Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей

А.С.А. Мутханна, доцент кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ, к.т.н.; ammarexpress@gmail.com

УДК 621.391

DOI: ???

Аннотация. *Представлена архитектура сети, обеспечивающей поддержку приложений для беспилотного транспорта, требующих ультрамалых задержек. Предлагаемая архитектура использует технологии мобильных граничных вычислений MEC и программно-конфигурируемых сетей SDN для повышения общей надежности сети и ее масштабируемости в условиях высокой плотности трафика. Также рассмотрен метод кластеризации для устройств с поддержкой технологии Device-to-Device (D2D), позволяющий обеспечить покрытие сети в централизованно недоступных узлах. Результаты оценки с использованием различных сетевых сценариев показывают, что предложенная архитектура с поддержкой MEC/SDN по сравнению с базовой архитектурой обеспечивает прирост производительности сети на 74% с точки зрения блокировки сетевых задач.*

Ключевые слова: *кластеризация, D2D, MEC, SDN, беспилотные автомобили.*

ВВЕДЕНИЕ

Роль телекоммуникационных сетей в эволюции общества в целом продолжает увеличиваться. Телекоммуникационные сети пятого поколения, которые в настоящее время создаются, и сети последующих поколений [1] будут играть решающую роль в создании эффективной цифровой экономики. Однако требования к новым сетям очень сложны и нетривиальны. Существующие традиционные сети не могут удовлетворить этим требованиям, т.е. для планирования сетей связи пятого и последующих поколений необходимы новые подходы. В настоящее время основным направлением развития сетей связи является технология 5G [2, 3]. Первоначально сети 5G основывались на концепции интернета вещей, для которой требовалось создавать сети связи сверхвысокой плотности (1 млн устройств на 1 кв. км). Эта проблема недавно была осложнена концепцией тактильного интернета, которая потребовала уменьшения круговой задержки до 1 мс для передачи тактильных ощущений. Требования по ультрамалым задержкам относятся не только к тактильной информации, но также и к беспилотным автомобилям, приложениям дополненной реальности и т.д. Поэтому в настоящее время и появилась новая концепция сетей связи с ультрамалыми задержками.

Увеличение числа транспортных средств порождает серьезные проблемы, такие, например, как пробки на дорогах и нехватка мест для стоянки автомобилей [4]. Автодорожные сети возникли как решение многих современных транспортных проблем. Однако это привело к новым проблемам безопасности и надежности [5]. Эффективная связь – это ключевая особенность автомобильных сетей, которая позволяет средствам передвижения обмениваться информацией для достижения общих целей транспортной системы [6]. Поэтому современные транспортные средства часто имеют различные встроенные технологии связи и локализации, а также системы когнитивного управления, которые поддерживают автономную адаптацию к внешним условиям [7]. Текущие технологии беспроводной связи, сети широкополосного доступа и специальные сети, такие как специализированные автомобильные сети, могут использоваться для обеспечения среды связи и инфраструктуры для связи и координации деятельности транспортных средств [8, 9]. В таких сетях следует учитывать условия окружающей среды, поскольку от них зависят плотность узлов и модели потока транспортных средств. Новая архитектура сети для поддержки беспилотных автомобилей, основанная на технологиях мобильных граничных вычислений (Mobile Edge Computing, MEC) и программно-определяемых сетей (Software Defined Networks, SDN), предназначена для решения проблемы высокой плотности сетевого трафика и обеспечения масштабируемой и надежной сети связи для транспортных средств. В качестве одного из основных параметров будем использовать плотность движения, которая определяется как количество транспортных средств, занимающих указанную длину дороги в полосе движения. Она измеряется в числе транспортных средствах на один километр. Рассмотрим сначала проблемы планирования сети для беспилотных автомобилей.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы сфера беспилотных автомобилей привлекает все больше внимания. Крупные инвестиции вкладываются в разработку умных транспортных средств. Большие исследования в области беспилотных автомобилей проводят такие компании как Waymo, Uber, Tesla, Яндекс и др. У общества растет интерес к данному направлению. Разработчики работают над тем, чтобы автомобиль мог видеть и понимать, что происхо-

Рисунок 1
Уровни автоматизации беспилотных автомобилей

дит вокруг него. Такие автомобили уже ездят по дорогам, получают огромное количество информации и учатся.

Беспилотные автомобили являются автономными системами принятия решений, которые обрабатывают потоки наблюдений, поступающих от различных бортовых датчиков [10]. На сегодняшний день производители Waymo, Tesla и Nvidia/Audi достигли третьего уровня автоматизации автономного транспорта.

На рис. 1 представлена шестиуровневая классификация автоматизации беспилотных автомобилей, принятая Сообществом автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) [11].

Программное обеспечение автономного автомобиля управляет работой всех систем, приводящих его в движение. Различные датчики и сенсоры собирают информацию об окружающей обстановке, которая ложится в основу действий автомобиля. На беспилотный автомобиль устанавливаются:

- лидары, которые являются устройствами оптического дистанционного зондирования, используемыми для проверки окружения транспортного средства с высокой точностью;
- радары, используемые для обнаружения окружающих автомобиль объектов, и определения их размеров, скорости и дальности нахождения;
- камеры;
- абонентский терминал системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС);
- датчики одометрии, используемые как средство оценки перемещения автомобиля при движении приводов.

Программное обеспечение беспилотного автомобиля может включать машинное зрение и глубинные нейронные сети. Для их реализации в сетях связи пятого поколения были предложены несколько архитектур. В [12] были рассмотрены особенности функционирования автомобильных самоорганизующихся сетей VANET (Vehicular Ad hoc Network) на основе трехуровневой архитектуры, описаны возможности, которые предоставляет технология граничных вычислений, рассмотрен вариант внедрения SDN и функциональность его сетевых элементов при внедрении в сеть VANET, подробно описаны основные компоненты автомобилей и необходимые поддерживаемые технологии сетевой инфраструктуры для организации современной интеллектуальной сети. Также в [12] большое внимание уделено решению проблемы мобильности и предложены два маршрутных подхода: собственно маршрутный и SDN подход.

В [13] была изучена проблема безопасности для автономных транспортных средств внутри автомобильной сети, построенной на архитектуре граничных вычислений, и рассмотрены существующие угрозы для различных категорий автомобильных устройств, обеспечивающих автономность (сенсоры, датчики, системы управления и т.д.), а также предложены способы защиты от этих угроз. Это помогает понять все аспекты построения автономных систем вождения: проблемы безопасности, проблемы, связанные с вычислительной мощностью и энергопотреблением автомобильных устройств, и аспекты взаимодействия автономных транспортных средств.

В [14] был проведен математический анализ модели автомобильной сети, обеспечивающей эффективную связь между транспортными средствами. В [14] наглядно показано, какие существуют проблемы для создания сверхнадежных сетей с ультрамалыми задержками, и предложено использовать для их построения теорию экстремальных значений и оптимизацию Ляпунова, как математические методы для моделирования экстремальных длин очередей и распределения ресурсов.

В [15] предлагается архитектура автомобильной сети на основе SDN и MEC с оптимальной возможностью распределения радиоресурсов для уменьшения задержек при передаче информации. При этом за основу сети взята периферийная вычислительная сеть с множественным доступом, в которой реализованы распределенные вычисления на узле eNB. Архитектура представлена в виде четырех логических уровней: уровня передачи, уровня управления, уровня множественного доступа и уровня доступа. В статье рассмотрен пример сценария взаимодействия логических уровней при обнаружении не сопоставленных в

OpenFlow таблиц пакетов.

Спрос на надежные системы для управления большим автомобильным сетевым трафиком, особенно в густонаселенных городах, активно растет [16]. Резкое увеличение числа транспортных средств накладывает большие ограничения на планирование сети, поэтому для их построения необходимы новые технологии, такие как MEC [3] и SDN [17]. Плотность трафика автомобилей приводит к перегрузке трафика данных [18], в частности, при использовании услуг широкополосного доступа, таких как передача видео с транспортного средства или блока базовой дорожной станции RSU (Road-Side Unit). Еще одна критическая проблема, связанная с автомобильными сетями, заключается в наличии пустот в зоне покрытия сети: некоторые части сети в какой-то период времени оказываются изолированными от общей сети. Чтобы решить эту проблему, используются взаимодействия D2D [19], которые позволяют выгрузить трафик из проблемной зоны (рис. 2).

Рисунок 2
Выгрузка трафика из проблемной зоны

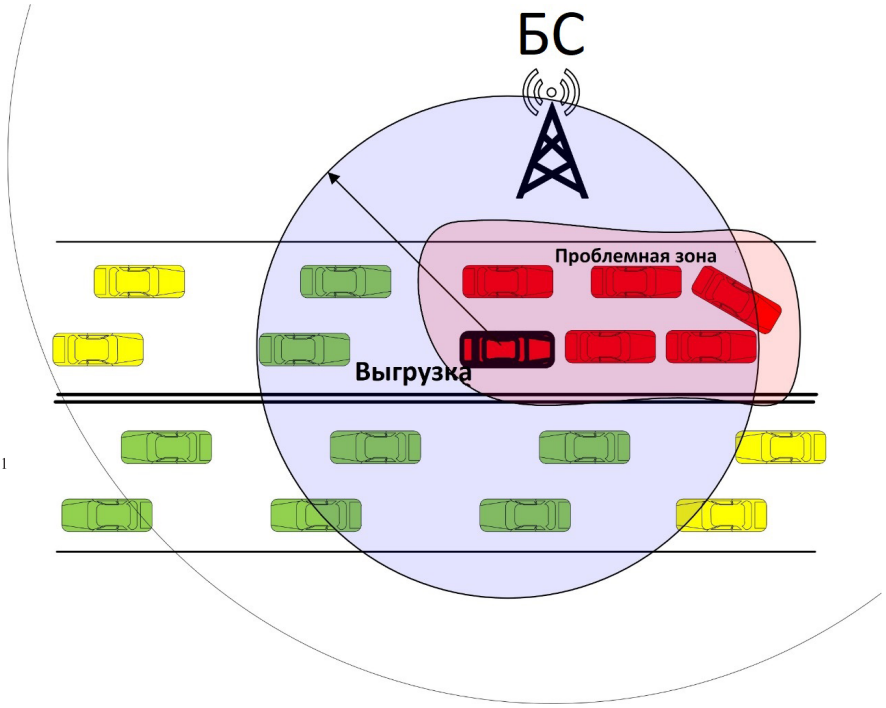
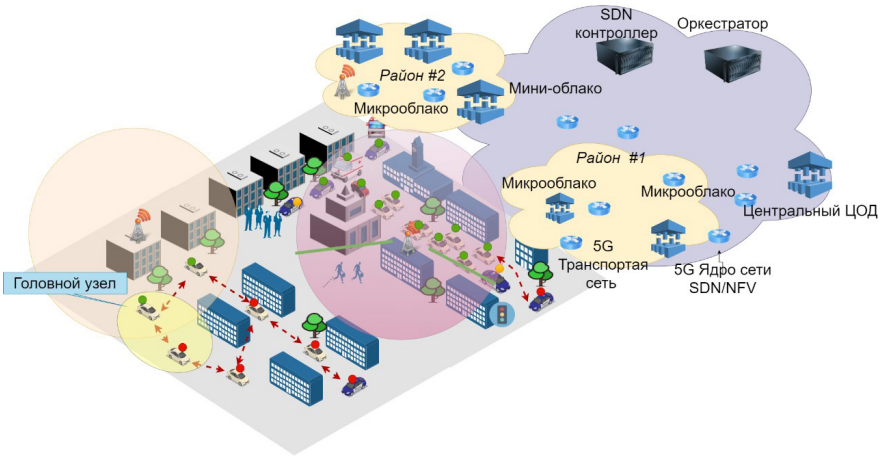


Рисунок 3
Предлагаемая архитектура сети



ПРЕДЛАГАЕМАЯ MEC/SDN СИСТЕМА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИЛОЖЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Предлагаемая архитектура MEC/SDN изображена на рис. 3. В этой архитектуре на границе сети доступа используются гетерогенные граничные облачные серверы. Каждый стационарный RSU подключается либо к пограничному серверу, либо к граничному серверу микрооблака, либо к граничному серверу мини-облака на основе многоуровневой пограничной структуры для приложений с ультрамалой задержкой, представленной в [20]. Ядро сети построено как мультиконтроллерное. Распределенные коммутаторы OpenFlow с ограниченными вычислительными возможностями развернуты в соответствии с [21]. Развертывание SDN с несколькими контроллерами позволяет сети обслуживать огромный объем трафика без какого-либо снижения производительности, поскольку контроллеры SDN могут переходить в активный или спящий режим на основе состояния сети [22]. Кроме того, такая конфигурация системы обеспечивает требуемую масштабируемость сети за счет введения новых контроллеров и пограничных серверов в ответ на увеличение сетевого трафика.

Одним из способов обеспечения сетевого подключения для пустот и разгрузки сетевого трафика является развертывание внеполосной связи D2D вместе с эффективной схемой кластеризации. Внедрение кластеризации позволяет добиться более высоких показателей производительности, связанных с задержкой и покрытием [23]. Одним из примеров развертывания эффективной схемы кластеризации является применение алгоритма FOREL, изображенного на рис. 4 слева. Позиции машин обозначены точка-

Рисунок 4
Метод кластеризации элементов сети с использованием алгоритма FOREL

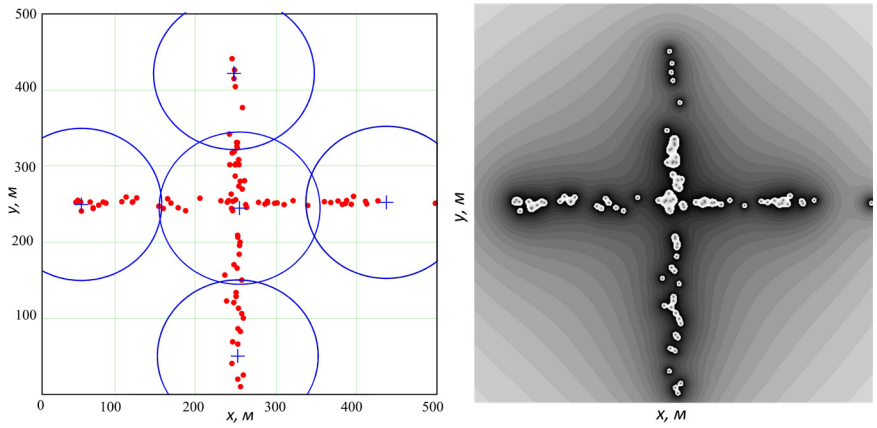
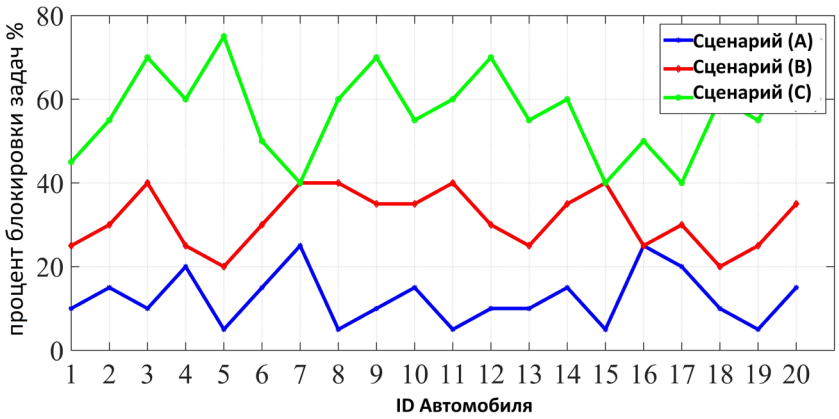


Рисунок 5
Процент заблокированных задач для трех смоделированных сценариев



ми, а позиции центров кластеров – перекрестиями. В [24] была разработана внеполосная схема кластеризации на основе D2D для интерфейса связи Wi-Fi Direct. Эта схема принята в архитектуре MEC/SDN для обеспечения возможности подключения к сети в непокрытых зонах и для разгрузки сети. Такая кластеризация позволяет транзитным узлам обрабатывать данные и решать, как передавать трафик. Поскольку выбор транзитных узлов определяет производительность системы, принятый метод кластеризации учитывает возможности узлов и их роль в системе управления транспортом. Выбор сетевого элемента, подходящего для выполнения роли транзитного узла или узла обработки данных, может учитывать другой сетевой критерий. В [24] была определена и решена проблема оптимизации для достижения оптимального выбора транзитного узла при выполнении кластеризации.

Данный алгоритм позволяет получить близкое к оптимальному решение задачи минимизации, которую можно представить в общем виде как

$$\{(xj,yj)\} = \arg\max_{x,y}\left\{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{k_j} q(e_i, C_j)\right\},$$

где $q(e_i,C_j)$ – функция, выражающая зависимость качества канала связи между i-ым узлом сети e_i в j-ом кластере и центром этого кластера; kj – количество кластеров; C_j – центр масс j-го кластера; (xj,yj) – координаты центра j-го кластера.

Решением являются координаты точек, расположение в которых транзитных узлов или граничных серверов (edge) дает возможность выгрузить трафик большего числа элементов сети.

Вид функции $q(\cdot)$ может быть различным, он зависит от применяемой технологии связи канального уровня. Если для выгрузки трафика или организации граничных вычислений применяется внеполосная кластеризация на основе технологии Wi-Fi Direct, то эта функция может быть найдена в соответствии с [24]. В этом случае она отражает зависимость пропускной способности канала от удаленности элемента сети от центра кластера. В ней также можно учесть влияние интерференции, порождаемой соседними передающими устройствами (сетевыми элементами). Иллюстрация мощности сигналов интерференции приведена на рис. 4 справа, где светлые участки соответствуют большей мощности сигналов.

Создание кластеров сетевых элементов и использование внеполосных D2D взаимодействий позволяет существенно разгрузить каналы автомобильной сети и улучшить качество связи между сетевыми элементами.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для оценки производительности архитектуры MEC/SDN были смоделированы сетевые архитектуры для реальных условий. Различные сценарии моделирования для беспилотных автомобилей с разнородными возможностями были реализованы с помощью пакета прикладных программ Matlab. Используемые параметры моделирования приведены в таблице. Показатель для оценки производительности представляет собой вероятность блокировки задачи, т.е. вероятность того, что задача не будет решена. Предполагается, что каждое транспортное средство имеет 20 гетерогенных вычислительных задач, которые должны поступить для обработки

одновременно. Для разных конфигураций системы были смоделированы три сценария. Первый сценарий (A) представляет предлагаемую систему с применением технологий MEC, SDN и кластеризации на основе D2D. Второй сценарий (B) описывает систему беспилотных автомобилей с развертыванием только технологий MEC и SDN (без D2D и кластеризации). Последний сценарий (C) моделирует систему без использования технологий MEC, D2D и SDN. На рис. 5 представлен процент блокировки задач для каждого сценария моделирования. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая архитектура MEC/SDN обеспечивает повышение производительности на 74% по сравнению с решением, в котором не используются ни пограничные серверы, ни технологии SDN.

Параметры моделирования

Параметр	Значение
число автомобилей	20
размер поля	1 км x 1км
число микрооблаков	6
число мини-облаков	3
задачи на автомобиль	20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена новая архитектура с использованием технологий MEC, SDN и D2D для поддержки приложений беспилотных автомобилей. Предлагаемая архитектура направлена на преодоление двух основных проблем автомобильных сетей — высокой плотности трафика и наличия непокрытых зон в автомобильной сети связи. Разработан также алгоритм кластеризации на основе взаимодействий D2D для транспортных средств в непокрытых зонах и для выгрузки трафика сети в регионах с интенсивным движением. Кроме того, представлен метод передачи данных для управления трафиком в сети. Предложенная архитектура и составляющие ее методы были оценены с использованием реалистичных условий моделирования. Результаты моделирования показывают, что предложенная архитектура дает 74% прироста производительности системы в терминах вероятности блокировки задач. Дальнейшие направления работы включают исследование более эффективных методов обнаружения пустот в покрытии сети [25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кучерявый, А.Е.** Сети связи 2030 / А.Е. Кучерявый, А.С. Бородин, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2018. – № 11. – С. 52-56.
2. **Атея, А.А.** Интеллектуальное ядро для сетей связи 5g и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – № 3. – С. 34-40.
3. **Маколкина, М.А.** Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений / М.А. Маколкина, А.А. Атея, А.С.А. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – № 6. – С. 36-42.
4. **Carli, R.** Monitoring traffic congestion in urban areas through probe vehicles: a case study analysis / R. Carli, M. Dotoli, N. Epicoco // Internet Technology Letters. – 2018. – Vol. 1(4). – https://doi.org/10.1002/itl2.5.
5. **Fernandes, B.** Implementation and analysis of IEEE and ETSI security standards for vehicular communications / B. Fernandes, J. Rufino, M. Alam, J. Ferreira // Mobile Networks and Applications. – 2018. – Vol. 23(3). – P. 469-478.
6. Feasibility study on new services and markets technology enablers for critical communications. 3GPP TR 22.862. – https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.862/.
7. **Dighriri, M.** Measurement and classification of smart systems data traffic over 5G mobile networks / M. Dighriri, G.M. Lee, T. Baker // Technology for Smart Futures; edited by M. Dastbaz, H. Arabnia, B. Akhgar. – Cham, Switzerland: Springer, 2018. – P. 195-217.
8. **Jaballah, W.B.** Survey on software-defined VANETs: Benefits, challenges, and future directions / W.B. Jaballah, M. Conti, C.A. Lal // arXiv:1904.04577. 2019. – https://dblp.org/rec/bib/journals/corr/abs-1904-04577.
9. **Wang, J.** Networking and communications in autonomous driving: a survey / J. Wang, J. Liu, N. Kato // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21(2). – P. 1243-1274.
10. **Grigorescu, S.** A Survey of Deep Learning Techniques for Autonomous Driving [Электронный ресурс] / S. Grigorescu, B. Trasnea, T. Cocias, G. Macesanu / https://arxiv.org/abs/1910.07738v2 (дата обращения 03.04.2020).
11. **Lin, S.-C.** The Architectural Implications of Autonomous Driving: Constraints and Acceleration / S.-C. Lin, C.-H. Hsu, Y. Zhang et al. // ASPLOS'18: Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems
12. **Raza, S.** A survey on vehicular edge computing: Architecture, applications, technical issues, and future directions / S. Raza, S. Wang, M. Ahmed, M.R. Anwar // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2019. – Article ID 3159762. – https://doi.org/10.1155/2019/3159762.
13. **Liu, S.** Edge Computing for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges / S. Liu, L. Liu, J. Tang et al. // Proceedings of the IEEE. – 2019. – Vol. 107 (8). – DOI:10.1109/JPROC.2019.291598.
14. **Samarakoon, S.** Distributed Federated Learning for Ultra-Reliable Low-Latency Vehicular Communications / S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, M. Debbah // IEEE Transactions on Communications. – 2020. – Vol. 68, Issue 2. – P. 1146-1159.
15. **Nkenyereye, L.** Software Defined Network-based Multi-access Edge Framework for Vehicular Networks / L. Nkenyereye, L. Nkenyereye, S.M.R. Islam et al. // IEEE Access. – 2019. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962903.
16. **Joy, J.** Internet of vehicles: enabling safe, secure, and private vehicular crowdsourcing / J. Joy, V. Rabsatt, M. Gerla // Internet Technology Letters. –2018. – Vol. 1(1). – https://doi.org/10.1002/itl2.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

17. Ridhawi, I.A. A collaborative mobile edge computing and user solution for service composition in 5G systems / I. A. Ridhawi, M. Aloqaily, Y. Kotb et al. // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2018. – Vol. 29(11). – https://doi.org/10.1002/ett.3446.

18. Aldabbas, O. Unmanned ground vehicle for data collection in wireless sensor networks: mobility-aware sink selection / O. Aldabbas, A. Abuarqoub, M. Hammoudeh et al. // The Open Automation and Control Systems Journal. – 2016. Vol. 8(1). – P. 35-46.

19. Бородин, А.С. Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 40-45.

20. Ateya, A.A. Multilevel cloud based tactile internet system / A.A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek, A. Koucheryavy // 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2017. – P. 105-110.

21. Muthanna, A. Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain / A. Muthanna, A.A. Ateya, A. Khakimov et al. // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2019. – Vol. 8(1). – DOI: 10.3390/jsan8010015.

22. Hu, T. Multi-controller based software-defined networking: a survey / T. Hu, Z. Guo, P. Yi et al. // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 15980-15996. – DOI:10.1109/ACCESS.2018.2814738.

23. Ateya, A.A. Multi-level cluster based device-to-device (D2D) communication protocol for the base station failure situation / A.A. Ateya, A. Muthanna, A. Vybornova, A. Koucheryavy // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Cham, Switzerland: Springer, 2017. – P. 755-765.

24. Paramonov, A. Clustering optimization for out-of-band D2D communications / A. Paramonov, O. Hussain, K. Samouylov et al.// Wireless Communications and Mobile Computing. – 2017. – Article ID 6747052. – https://doi.org/10.1155/2017/6747052.

25. Bezoui, M. Detecting gaps and voids in WSNs and IoT networks: the angle-based method / M. Bezoui, A. Bounceur, L. Lagadec, R. Euler // Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems, 2018. – DOI: 10.1145/3231053.3231089.

Получено 03.05.20.