IEEE Computational Intelligence Magazine, 2015, no. 10(4), pp. 12-25. <https://doi.org/10.1109/MCI.2015.2471196>

19. Domingos P., Hulten G. Mining high-speed data streams // Proceeding of the Sixth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2000, pp. 71-80. <https://doi.org/10.1145/347090.347107>
20. Dos Reis D., Flach P., Matwin S., Batista G. Fast unsupervised online drift detection using incremental kolmogorov-smirnov test // Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August, 2016, pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939836>
21. Dos Reis D., Flach P., Matwin S., Batista G. Fast unsupervised online drift detection using incremental kolmogorov-smirnov test // Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August, 2016, pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939836>
22. Fan W. Systematic data selection to mine concept-drifting data streams // KDD-2004 - Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2004, pp. 128-137. <https://doi.org/10.1145/1014052.1014069>
23. Gama J., Medas P., Castillo G., Rodrigues P. Learning with drift detection // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2004, no. 3171, pp. 286-295. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-28645-5\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-540-28645-5_29)
24. Gama J., Zliobaite I., Bifet A., Pechenizkiy M., Bouchachia A. A survey on concept drift adaptation // ACM Computing Surveys, 2014, no. 46(4). <https://doi.org/10.1145/2523813>
25. Gemaque R.N., Costa A.F.J., Giusti R., dos Santos E.M. An overview of unsupervised drift detection methods // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2020, no. 10(6). <https://doi.org/10.1002/widm.1381>
26. Goodfellow Y.B. Deep Learning. MIT Press. 2016.
27. Gu F., Zhang G., Lu J., Lin C.T. Concept drift detection based on equal density estimation // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2016-Octob, 24-30. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727176>
28. Haque A., Khan L., Baron M. SAND: Semi-supervised adaptive novel class detection and classification over data stream // 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2016, pp. 1652-1658.
29. Haque A., Khan L., Baron M., Thuraisingham B., Aggarwal C. Efficient handling of concept drift and concept evolution over Stream Data // 2016 IEEE 32nd International Conference on Data Engineering, ICDE 2016, pp. 481-492. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2016.7498264>
30. Hinton G.E., Zemel R.S. Autoencoders, Minimum Description Length and Helmholtz freeEnergy // Advances in Neural Information Processing Systems, 1994, no. 6, pp. 3-10.
31. Hu H., Kantardzic M., Sethi T.S. No Free Lunch Theorem for concept drift detection in streaming data classification: A review //Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2020. Vol. 10, Issue 2.
32. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/widm.1327>
33. Hulten G., Spencer L., Domingos P. Mining time-changing data streams // Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2001, pp. 97-106. <https://doi.org/10.1145/502512.502529>
34. Iwashita A.S., Papa J.P. An Overview on Concept Drift Learning // IEEE Access, 2019, no. 7, pp. 1532-1547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886026>
35. Jaworski M., Duda P., Rutkowski L. On applying the Restricted Boltzmann Machine to active concept drift detection // 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings, 2018-Janua, 2018, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285409>
36. Jaworski M., Rutkowski L., Angelov P. Concept Drift Detection Using Autoencoders in Data StreamsProcessing // Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 12415 LNAI, 2020, pp. 124-133. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0_12)
37. Jaworski M., Rutkowski L., Angelov P., Artificial P. A.-I. C. on, & 2020, undefined. Concept Drift DetectionUsing Autoencoders in Data Streams Processing. Springer, 2020, pp. 124-133. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0_12)
38. Kelly M.G., Hand D.J., Adams N.M. The impact of changing populations on classifier performance // KDD'99: Proceedings of the Fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1999, pp. 367-371. <https://doi.org/10.1145/312129.312285>
39. Khamassi I., Sayed-Mouchaweh M., Hammami M., Ghédira K. Discussion and review on evolving data streams and concept drift adapting // Evolving Systems, 2018, no. 9(1). <https://doi.org/10.1007/s12530-016-9168-2>
40. Kifer D., Ben-David S., Gehrke J. Detecting Change in Data Streams // Proceedings 2004 VLDB Conference, 2004, pp. 180-191. <https://doi.org/10.1016/b978-012088469-8.50019-x>
41. Kim Y., Park C.H. An efficient concept drift detection method for streaming data under limited labeling // IEICE Transactions on Information and Systems, E100D(10), 2017, pp. 2537-2546. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7091>
42. Koh Y.S. CD-TDS: Change detection in transactional data streams for frequent pattern mining // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2016-Octob, 2016, pp. 1554-1561. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727383>
43. Koh Y.S. CD-TDS: Change detection in transactional data streams for frequent pattern mining. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2016-Octob, 2016, pp. 1554-1561. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727383>
44. Kolter J. Zico, Maloof M.A. Dynamic weighted majority: An ensemble method for drifting concepts // Journal of Machine Learning Research, 2007, no. 8, pp. 2755-2790.
45. Kolter Jeremy Z., Maloof M.A. Dynamic weighted majority: A new ensemble method for tracking concept drift // Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM, 2003, pp. 123-130. <https://doi.org/10.1109/icdm.2003.1250911>
46. Li B., Wang Y. jie, Yang D. sheng, Li Y. mou, Ma X. kong. FAAD: an unsupervised fast and accurate anomaly detection method for a multi-dimensional sequence over data stream // Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2019, no. 20(3), pp. 388-404. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1800038>
47. Liao J., Zhang J., Ng W.W.Y. Effects of different base classifiers to Learn++ family algorithms for concept drifting and imbalanced pattern classification problems // Proceedings - International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2016, no. 1, pp. 99-104. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2016.7860884>
48. Liu A., Lu J., Liu F., Zhang G. Accumulating regional density dissimilarity for concept drift detection in data streams // Pattern Recognition, 2018, no. 76, pp. 256-272. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.11.009>
49. Liu A., Song Y., Zhang G., Lu J. Regional concept drift detection and density synchronized drift adaptation // IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence, 0, 2017, pp. 2280-2286. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/317>
50. Liu G., Cheng H.R., Qin Z.G., Liu Q., Liu C.X. E-CVFDT: An improving CVFDT method for concept drift data stream // 2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2013, no. 1, pp. 315-318. <https://doi.org/10.1109/ICCASCAS.2013.6765241>
51. Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J., Zhang G. Learning under Concept Drift: A Review // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2019, no. 31(12), pp. 2346-2363. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2876857>
52. Lu N., Lu J., Zhang G., Lopez De Mantaras R. A concept drift-tolerant case-base editing technique // Artificial Intelligence, 2016, no. 230, pp. 108-133. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2015.09.009>
53. Lu N., Zhang G., Lu J. Concept drift detection via competence models // Artificial Intelligence, 2014, no. 209(1), pp. 11-28. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2014.01.001>
54. Lughofer E., Weigl E., Heidl W., Eitzinger C., Radauer T. Recognizing input space and target concept drifts in data streams with scarcely labeled and unlabelled instances // Information Sciences, 2016, pp. 355-356, 127-151. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.034>
55. Lughofer E., Weigl E., Heidl W., Eitzinger C., Radauer T. Recognizing input space and target concept drifts in data streams with scarcely labeled and unlabelled instances // Information Sciences, 2016, pp. 355-356, 127-151. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.034>
56. Maletzke Andre G., Dos Reis D.M., Batista G.E.A.P.A. Quantification in data streams: Initial results // Proceedings - 2017 Brazilian Conference on Intelligent Systems, BRACIS 2017, 2018-Janua, pp. 43-48. <https://doi.org/10.1109/BRACIS.2017.74>
57. Maletzke André G., dos Reis D.M., Batista, G.E.A.P.A. Combining instance selection and self-training to improve data stream quantification // Journal of the Brazilian Computer Society, 2018, no. 24(1). <https://doi.org/10.1186/s13173-018-0076-0>
58. Menon A.G., Gressel G. Concept Drift Detection in Phishing Using Autoencoders // Communications in Computer and Information Science, 2021, no. 1366, pp. 208-220. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0419-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0419-5_17)
59. Muhlbaier M.D., Polikar R. Multiple classifiers based incremental learning algorithm for learning in nonstationary environments // Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2007, no. 6, pp. 3618-3623. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2007.4370774>
60. Muhlbaier M.D., Topalis A., Polikar R. Learn++ .NC: Combining ensemble of classifiers with dynamically weighted consult-and-vote for efficient incremental learning of new classes // IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, no. 20(1), pp. 152-168. <https://doi.org/10.1109/TNN.2008.2008326>

61. Muhlbaier M., Topalis A., Polikar R. Learn++MT: A new approach to incremental learning // *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2004, no. 3077, pp. 52-61. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-25966-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-25966-4_5)
62. Mustafa A.M., Ayoade G., Al-Naami K., Khan L., Hamlen K.W., Thuraingham B., Araujo F. Unsupervised deep embedding for novel class detection over data stream // *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2017, 2018-Janua, 2017*, pp. 1830-1839. <https://doi.org/10.1109/BigData.2017.8258127>
63. Nick Street W., Kim Y.S. A streaming ensemble algorithm (SEA) for large-scale classification // *Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2001, pp. 377-382. <https://doi.org/10.1145/502512.502568>
64. Nishida K., Yamauchi K. Detecting concept drift using statistical testing // *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4755 LNAI, 2007, pp. 264-269. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75488-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75488-6_27)
65. Nishida K., Yamauchi K., Omori T. ACE: Adaptive classifiers-ensemble system for concept-drifting environments // *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, no. 3541, pp. 176-185. [https://doi.org/10.1007/11494683\\_18](https://doi.org/10.1007/11494683_18)
66. Oladele S. A Comprehensive Guide on How to Monitor Your Models in Production - neptune.ai // *Página Oficial Neptune AI*. 2021. <https://neptune.ai/blog/how-to-monitor-your-models-in-production-guide>
67. Online and Non-Parametric Drift Detection Methods Based on Hoeffding's Bounds. 2015.
68. Page E.S. Continuous Inspection Schemes // *Biometrika*, 1954, no. 41(1/2), p. 100. <https://doi.org/10.2307/2333009>
69. Pesaranghader A., Viktor H.L. Fast hoeffding drift detection method for evolving data streams // *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9852 LNAI, 2016, pp. 96-111. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_7)
70. Pesaranghader A., Viktor H.L., Paquet E. McDiarmid Drift Detection Methods for Evolving Data Streams // *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2018-July. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489260>
71. Pinagé F., dos Santos E.M., Gama J. A drift detection method based on dynamic classifier selection // *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2020, no. 34(1), pp. 50-74. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00656-w>
72. Polikar R., Udpa L., Udpa S.S., Honavar V. Learn++: An incremental learning algorithm for supervised neural networks // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 2001, no. 31(4), pp. 497-508. <https://doi.org/10.1109/5326.983933>
73. Qahtan A., Alharbi B., Wang S., Zhang X. A PCA-based change detection framework for multidimensional data streams // *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2015-August, 2015, pp. 935-944. <https://doi.org/10.1145/2783258.2783359>
74. Qahtan A., Alharbi B., Wang S., Zhang X. A PCA-based change detection framework for multidimensional data streams // *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2015-August, pp. 935-944. <https://doi.org/10.1145/2783258.2783359>
75. Richard O. Duda, Peter E. Hart D.G.S. *Pattern Classification* (2nd ed.). Wiley-Interscience. 2000.
76. Schelter S., Biessmann F., Januschowski T., Salinas D., Seufert S., Szarvas G. On Challenges in Machine Learning Model Management // *In Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering*, 2018, pp. 5-13. <http://sites.computer.org/debull/A18dec/p5.pdf>
77. Schlimmer J.C., Granger R.H. Incremental Learning from Noisy Data // *Machine Learning*, 1986, no. 1(3), pp. 317-354. <https://doi.org/10.1023/A:1022810614389>
78. Schröder T., Schulz M. Monitoring machine learning models: A categorization of challenges and methods // *In Data Science and Management*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.07.004>
79. Sethi T.S., Kantardzic M. Don't pay for validation: Detecting drifts from unlabeled data using Margin Density // *Procedia Computer Science*, 2015, no. 53(1), pp. 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.284>
80. Sethi T.S., Kantardzic M. On the reliable detection of concept drift from streaming unlabeled data. ArXiv. 2017.
81. Sethia T.S., Kantardzic M. Handling adversarial concept drift in streaming data. ArXiv. 2018.
82. Shao J., Ahmadi Z., Kramer S. Prototype-based learning on concept-drifting data streams // *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2014, pp. 412-421. <https://doi.org/10.1145/2623330.2623609>
83. Song X., Wu M., Jermaine C., Ranka S. Statistical change detection for multi-dimensional data // *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2007, pp. 667-676. <https://doi.org/10.1145/1281192.1281264>
84. Soppin S., Ramachandra M., Chandrashekar B.N. *Essentials of Deep Learning and AI: Experience Unsupervised Learning, Autoencoders, Feature Engineering, and Time Series Analysis with TensorFlow, Keras, and scikit-learn (English Edition)*. 2021.
85. Spinosa E.J., De Carvalho A.P.D.L.F., Gama J. OLINDDA: A cluster-based approach for detecting novelty and concept drift in data streams // *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, 2007, pp. 448-452. <https://doi.org/10.1145/1244002.1244107>
86. Wald A. *Sequential Analysis*. DOVER PUBLICATIONS, INC. 1973.
87. Wang Haixun, Fan W., Yu P.S., Han J. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers. 226. 2003. <https://doi.org/10.1145/956755.956778>
88. Wang Haixun, Fan W., Yu P.S., Han J. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers // *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2003, pp. 226-235. <https://doi.org/10.1145/956750.956778>
89. Wang Heng, Abraham Z. Concept drift detection for streaming data // *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2015-Sept. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280398>
90. Wang S., Minku L.L., Ghezzi D., Caltabiano D., Tino P., Yao X. Concept Drift Detection for Online Class Imbalance Learning // *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2013. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2013.6706768>
91. Wares S., Isaacs J., Elyan E. Data stream mining: methods and challenges for handling concept drift // *SNApplied Sciences*, 2019, no. 1(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1433-0>
92. Widmer G. Learning in the presence of concept drift and hidden contexts // *Machine Learning*, 1996, no. 23(1), pp. 69-101. <https://doi.org/10.1007/bf00116900>
93. Yong B.X., Fathy Y., Brintrup A. Bayesian Autoencoders for Drift Detection in Industrial Environments // *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 -Proceedings*, 2020, pp. 627-631. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138306>
94. Yong B.X., Fathy Y., Brintrup A. Bayesian Autoencoders for Drift Detection in Industrial Environments // *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 -Proceedings*, 2020, pp. 627-631. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138306>
95. Yu S., Abraham Z. Concept drift detection with hierarchical hypothesis testing // *Proceedings of the 17th SIAM International Conference on Data Mining, SDM 2017*, pp. 768-776. <https://doi.org/10.1137/1.9781611974973.86>
96. Zliobaite I., Bifet A., Pfahringer B., Holmes G. Active learning with drifting streaming data // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, no. 25(1), pp. 27-39. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2012.2236570>

# COMPARATIVE ANALYSIS OF DETECTING METHODS UNWANTED NETWORK APPLICATIONS IN STREAMING MODE TO ENSURE INFORMATION SECURITY

OLEG I. SHELUHIN

Moscow, Russia, sheluhin@mail.ru

ANNA V. VANYUSHINA

Moscow, Russia

## ABSTRACT

**Introduction.** The introduction of machine learning methods allows automatic classification, analysis and filtering of malicious and unwanted mobile applications of network traffic, which may pose a threat to the integrity or availability of data, and unwanted ones - a threat to confidentiality. Since the characteristics of such data change over time, this creates problems for accurately predicting classification models. The phenomenon when the characteristics and distribution of the data change, which leads to the need to update the model, is called "concept drift", and the adaptation of the model to new changes is called "concept drift adaptation". In such non-stationary environments, pre-trained machine learning models quickly become outdated and need to be continuously updated, leading to the need to detect

**KEYWORDS:** *unwanted applications, streaming mode, drift of the concept, detection methods, statistical methods, reference window, batch methods, unsupervised methods, streaming mode.*

concept drift. Given the non-stationary nature of the data, concept drift detection and adaptation is an important component of machine learning solutions that operate on data streams to maintain their integrity, validity, and confidence levels. **Results:** To solve such problems, methods based on mathematical statistics and machine learning technologies are now widely used, with the help of which even unknown malicious applications can be detected with a certain degree of probability. Based on a systematic review of the literature, the main groups of recent scientific publications on conceptual drift detectors are presented. Controlled (statistical, window and ensemble), semi-controlled, uncontrolled, ensemble methods for detecting concept drift are considered. The features of online drift detection based on windowing and batch processing are analyzed. A taxonomy of modern approaches to uncontrolled concept drift is proposed.

## REFERENCES

1. Baena-Garcia M., del Campo-Avila J., Fidalgo R., Bifet A., Gavalda R., Morales-Bueno R. Early Drift Detection Method. *4th ECML PKDD International Workshop on Knowledge Discovery from Data Streams*, 2006, no. 6, pp. 77-86. <https://doi.org/10.1.1.61.6101>
2. Barros R.S.M., Cabral D.R.L., Goncalves P.M., Santos S.G.T.C. RDDM: Reactive drift detection method. *Expert Systems with Applications*, 2017, no. 90, pp. 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.023>
3. Bashir S.A., Petrovski A., Doolan D. A framework for unsupervised change detection in activity recognition. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 2017, no. 13(2), pp. 157-175. <https://doi.org/10.1108/IJPC-03-2017-0027>
4. Bifet A. Classifier concept drift detection and the illusion of progress. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10246 LNAI, 2017, pp. 715-725. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59060-8\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59060-8_64)
5. Bifet A., Gavalda R. Learning from time-changing data with adaptive windowing. *Proceedings of the 7th SIAM International Conference on Data Mining*, 2007, pp. 443-448. <https://doi.org/10.1137/1.9781611972771.42>
6. Brzezinski D., Stefanowski J. Accuracy updated ensemble for data streams with concept drift. *International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, 6679 LNAI (PART 2), 2011, pp. 155-163. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21222-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21222-2_19)
7. Bu L., Alippi C., Zhao D. A pdf-Free Change Detection Test Based on Density Difference Estimation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, no. 29(2), pp. 324-334. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2619909>
8. Bu L., Zhao D., Alippi C. An Incremental Change Detection Test Based on Density Difference Estimation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, no. 47(10), pp. 2714-272. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2682502>
9. Cabral D.R. de L., Barros R.S.M. de. Concept drift detection based on Fisher's Exact test. *Information Sciences*, 2018, pp. 442-443, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.02.054>
10. Costa A.F.J., Albuquerque R.A.S., Santos E.M. Dos. A Drift Detection Method Based on Active Learning. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2018-July. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489364>
11. D11. Dasu T., Krishnan S., Venkatasubramanian S., Yi K. An information-theoretic approach to detecting changes in multi-dimensional data streams. *Proc. Symp. on the Interface of Statistics, Computing Science, and Applications*, 2006.
12. de Mello R.F., Vaz Y., Grossi C.H., Bifet A. On learning guarantees to unsupervised concept drift detection on data streams. *Expert Systems with Applications*, 2019, no. 117, pp. 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.054>
13. Ditzler G., Polikar R. An ensemble based incremental learning framework for concept drift and class imbalance. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2010. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596764>
14. Ditzler G., Polikar R. Incremental Learning of Concept Drift from Streaming Imbalanced Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2013, no. 25(10), pp. 2283-2301. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2012.136>
15. Ditzler G., Polikar R. An ensemble based incremental learning framework for concept drift and class imbalance. *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2010, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2010.5596764>
16. Ditzler G., Polikar R. Incremental learning of concept drift from streaming imbalanced data. *Ditzler*, 2013.
17. Polikar R. Incremental learning of concept drift from streaming imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2013, no. 25(10), pp. 2283-2301. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2012.136>
18. Ditzler G., Roveri M., Alippi C., Polikar R. Learning in Nonstationary Environments: A Survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2015, no. 10(4), pp. 12-25. <https://doi.org/10.1109/MCI.2015.2471196>
19. Domingos P., Hulten G. Mining high-speed data streams. *Proceeding of the Sixth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2000, pp. 71-80. <https://doi.org/10.1145/347090.347107>
20. Dos Reis D., Flach P., Matwin S., Batista G. Fast unsupervised online drift detection using incremental kolmogorov-smirnov test. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-August, 2016, pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939836>
21. Dos Reis D., Flach P., Matwin S., Batista G. Fast unsupervised online drift detection using incremental kolmogorov-smirnov test.

*Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-August, 2016, pp. 1545-1554. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939836>

22. Fan W. Systematic data selection to mine concept-drifting data streams. *KDD-2004 – Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2004, pp. 128-137. <https://doi.org/10.1145/1014052.1014069>

23. Gama J., Medas P., Castillo G., Rodrigues P. Learning with drift detection. *I*, 2004, no. 3171, pp. 286-295. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-28645-5\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-540-28645-5_29)

24. Gama J., Zliobaite I., Bifet A., Pechenizkiy M., Bouchachia A. A survey on concept drift adaptation. *ACM Computing Surveys*, 2014, no. 46(4). <https://doi.org/10.1145/2523813>

25. Gemaque R.N., Costa A.F.J., Giusti R., dos Santos E.M. An overview of unsupervised drift detection methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2020, no. 10(6). <https://doi.org/10.1002/widm.1381>

26. Goodfellow Y.B. Deep Learning. MIT Press. 2016.

27. Gu F., Zhang G., Lu J., Lin C.T. Concept drift detection based on equal density estimation. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2016-Octob, 24-30. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727176>

28. Haque A., Khan L., Baron M. SAND: Semi-supervised adaptive novel class detection and classification over data stream. *30th AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI*. 2016, pp. 1652-1658.

29. Haque A., Khan L., Baron M., Thuraisingham B., Aggarwal C. Efficient handling of concept drift and concept evolution over Stream Data. *2016 IEEE 32nd International Conference on Data Engineering, ICDE 2016*, pp. 481-492. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2016.7498264>

30. Hinton G.E., Zemel R.S. Autoencoders, Minimum Description Length and Helmholtz freeEnergy. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1994, no. 6, pp. 3-10.

31. Hu H., Kantardzic M., Sethi T.S. No Free Lunch Theorem for concept drift detection in streaming data classification: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2020. Vol. 10, Issue 2.

32. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/widm.1327>

33. Hulten G., Spencer L., Domingos P. Mining time-changing data streams. *Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2001, pp. 97-106. <https://doi.org/10.1145/502512.502529>

34. Iwashita A.S., Papa J.P. An Overview on Concept Drift Learning. *IEEE Access*, 2019, no. 7, pp. 1532-1547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886026>

35. Jaworski M., Duda P., Rutkowski L. On applying the Restricted Boltzmann Machine to active concept drift detection. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings*, 2018-Janua, 2018, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285409>

36. Jaworski M., Rutkowski L., Angelov P. Concept Drift Detection Using Autoencoders in Data StreamsProcessing. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12415 LNAI, 2020, pp. 124-133. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0_12)

37. Jaworski M., Rutkowski L., Angelov P., Artificial P. A.-I. C. on, & 2020, undefined. *Concept Drift DetectionUsing Autoencoders in Data Streams Processing*. Springer, 2020, pp. 124-133. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61401-0_12)

38. Kelly M.G., Hand D.J., Adams N.M. The impact of changing populations on classifier performance. *KDD'99: Proceedings of the Fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1999, pp. 367-371. <https://doi.org/10.1145/312129.312285>

39. Khamassi I., Sayed-Mouchaweh M., Hammami M., Ghedira K. Discussion and review on evolving data streams and concept drift adapting. *Evolving Systems*, 2018, no. 9(1). <https://doi.org/10.1007/s12530-016-9168-2>

40. Kifer D., Ben-David S., Gehrke J. Detecting Change in Data Streams. *Proceedings 2004 VLDB Conference*, 2004, pp. 180-191. <https://doi.org/10.1016/b978-012088469-8.50019-x>

41. Kim Y., Park C.H. An efficient concept drift detection method for

streaming data under limited labeling. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E100D(10), 2017, pp. 2537-2546. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7091>

42. Koh Y.S. CD-TDS: Change detection in transactional data streams for frequent pattern mining. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2016-Octob, 2016, pp. 1554-1561. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727383>

43. Koh Y.S. CD-TDS: Change detection in transactional data streams for frequent pattern mining. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2016-Octob, 2016, pp. 1554-1561. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727383>

44. Kolter J. Zico, Maloof M.A. Dynamic weighted majority: An ensemble method for drifting concepts. *Journal of Machine Learning Research*, 2007, no. 8, pp. 2755-2790.

45. Kolter Jeremy Z., Maloof M.A. Dynamic weighted majority: A new ensemble method for tracking concept drift. *Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM*, 2003, pp. 123-130. <https://doi.org/10.1109/icdm.2003.1250911>

46. Li B., Wang Y. jie, Yang D. sheng, Li Y. mou, Ma X. kong. FAAD: an unsupervised fast and accurate anomaly detection method for a multi-dimensional sequence over data stream. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 2019, no. 20(3), pp. 388-404. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1800038>

47. Liao J., Zhang J., Ng W.W.Y. Effects of different base classifiers to Learn++ family algorithms for concept drifting and imbalanced pattern classification problems. *Proceedings - International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2016, no. 1, pp. 99-104. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2016.7860884>

48. Liu A., Lu J., Liu F., Zhang G. Accumulating regional density dissimilarity for concept drift detection in data streams. *Pattern Recognition*, 2018, no. 76, pp. 256-272. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.11.009>

49. Liu A., Song Y., Zhang G., Lu J. Regional concept drift detection and density synchronized drift adaptation. *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 0, 2017, pp. 2280-2286. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/317>

50. Liu G., Cheng H.R., Qin Z.G., Liu Q., Liu C.X. E-CVFD: An improving CVFDT method for concept drift data stream. *2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2013*, no. 1, pp. 315-318. <https://doi.org/10.1109/ICCCAS.2013.6765241>

51. Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J., Zhang G. Learning under Concept Drift: A Review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2019, no. 31(12), pp. 2346-2363. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2876857>

52. Lu N., Lu J., Zhang G., Lopez De Mantaras R. A concept drift-tolerant case-base editing technique. *Artificial Intelligence*, 2016, no. 230, pp. 108-133. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2015.09.009>

53. Lu N., Zhang G., Lu J. Concept drift detection via competence models. *Artificial Intelligence*, 2014, no. 209(1), pp. 11-28. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2014.01.001>

54. Lughofer E., Weigl E., Heidl W., Eitzinger C., Radauer T. Recognizing input space and target concept drifts in data streams with scarcely labeled and unlabelled instances. *Information Sciences*, 2016, pp. 355-356, 127-151. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.034>

55. Lughofer E., Weigl E., Heidl W., Eitzinger C., Radauer T. Recognizing input space and target concept drifts in data streams with scarcely labeled and unlabelled instances. *Information Sciences*, 2016, pp. 355-356, 127-151. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.034>

56. Maletzke Andre G., Dos Reis D.M., Batista G.E.A.P.A. Quantification in data streams: Initial results. *Proceedings - 2017 Brazilian Conference on Intelligent Systems, BRACIS 2017*, 2018-Janua, pp. 43-48. <https://doi.org/10.1109/BRACIS.2017.74>

57. Maletzke Andre G., dos Reis D.M., Batista, G.E.A.P.A. Combining instance selection and self-training to improve data stream quantification. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 2018, no. 24(1). <https://doi.org/10.1186/s13173-018-0076-0>

58. Menon A.G., Gressel G. Concept Drift Detection in Phishing Using Autoencoders. *Communications in Computer and Information Science*, 2021, no. 1366, pp. 208-220. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0419-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0419-5_17)

59. Muhlbaier M.D., Polikar R. Multiple classifiers based incremental

learning algorithm for learning in nonstationary environments. *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMMLC 2007*, no. 6, pp. 3618–3623. <https://doi.org/10.1109/ICMMLC.2007.4370774>

60. Muhlbaiier M.D., Topalis A., Polikar R. Learn++. NC: Combining ensemble of classifiers with dynamically weighted consult-and-vote for efficient incremental learning of new classes. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, no. 20(1), pp. 152–168. <https://doi.org/10.1109/TNN.2008.2008326>

61. Muhlbaiier M., Topalis A., Polikar R. Learn++.MT: A new approach to incremental learning. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2004, no. 3077, pp. 52–61. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-25966-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-25966-4_5)

62. Mustafa A.M., Ayoade G., Al-Naami K., Khan L., Hamlen K.W., Thuraisingham B., Araujo F. Unsupervised deep embedding for novel class detection over data stream. *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2017*, 2018-Janua, 2017, pp. 1830–1839. <https://doi.org/10.1109/BigData.2017.8258127>

63. Nick Street W., Kim Y.S. A streaming ensemble algorithm (SEA) for large-scale classification. *Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2001, pp. 377–382. <https://doi.org/10.1145/502512.502568>

64. Nishida K., Yamauchi K. Detecting concept drift using statistical testing. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4755 LNAI, 2007, pp. 264–269. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-75488-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75488-6_27)

65. Nishida K., Yamauchi K., Omori T. ACE: Adaptive classifiers-ensemble system for concept-drifting environments. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, no. 3541, pp. 176–185. [https://doi.org/10.1007/11494683\\_18](https://doi.org/10.1007/11494683_18)

66. Oladele S. A Comprehensive Guide on How to Monitor Your Models in Production – neptune.ai. Pagina Oficial Neptune AI. 2021. <https://neptune.ai/blog/how-to-monitor-your-models-in-production-guide>

67. Online and Non-Parametric Drift Detection Methods Based on Hoeffding's Bounds. 2015.

68. Page E.S. Continuous Inspection Schemes. *Biometrika*, 1954, no. 41(1/2), p. 100. <https://doi.org/10.2307/2333009>

69. Pesaranghader A., Viktor H.L. Fast hoeffding drift detection method for evolving data streams. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9852 LNAI, 2016, pp. 96–111. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_7)

70. Pesaranghader A., Viktor H.L., Paquet E. McDiarmid Drift Detection Methods for Evolving Data Streams. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2018-July. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489260>

71. Pinage F., dos Santos E.M., Gama J. A drift detection method based on dynamic classifier selection. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2020, no. 34(1), pp. 50–74. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00656-w>

72. Polikar R., Udpa L., Udpa S.S., Honavar V. Learn++: An incremental learning algorithm for supervised neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 2001, no. 31(4), pp. 497–508. <https://doi.org/10.1109/5326.983933>

73. Qahtan A., Alharbi B., Wang S., Zhang X. A PCA-based change detection framework for multidimensional data streams. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2015-August, 2015, pp. 935–944. <https://doi.org/10.1145/2783258.2783359>

74. Qahtan A., Alharbi B., Wang S., Zhang X. A PCA-based change detection framework for multidimensional data streams. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2015-August, pp. 935–944. <https://doi.org/10.1145/2783258.2783359>

75. Richard O. Duda, Peter E. Hart D.G.S. Pattern Classification (2nd ed.). Wiley-Interscience. 2000.

76. Schelter S., Biessmann F., Januschowski T., Salinas D., Seufert S., Szarvas G. On Challenges in Machine Learning Model Management. *Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering*, 2018, pp. 5–13. <http://sites.computer.org/debull/A18dec/p5.pdf>

77. Schlimmer J.C., Granger R.H. Incremental Learning from Noisy Data. *Machine Learning*, 1986, no. 1(3), pp. 317–354. <https://doi.org/10.1023/A:1022810614389>

78. Schroder T., Schulz M. Monitoring machine learning models: A categorization of challenges and methods. *Data Science and Management*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.07.004>

79. Sethi T.S., Kantardzic M. Don't pay for validation: Detecting drifts from unlabeled data using Margin Density. *Procedia Computer Science*, 2015, no. 53(1), pp. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.284>

80. Sethi T.S., Kantardzic M. On the reliable detection of concept drift from streaming unlabeled data. ArXiv. 2017.

81. Sethia T.S., Kantardzic M. Handling adversarial concept drift in streaming data. ArXiv. 2018.

82. Shao J., Ahmadi Z., Kramer S. Prototype-based learning on concept-drifting data streams. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2014, pp. 412–421. <https://doi.org/10.1145/2623330.2623609>

83. Song X., Wu M., Jermaine C., Ranka S. Statistical change detection for multi-dimensional data. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2007, pp. 667–676. <https://doi.org/10.1145/1281192.1281264>

84. Soppin S., Ramachandra M., Chandrashekar B.N. Essentials of Deep Learning and AI: Experience Unsupervised Learning, Autoencoders, Feature Engineering, and Time Series Analysis with TensorFlow, Keras, and scikit-learn (English Edition). 2021.

85. Spinosa E.J., De Carvalho A.P.D.L.F., Gama J. OLINDDA: A cluster-based approach for detecting novelty and concept drift in data streams. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, 2007, pp. 448–452. <https://doi.org/10.1145/1244002.1244107>

86. Wald A. Sequential Analysis. DOVER PUBLICATIONS, INC. 1973.

87. Wang Haixun, Fan W., Yu P S., Han J. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers. 226. 2003. <https://doi.org/10.1145/956755.956778>

88. Wang Haixun, Fan W., Yu P.S., Han J. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2003, pp. 226–235. <https://doi.org/10.1145/956750.956778>

89. Wang Heng, Abraham Z. Concept drift detection for streaming data. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2015-Septe. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280398>

90. Wang S., Minku L.L., Ghezzi D., Caltabiano D., Tino P., Yao X. Concept Drift Detection for Online Class Imbalance Learning. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2013. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2013.6706768>

91. Wares S., Isaacs J., Elyan E. Data stream mining: methods and challenges for handling concept drift. *SNApplied Sciences*, 2019, no. 1(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1433-0>

92. Widmer G. Learning in the presence of concept drift and hidden contexts. *Machine Learning*, 1996, no. 23(1), pp. 69–101. <https://doi.org/10.1007/bf00116900>

93. Yong B.X., Fathy Y., Brintup A. Bayesian. Autoencoders for Drift Detection in Industrial Environments. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 -Proceedings*, 2020, pp. 627–631. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138306>

94. Yong B.X., Fathy Y., Brintup A. Bayesian. Autoencoders for Drift Detection in Industrial Environments. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 -Proceedings*, 2020, pp. 627–631. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138306>

95. Yu S., Abraham Z. Concept drift detection with hierarchical hypothesis testing. *Proceedings of the 17th SIAM International Conference on Data Mining, SDM 2017*, pp. 768–776. <https://doi.org/10.1137/1.9781611974973.86>

96. Zliobaite I., Bifet A., Pfahringer B., Holmes G. Active learning with drifting streaming data. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, no. 25(1), pp. 27–39. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2012.2236570>