



# КОНЦЕПЦИЯ ПРОТОКОЛА МНОГОАДРЕСНОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЕТЕВОГО КОДИРОВАНИЯ

**С. С. Владимиров\*, А. И. Фомин**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: [vladimirov.opds@gmail.com](mailto:vladimirov.opds@gmail.com)

**Аннотация—Предмет исследования.** Статья представляет концепцию сеансового протокола многоадресной передачи на основе метода сетевого кодирования. **Метод.** Разработка протокола передачи данных на основе анализа существующих принципов и моделей сетевого кодирования. **Основные результаты.** Предложен протокол многоадресной передачи NCDP, рассчитанный на работу поверх датаграммного транспортного протокола. Разработана базовая структура заголовка пакета NCDP с учетом вариативности применяемых совместно с ним протоколов. **Практическая значимость.** Предлагаемый протокол предназначен для использования в системах доставки контента, основанных на многоадресной передаче данных от нескольких источников.

**Ключевые слова**—многоадресная передача, сетевой протокол, сетевое кодирование.

## Информация о статье

УДК 004.7

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 01.03.2021, принята к печати 24.03.2021.

**Ссылка для цитирования:** Владимиров С. С., Фомин А. И. Концепция протокола многоадресной передачи на основе метода сетевого кодирования // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 1. С. 26–36. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-26-36.



## THE CONCEPT OF MULTICAST PROTOCOL BASED ON NETWORK CODING

**S. Vladimirov\*, A. Fomin**

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\*Corresponding author: [vladimirov.opds@gmail.com](mailto:vladimirov.opds@gmail.com)

**Abstract—Research subject.** The paper presents the concept of a multicast session protocol based on the network coding method. **Method.** Development of a data transfer protocol based on the analysis of existing principles and models of network coding. **Core results.** The proposed NCDP multicast protocol is designed to work over a datagram transport protocol. The basic structure of the NCDP packet header has been developed, taking into account the variability of the protocols used in conjunction with NCDP. **Practical relevance.** The proposed protocol is intended for use in content delivery systems based on multicast data transmission from several sources.

**Keywords**—multicast, network protocol, network coding.

### Article info

Article in Russian.

Received 01.03.2021, accepted 24.03.2021.

**For citation:** Vladimirov S., Fomin A.: The concept of multicast protocol based on network coding // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 1. pp. 26–36 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-1-26-36.



## Введение

Многоадресная (или групповая) передача данных находит широкое применение в современных сетях передачи данных для управления работой сети и для предоставления различных услуг абонентам. Характерными примерами служб, использующих групповые рассылки являются сервисы интернет-радио, видеоконференцсвязь, видео по запросу и другие сети и системы доставки контента [1, 2, 3]. Важным достоинством многоадресной передачи является то, что она позволяет сокращать объем трафика, передаваемого по сетям, как показано в примере на рис. 1.

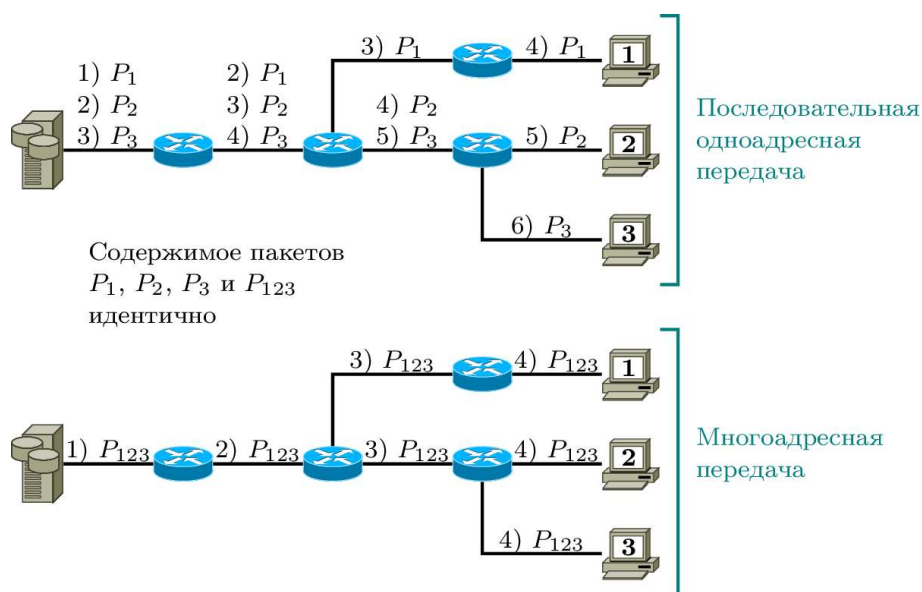


Рис. 1. Пример многоадресной передачи в сравнении с последовательной одноадресной передачей

В рассмотренном на рис. 1 примере 3 компьютера-адресата должны получить от источника одну и ту же информацию. При последовательной одноадресной передаче источник один за другим отправляет три отдельных пакета  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ , которые маршрутизируются независимо и в итоге достигают получателей за разное время – последний адресат 3 получает свой пакет  $P_3$  условно через 6 шагов после начала передачи, как показано на рисунке. При многоадресной передаче источник отправляет один пакет  $P_{123}$  сразу группе адресатов (1, 2, 3). В итоге каждый адресат получает пакет за одно и то же время, равное условные 4 шага от начала передачи.

С появлением новых услуг, предоставляемых абонентам, и развитием классических услуг, повышаются требования к системам доставки контента и передачи данных. В частности, одним из важных требований является уменьшение задержки доставки пакетов данных пользователю [4, 5, 6]. Например, для ряда перспективных технологий, таких как системы тактильного интернета, требуется круговая задержка, не превышающая  $1 \text{ мс}^1$  [4, 6]. Но с ростом числа и качества

<sup>1</sup> The Tactile Internet. Technology Watch report. Geneva : ITU-T, 2014. 24 p.



услуг растут и число абонентов, и количество источников услуги, что в итоге ведет к значительному росту передаваемого по сети трафика и, соответственно, увеличению задержек передачи, вызванных необходимостью обработки и маршрутизации трафика.

Одним из подходов, предлагаемых для решения данного противоречия является применение технологии сетевого кодирования, предложенной в 2000 году [7, 8]. Она позволяет в ряде случаев дополнительно уменьшить объем передаваемого по сети трафика многоадресных рассылок за счет передачи не самих пакетов, а их линейных комбинаций. Классический пример работы многоадресной системы с сетевым кодированием, показан на рис. 2 [8, 9].

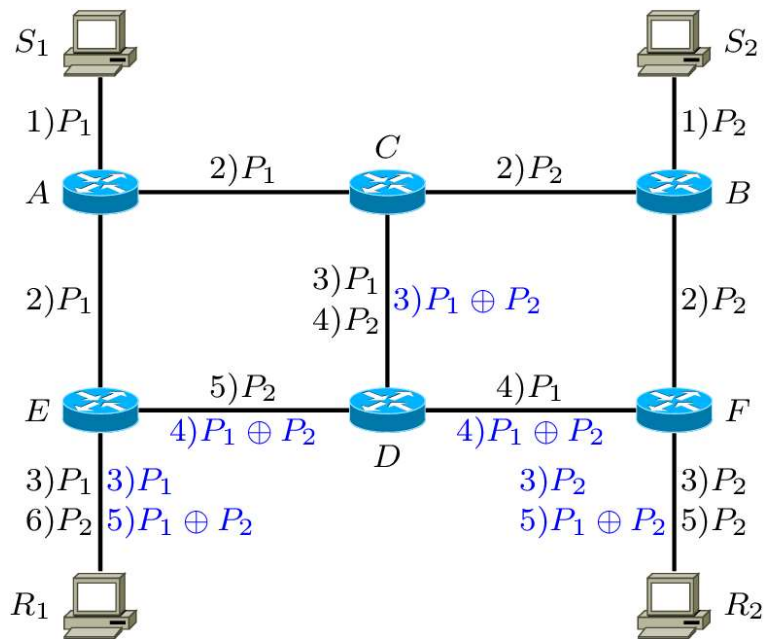


Рис. 2. Пример многоадресной передачи с сетевым кодированием

На рис. 2 представлена групповая передача пакетов данных от двух источников двум потребителям-адресатам. Синим показаны различия в передаче пакетов между простой многоадресной передачей и многоадресной передачей с сетевым кодированием. Как показано на рисунке, сетевое кодирование, основанное на простом сложении по модулю 2, позволяет уменьшить число передаваемых пакетов и за счет этого уменьшить задержку при доставке трафика потребителям.

Благодаря своим явным преимуществам, технология сетевого кодирования исследуется во всем мире [9, 10, 11, 12] и в различных направлениях: применение помехоустойчивого кодирования для защиты от ошибок [11, 13, 14, 15, 16, 17]; защита передаваемой информации [8]; разработка новых протоколов передачи, использующих сетевое кодирование [10, 12, 18, 19, 20]; особенности внедрения и применения сетевого кодирования для решения практических задач [21, 22, 23]. С точки зрения предоставления услуг пользователям сети Интернет, наиболее интересным направлением является разработка новых протоколов передачи, позволяющих внедрить принципы сетевого кодирования в существующие сети TCP/IP, совокупно образующие глобальную сеть Интернет.



## Обзор существующих протоколов, использующих методы сетевого кодирования

В настоящее время предложен целый ряд сетевых протоколов, базирующихся на принципах сетевого кодирования.

В 2006 году сводный коллектив ученых из нескольких американских университетов представил протокол многоадресной передачи CodeCast, предназначенный для использования в мобильных самоорганизующихся сетях [18]. При моделировании CodeCast обеспечил почти 100 % доставку пакетов при уменьшении служебного трафика до 50 %.

В 2009 году была опубликована работа другого междуниверситетского коллектива американских ученых, представившая проект по внедрению принципов сетевого кодирования в работу протокола TCP [19]. Предложенный ими протокол TCP/NC предназначен для формирования нового уровня сетевого кодирования между протоколом TCP транспортного уровня и сетевым протоколом IP согласно модели OSI. Это позволило минимизировать изменения, вносимые в сам протокол TCP, и использовать стандартные пакеты TCP.

В 2011 году румынские ученые из Технического университета Клуж-Напока представили сетевой протокол управления в условиях перегрузки, получивший название netCod [10]. Предложенный протокол работает поверх сетевого протокола IP и расширяет его функциональность.

В 2014 году группой ученых из федерального университета Минас-Жерайс в Бразилии был предложен протокол CodeDrip [20], предназначенный для распространения управляющих пакетов и пакетов данных по беспроводной сенсорной сети от центрального управляющего узла к оконечным узлам-датчикам. Благодаря использованию сетевого кодирования, предложенный протокол позволил уменьшить число передаваемых по сети пакетов и за счет этого уменьшить время их распространения по сети.

В 2019 году сводный коллектив исследователей из университета Цзяннань в Китае и Технологического института Джорджии представил протокол многопутевой маршрутизации NC-BMR для беспроводных сенсорных сетей [12]. Авторы продемонстрировали, что предложенный протокол обеспечивает лучшую производительность, а применение в нем сетевого кодирования улучшает надежность и эффективность передачи данных.

Активная работа по разработке транспортного протокола сетевого кодирования Tetrys ведется под эгидой IRTF в рамках рабочей группы NWCRG с 2014 года [24]. Протокол предназначен для передачи данных, чувствительных к задержкам и потерям, в сетях с потерями. Tetrys позволяет восстанавливать стирания с задержкой, не зависящей от круговой задержки передачи. Для кодирования пакетов в этом протоколе помимо сложения по модулю 2 над простым полем GF(2) используется сложение над расширенными полями Галуа GF(2<sup>4</sup>) и GF(2<sup>8</sup>).



## Структура предлагаемого протокола многоадресной передачи

Рассмотренные в обзоре протоколы предназначены для использования на сетевом и транспортном уровнях модели OSI и, зачастую, требуют вмешательства в стандартные протоколы передачи. С точки зрения простоты внедрения и тестирования более удобным является применение нового протокола сеансового уровня, реализующего прослойку между прикладным протоколом предоставления услуги и транспортным протоколом передачи данных, как показано на рис. 3. Предлагаемый протокол получил название NCDP – Network Coding Datagram Protocol – датаграммный протокол с сетевым кодированием. В качестве транспортного протокола используются датаграммные протоколы без установления соединения, такие как UDP и DCCP, поскольку сеансовая часть взаимодействия, в том числе управление соединением и нумерация пакетов, возлагается на протокол сетевого кодирования.



Рис. 3. Размещение предлагаемого протокола NCDP в рамках структуры сетевых моделей OSI и TCP/IP

Многоадресная передача в рамках сети реализуется на основе групповых адресов сетевого протокола IP. Для обеспечения записи адресатов в группы и уведомления маршрутизаторов о прохождении групповых пакетов предполагается использовать протоколы управления групповой передачей PIM, IGMP (для IPv4) и MLD (для IPv6).

Рассматривать работу протокола NCDP будем в рамках классической для сетевого кодирования архитектуры бабочка, представленной на рис. 4.

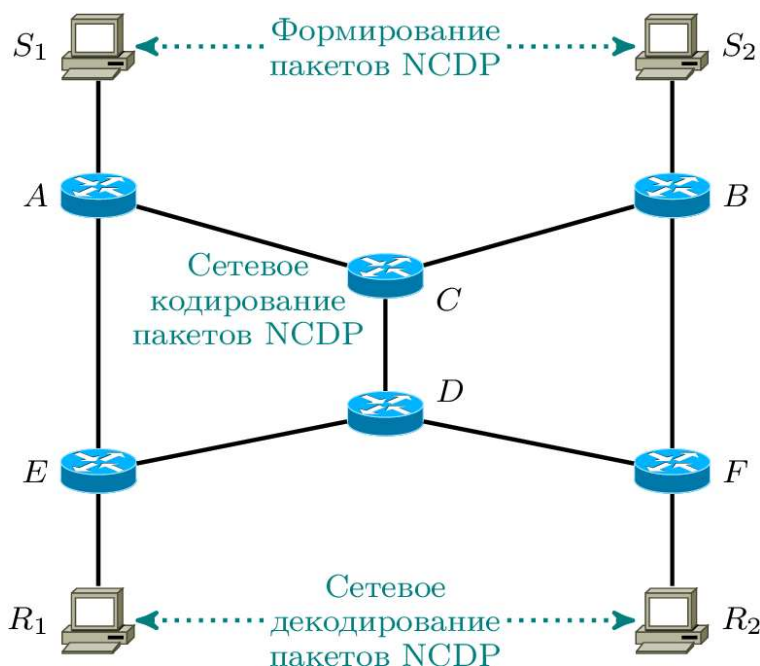


Рис. 4. Работа протокола NCDP в сетевой архитектуре бабочка

Для выполнения сетевого кодирования необходимо реализовать обработку протокола на трех элементах сети. На узлах-источниках  $S_1$  и  $S_2$  формируются исходные пакеты протокола NCDP. На маршрутизаторе C реализуется процедура сетевого кодирования проходящих через него пакетов NCDP. Узлы-адресаты  $R_1$  и  $R_2$  обеспечивают сетевое декодирование полученных пакетов NCDP. На всех прочих узлах сети обработка пакетов NCDP





не требуется. Они выполняют лишь маршрутизацию пакетов согласно групповым адресам.

Для работы протокола NCDP поверх транспортного протокола ему необходимо выделить номер порта. Поскольку протокол не стандартизован и находится в разработке, для тестирования его работы выделяется любой пользовательский порт, который свободен в сети, на которой производится тестирование.

Структура заголовка протокола NCDP показана на рис. 5. Заголовок состоит из двух частей: обязательной части, используемой для всех пакетов NCDP, и вариативной части, меняющейся в зависимости от типа пакета и значений флагов.

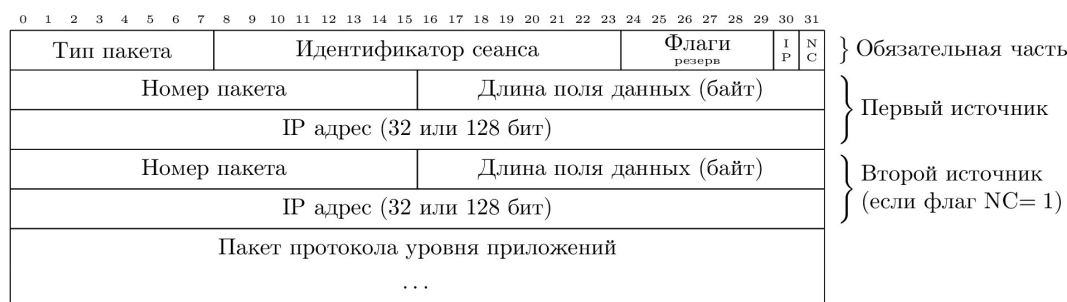


Рис. 5. Заголовок протокола NCDP

Обязательная часть содержит три поля: тип пакета (8 бит), идентификатор сеанса (16 бит) и флаги (8 бит). Тип пакета определяет его назначение. На данный момент предполагается использование пакета с типом 1 – пакет данных, идущих от источника до адресатов. Идентификатор сеанса служит для того, чтобы различать пакеты разных групповых рассылок друг от друга. Флаги указывают на конкретные настройки при передаче пакетов. На данный момент заданы два флага из 8 возможных. Флаг IP определяет версию сетевого протокола IP – IPv4 или IPv6. В зависимости от этого, поля адресов источника будут иметь различный размер. Флаг сетевого кодирования NC указывает на то, прошел ли пакет процедуру сетевого кодирования.

Вариативная часть для пакета данных содержит информацию об источниках. Для источника указывается номер пакета данных, длина поля данных и IP-адрес. Для пакета, сформированного на источнике и еще не прошедшего процедуру сетевого кодирования (флаг NC = 0), указывается только один источник. Когда пакеты проходят процедуру сетевого кодирования на узле C (см. рис. 4), флаг NC задается равным 1, и добавляется информация о втором источнике данных.

Нумерация пакетов производится с использованием тех же принципов, что и в протоколе TCP<sup>2</sup>. Номер пакета показывает позицию первого байта пакета от начала сеанса передачи данных. Пакеты нумеруются циклически по модулю  $2^{16}$ .

<sup>2</sup> RFC 793. Transmission Control Protocol [Электронный ресурс] // IETF Datatracker. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc793/> (дата обращения: 20.02.2021).



Поля длин пакетов данных уровня приложений необходимы, так как узлы-источники могут передавать пакеты разного размера. При сложении таких пакетов, данные уровня приложений меньшего пакета дополняются нулевыми октетами до размеров данных большего пакета. Поскольку для поля длины выделено 16 бит, всего в одном пакете может быть передано до 64 кбайт данных.

### Модельная сеть для тестирования протокола

Для тестирования протокола предполагается использовать модельную сеть согласно архитектуре, представленной на рис. 4.

Для построения модельной сети был выбран подход на основе виртуальной модельной сети, как сочетающий относительную простоту реализации, низкую стоимость разработки и внедрения, а также достаточную функциональную близость к реальной сети с точки зрения работы сетевых протоколов. Для виртуализации решено использовать открытый гипервизор VirtualBox от компании Oracle. В качестве операционной системы узлов виртуальной сети выбрана сетевая ОС OpenWrt, основанная на ядре GNU/Linux. OpenWrt требует для работы 64 МБ ОЗУ, следовательно, для одновременной работы всех 10 узлов модельной сети (см. рис. 4) потребуется менее 1 Гб оперативной памяти, что позволит запускать виртуальную модельную сеть на подавляющем большинстве современных персональных компьютеров. Важным плюсом OpenWrt и прочих систем на ядре GNU/Linux, является поддержка большинства существующих протоколов стека TCP/IP, в том числе предлагаемых для использования совместно с протоколом NCDP. Это позволит тестировать методы сетевого кодирования для различных сочетаний сетевых и транспортных протоколов.

### Заключение

В представленной работе авторами предложена концепция сеансового протокола сетевого кодирования NCDP. Рассмотрены возможная структура и логика работы протокола. Представлен формат заголовка протокола.

Предложена структура и способы организации модельной сети, предназначенной для тестирования разрабатываемого протокола.

В дальнейшем предполагается разработать программную реализацию протокола NCDP и провести его тестирование в рамках модельной сети.

### Литература

1. Diot C., Levine B. N., Lyles B., Kassem H., Balensiefen D. Deployment issues for the IP multicast service and architecture // *IEEE Network*. 2000. Vol. 14. No. 1. pp. 78–88. DOI 10.1109/65.819174.
2. Ganjam A., Zhang H. Internet Multicast Video Delivery // *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. No. 1. pp. 159–170. DOI 10.1109/JPROC.2004.839602.
3. Khaing N. N., Phyu T., Naing T. T. IP Multicast Content Delivery System for Large-Scale Applications // *6th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies*, Yangon, Myanmar. 2005. pp. 183–186. DOI 10.1109/APSITT.2005.203653.
4. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // *Электросвязь*. 2016. № 1. С. 44–46.
5. Кучерявый А. Е. Сети связи с ультра малыми задержками // *Труды научно-исследовательского института радио*. 2019. № 1. С. 69–74.
6. Кучерявый А. Е., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Парамонов А. И., Дунайцев Р. А., Пирмагомедов Р. Я., Бородин А. С., Владыко А. Г., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., Владимиров С. С.,





Гришин И. В. Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021–2024 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 3. С. 1–19. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.

7. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y.R., Yeung R.W. Network information flow // IEEE Transactions on Information Theory. 2000. Vol. 46. PP. 1204–1216.

8. Fragouli C., Soljanin E. Network Coding Fundamentals // Foundations and Trends in Networking. 2007. Vol. 2. No. 1. PP. 1–133. DOI: 10.1561/1300000003.

9. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И., Колыбельников А. И., Уривский А. В., Владимиров С. М., Григорьев А. А. Сетевое кодирование // Труды МФТИ. 2009. Том 1. № 2. С. 3–28.

10. Suta Z., Polgar Z., Catalin V., Varga M., Rus A., Dobrota V. Network Coding-Based Congestion Control at Network Layer: Protocol Design and Evaluation // International Journal of Computer Networks & Communications. 2011. Vol. 3. No. 1. pp. 119–138. DOI 10.5121/ijcnc.2011.3108.

11. Martinez-Penas U., Kschischang F.R. Reliable and Secure Multishot Network Coding using Linearized Reed-Solomon Codes // 2018 56th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). Monticello, IL, USA: IEEE, 2018. pp. 702–709. DOI 10.1109/ALLERTON.2018.8635644.

12. Li Z., Xu M., Liu T., Yu L. A Network Coding-Based Braided Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing. 2019. Vol. 2019. Art. 2757601. DOI 10.1155/2019/2757601.

13. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И., Боссерт М. Декодирование случайных сетевых кодов // Проблемы передачи информации. 2010. Т. 46. Вып. 4. С. 33–55.

14. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И. Ранговые подкоды в многокомпонентном сетевом кодировании // Проблемы передачи информации. 2013. Т. 49. Вып. 1. С. 46–60.

15. Biczok G., Chen Y., Kravlevska K., Overby H. Combining forward error correction and network coding in bufferless networks: A case study for optical packet switching // 2016 IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Yokohama: IEEE, 2016. pp. 61–68. DOI 10.1109/HPSR.2016.7525640.

16. Владимиров С. С. Коды Голда и коды максимальной длины в сетевом кодировании // Электросвязь. 2020. № 1. С. 61–66.

17. Владимиров С. С. 8-разрядные коды с прямой коррекцией ошибок в линейном сетевом кодировании // Электросвязь. 2020. № 7. С. 51–58. DOI 10.34832/ELSV.2020.8.7.007.

18. Park J., Gerla M., Lun D.S., Yi Y., Medard M. Codecast: a network-coding-based ad hoc multicast protocol // IEEE Wireless Communications. 2006. Vol. 13. No. 5. pp. 76–81. DOI 10.1109/WC-M.2006.250362.

19. Sundararajan J.K., Shah D., Medard M., Jakubczak S., Mitzenmacher M., Barros J. Network Coding Meets TCP: Theory and Implementation // Proceedings of the IEEE. 2011. Vol. 99. No. 3. pp. 490–512. DOI 10.1109/JPROC.2010.2093850.

20. Santos Ribeiro Junior N., Vieira M.A., Vieira L.F., Gnawali O. CodeDrip: Data Dissemination Protocol with Network Coding for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 11th European Conference on Wireless Sensor Networks - Volume 8354 (EWSN 2014). 2014. pp. 34–49. DOI 10.1007/978-3-319-04651-8\_3.

21. Halloush R., Liu H., Dong L., Wu M., Radha H. Hop-by-hop Content Distribution with Network Coding in Multihop Wireless Networks // Digital Communications and Networks. 2017. Vol. 3. Iss. 1. pp. 47–54.

22. Amanowicz M., Krygier J. On Applicability of Network Coding Technique for 6LoWPAN-based Sensor Networks // Sensors. 2018. Vol. 18 (6). pp. 1–20.

23. Кайсина И. А., Васильев Д. С., Абилов А. В. Сетевое кодирование в сетях FANET // Электросвязь. 2018. № 1. С. 64–68.

24. Detchart J., Lochin E., Lacan J., Roca V. Tetrys, an On-the-Fly Network Coding protocol [Электронный ресурс] // IETF Datatracker. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-detchart-nwcr-tetrys/> (дата обращения: 20.02.2021).

## References

1. Diot C., Levine B.N., Lyles B., Kassem H., Balensiefen D. Deployment issues for the IP multicast service and architecture // IEEE Network. 2000. Vol. 14. No. 1. pp. 78–88. DOI 10.1109/65.819174.



2. Ganjam A., Zhang H. Internet Multicast Video Delivery // *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. No. 1. pp. 159–170. DOI 10.1109/JPROC.2004.839602.
3. Khaing N. N., Phyu T., Naing T. T. IP Multicast Content Delivery System for Large-Scale Applications // *6th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies, Yangon, Myanmar*. 2005. PP. 183–186. DOI 10.1109/APSITT.2005.203653.
4. Koucheryavy A. E., Makolkina M. A., Kirichek R. V. Tactile internet. Ultra-low latency networks // *Electrosvyaz*. 2016. No. 1. pp. 44–46 (in Russian).
5. Koucheryavy A. Network delay communications networks // *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*. 2019. No. 1. pp. 69–74 (in Russian).
6. Koucheryavy A., Kirichek R., Makolkina M., Paramonov A., Dunaytsev R., Pirmagomedov R., Borodin A., Vladyko A., Muthanna A., Vybornova A., Vladimirov S., Grishin I. Novel Prospects of Scientific Research in the Field of Telecommunications Networks for the 2021–2024 Years // *Telecom IT*. 2020. Vol. 8. Iss. 3. pp. 1–19 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19.
7. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y.R., Yeung R.W. Network information flow // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2000. Vol. 46. pp. 1204–1216.
8. Fragouli C., Soljanin E. Network Coding Fundamentals // *Foundations and Trends in Networking*. 2007. Vol. 2. No. 1. pp. 1–133. DOI: 10.1561/13000000003.
9. Gabidulin E. M., Pilipchuk N. I., Kolybel'nikov A. I., Urivskij A. V., Vladimirov S. M., Grigor'ev A. A. Setevoe kodirovanie // *Proceedings of MIPT*. 2009. Vol. 1. No. 2. pp. 3–28 (in Russian).
10. Suta Z., Polgar Z., Catalin V., Varga M., Rus A., Dobrota V. Network Coding-Based Congestion Control at Network Layer: Protocol Design and Evaluation // *International Journal of Computer Networks & Communications*. 2011. Vol. 3. No. 1. pp. 119–138. DOI 10.5121/ijcnc.2011.3108.
11. Martinez-Penas U., Kschischang F.R. Reliable and Secure Multishot Network Coding using Linearized Reed-Solomon Codes // *2018 56th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*. Monticello, IL, USA: IEEE, 2018. pp. 702–709. DOI 10.1109/ALLERTON.2018.8635644.
12. Li Z., Xu M., Liu T., Yu L. A Network Coding-Based Braided Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019. Vol. 2019. Art. 2757601. DOI 10.1155/2019/2757601.
13. Gabidulin E. M., Pilipchuk N. I., Bossert M. Decoding of random network codes // *Problems of Information Transmission*. 2010. Vol. 46. Iss. 4. pp. 300–320. DOI 10.1134/S0032946010040034.
14. Gabidulin E. M., Pilipchuk N. I. Rank subcodes in multicomponent network coding // *Problems of Information Transmission*. 2013. Vol. 49, Iss. 1. pp. 46–60 (in Russian).
15. Biczok G., Chen Y., Kravevska K., Overby H. Combining forward error correction and network coding in bufferless networks: A case study for optical packet switching // *2016 IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. Yokohama: IEEE, 2016. pp. 61–68. DOI 10.1109/HPSR.2016.7525640.
16. Vladimirov S. S. Gold codes and maximum length codes in network coding // *Electrosvyaz*. 2020. No. 1. pp. 61–66 (in Russian).
17. Vladimirov S. S. 8-bit forward error correction codes in linear network coding // *Electrosvyaz*. 2020. No. 7. pp. 51–58 (in Russian). DOI 10.34832/ELSV.2020.8.7.007.
18. Park J., Gerla M., Lun D.S., Yi Y., Medard M. Codecast: a network-coding-based ad hoc multicast protocol // *IEEE Wireless Communications*. 2006. Vol. 13. No. 5. pp. 76–81. DOI 10.1109/WC-M.2006.250362.
19. Sundararajan J. K., Shah D., Medard M., Jakubczak S., Mitzenmacher M., Barros J. Network Coding Meets TCP: Theory and Implementation // *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. No. 3. pp. 490–512. DOI 10.1109/JPROC.2010.2093850.
20. Santos Ribeiro Junior N., Vieira M. A., Vieira L. F., Gnawali O. CodeDrip: Data Dissemination Protocol with Network Coding for Wireless Sensor Networks // *Proceedings of the 11th European Conference on Wireless Sensor Networks - Volume 8354 (EWSN 2014)*. 2014. pp. 34–49. DOI 10.1007/978-3-319-04651-8\_3.
21. Halloush R., Liu H., Dong L., Wu M., Radha H. Hop-by-hop Content Distribution with Network Coding in Multihop Wireless Networks // *Digital Communications and Networks*. 2017. Vol. 3. Iss. 1. pp. 47–54.
22. Amanowicz M., Krygier J. On Applicability of Network Coding Technique for 6LoWPAN-based Sensor Networks // *Sensors*. 2018. Vol. 18 (6). pp. 1–20.



23. Kaysina I. A., Vasiliev D. S., Abilov A. V. Network coding in FANET // *Electrosvyaz*. 2018. No. 1. pp. 64–68 (in Russian).

24. Detchart J., Lochin E., Lacan J., Roca V. Tetrys, an On-the-Fly Network Coding protocol [Electronic resource] // IETF Datatracker. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-detchart-nwcrg-tetrys/> (Accessed date: 20.02.2021).

**Владимиров Сергей Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф.

М. А. Бонч-Бруевича, [vladimirov.opds@gmail.com](mailto:vladimirov.opds@gmail.com)

**Vladimirov Sergey S.**

candidate of Engineering Sciences, docent, associate professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

[vladimirov.opds@gmail.com](mailto:vladimirov.opds@gmail.com)

**Фомин Артем Игоревич**

магистр Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф.

М. А. Бонч-Бруевича, [artem.fomin633@gmail.com](mailto:artem.fomin633@gmail.com)

**Fomin Artem I.**

undergraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

[artem.fomin633@gmail.com](mailto:artem.fomin633@gmail.com)