

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ D2D КОММУНИКАЦИИ НА БАЗЕ SDN

А. В. Амелянович<sup>1</sup>, М. Н. Шпаков<sup>1</sup>, А. С. Мутханна<sup>1</sup>,  
Р. В. Киричек<sup>1\*</sup>, А. Г. Владыко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: kirichek@sut.ru

## Аннотация

**Предмет исследования.** В парадигме коммуникаций устройство–устройство (D2D) в сетях 5G создана эффективная инфраструктура, позволяющая использовать различные «умные» городские приложения, такие как общественная безопасность. В будущих умных городах плотное развертывание беспроводных сенсорных сетей может быть интегрировано с сетями 5G с использованием D2D-связи. D2D-связь обеспечивает прямую связь между соседними пользовательскими устройствами с использованием сотовых или специальных каналов связи, тем самым улучшая использование спектра, пропускную способность системы и энергоэффективность сети. **Метод.** Рассматривается иерархическая коммуникационная архитектура D2D, в которой контроллер централизованной программной сети (SDN) взаимодействует с облачным головным устройством (CH) для уменьшения количества запрошенных каналов связи LTE, тем самым улучшая потребление энергии. **Практическая значимость.** В данной работе подчеркивается надежность и потенциал архитектуры, представляя сценарий общественной безопасности, когда часть сети отключается из-за любой катастрофы.

## Ключевые слова

Коммуникация устройство – устройство, SDN, сети пятого поколения, 5G.

## Информация о статье

УДК 621.391

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 21.03.17, принята к печати 02.06.17.

**Ссылка для цитирования:** Амелянович А. В., Шпаков М. Н., Мутханна А. С., Киричек Р. В., Владыко А. Г. Исследование централизованного управления архитектурной D2D коммуникации на базе SDN // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 2. С. 13–24.

# STUDY OF CENTRALIZED MANAGEMENT OF ARCHITECTURE D2D COMMUNICATION BASED ON THE SDN

A. Amelyanovich<sup>1</sup>, M. Shpakov<sup>1</sup>, A. Muthanna<sup>1</sup>, R. Kirichek<sup>1\*</sup>, A. Vladyko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: kirichek@sut.ru

**Abstract**—In the device-device communication paradigm (D2D) in 5G networks, an efficient infrastructure is created, allowing the use of various smart urban applications, such as public safety. In future smart cities, the tight deployment of wireless sensor networks can be integrated with 5G networks using D2D communications. D2D communication provides direct communication between neighboring user devices using cellular or special communication channels, thereby improving spectrum utilization, system capacity and network energy efficiency. This article discusses the hierarchical communication architecture of D2D, in which the centralized software network controller (SDN) interacts with the cloud head devices (CH) to reduce the number of requested LTE communication channels, thereby improving power consumption. This paper considers the reliability and potential of the architecture, presenting a public safety scenario when part of the network is disconnected due to any disaster.

**Keywords**—Device – device Communication, SDN, fifth generation networks, 5G, D2D.

## Article info

Article in Russian.

Received 21.03.17, accepted 02.06.17.

**For citation:** Amelyanovich A., Shpakov M., Muthanna A., Kirichek R., Vladyko A.: Study of Centralized Management of Architecture D2D Communication Based on the SDN // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 2. pp. 13–24 (in Russian).

## Введение

Экспоненциальное увеличение числа сотовых устройств и объёма трафика в сочетании с надвигающимся спектральным кризисом, несомненно, является основной задачей для сетей пятого поколения (5G). Поэтому в сетях 5G предлагают объединять всевозможные решения, чтобы обеспечить большую ёмкость, меньшую задержку и более высокую надёжность [1, 2]. Такие решения включают в себя несколько новых технологий, таких как Network Function Virtualization (NFV), Software-Defined Networking (SDN), а также D2D-коммуникации. D2D представляет собой одну из таких технологий, которая потенциально может решить проблему узких мест пропускной способности унаследованных от сотовых систем. Эта новая парадигма обеспечивает прямое взаимодействие между устройствами на основе Long Term Evolution (LTE), минимизируя передачу данных в сети радиодоступа. Преимуществами прямого взаимодействия является прямое соединение, способное выгружать данные из спектра в внеполосных технологиях (например, WiFi, Bluetooth и т. д.), улучшая спектральную эффективность. Во-вторых, скорость передачи данных и покрытие могут быть увеличены

для устройств, не имеющих прямого доступа к сотовой инфраструктуре. В-третьих, может быть достигнута более высокая энергоэффективность из-за близости устройств, требующих более низких передающих мощностей.

Основной проблемой практической реализации D2D архитектуры является сходимость приложений общественной безопасности с коммерческими сотовыми сетями.

В данной работе, для решения вышеупомянутых задач, предлагается парадигма SDN, которая отвечает требованиям приложений общественной безопасности, а также коммерческим сотовым сценариям.

### Архитектура SDN в сетях пятого поколения

Существующие распределенные RAN архитектуры, такие как Cloud-RAN, сосредоточены в основном на удаленных серверах и ЦОДах. Однако это вносит существенные ограничения. Во-первых, они не могут обеспечить достаточную степень масштабируемости PHY/MAC-уровня виртуализации. Во-вторых, они не поддерживают сетевого уровня виртуализации, как SD-CN. С целью устранения этих недостатков, предлагается SD-RAN с значительно улучшенной масштабируемостью и высокой степенью декомпозиции базовых станций.

Для решения этих проблем, SDN для сетей 5G принял новую концепцию высокой степени декомпозиции базовой станции, где обработка основной полосы частот возлагается на RPH, при этом остальные функции, например, MIMO кодирование, кодирование на источнике и MAC уровень возлагается на BSS, как показано на рис. 1.

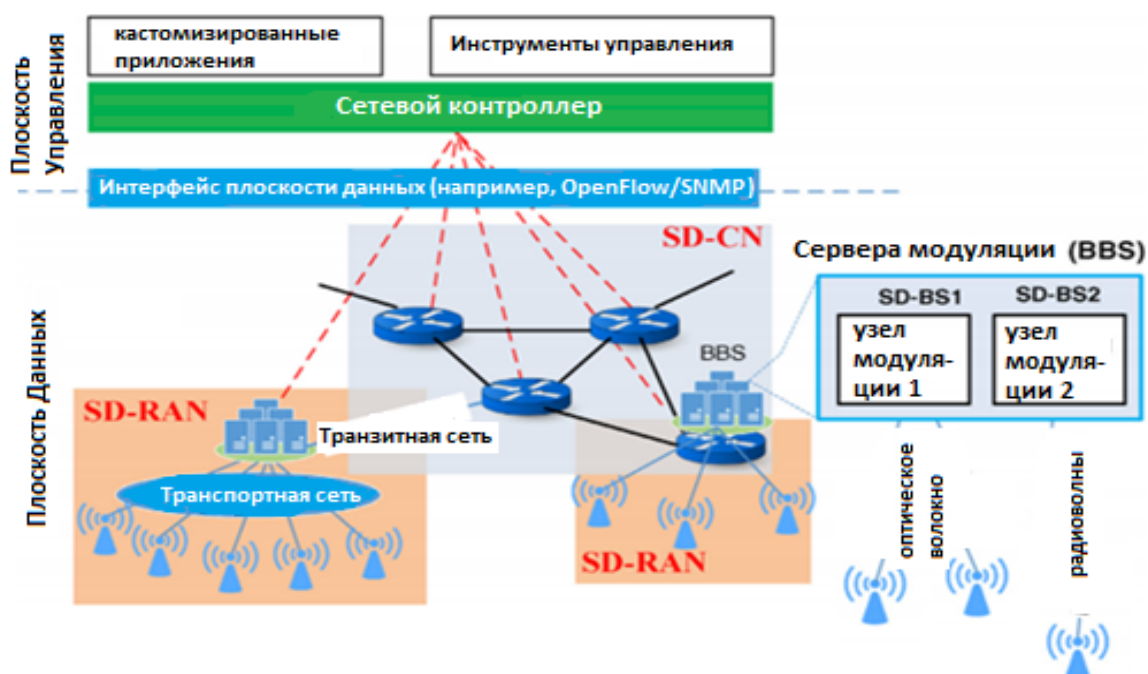


Рис. 1.

Такая архитектура позволяет мобильным пользователям перемещаться между базовыми станциями, используя различные беспроводные стандарты, включая сбой в сети предоставления услуг [3]. Также, применяя общий интерфейс OpenFlow как на SDN коммутаторах, так и на базовых станциях SDN, обеспечиваются прозрачные взаимосвязи между базовой сетью и интерфейсом радиодоступа, и предоставляет универсальный интерфейс управления всех архитектур SDN для сетей 5G.

## **D2D – коммуникации в сетях пятого поколения**

D2D представляет собой одну из таких технологий, которая потенциально может решить проблему узких мест пропускной способности унаследованных сотовых систем. Сходимость приложений общественной безопасности с коммерческими сотовыми сетями представляет собой серьезную проблему при определении коммуникационных архитектур D2D. Это связано с более строгими требованиями приложений общественной безопасности, такими как, например, высокая надежность обслуживания со сверхнизкими задержками.

Взаимодействие устройств-устройство (D2D) является ключевой коммуникационной парадигмой, которая поддерживает соединение неоднородных объектов между собой и обеспечивает ряд важных преимуществ. Одной из основных задач и проблем для сотовых систем 5G является проектирование гибких сетевых архитектур, которые могут быть реализованы на принципах программно-конфигурируемых сетей SDN. Существующие коммерческие сотовые системы основываются на закрытых и сложно управляемых архитектурах, базирующихся на аппаратных средствах как в интерфейсе радиодоступа, так и в базовой сети. Эти проблемы существенно задерживают принятие и внедрение новых стандартов, налагают значительные трудности в части реализации новых методов для увеличения пропускной способности сети.

Использование D2D открывает новые функциональные возможности беспроводных сетей 5G:

- Развитие и адаптивность: из-за разделения плоскости данных и плоскости управления, как аппаратная, так и программная сетевая инфраструктура могут быть легко, быстро и независимо обновлены, что позволяет своевременно применять новые технологии в интерфейсе радиодоступа (например, миллиметровые волны, полнодуплексные соединения, MIMO) [4]. Кроме того, программируемая плоскость данных позволяет контроллерам динамически распределять сетевые ресурсы и внедрять новые сетевые решения в соответствии с изменяющимися моделями трафика, непредвиденными сбоями на сети, требованиям к качеству сервиса (QoS).

- Инфраструктура как услуга (IaaS): Появляющиеся сетевые сервисы, такие как коммуникации «машина-машина», умные приложения, мобильные операторы виртуальной сети (MVNO), а также популярные контент-сервисы (например, потоковое видео) требуют качественное разделение сетевых возможностей, которые будут интегрированы и развернуты во всей сетевой инфраструктуре.

- Максимальная спектральная эффективность: В SDN для сетей 5G базовые станции SDN могут быть реализованы на сервере или в ЦОДе. Там они могут без преград обмениваться управляющей информацией, мобильными данными и информацией о состоянии канала (CSI), связанной с различными действиями

пользователей в системе. Также, с SDN для сетей 5G гораздо легче реализовать алгоритмы снижения помех между сотами, таким образом коэффициент повторного использования частот будет равен 1 во всей сети.

– Конвергенция гетерогенных сетей: Мир постоянно развивающихся, конкурирующих и сосуществующих стандартов беспроводных сетей связи (WiMAX, LTE, LTE-A и т. д.), а также принципиальное различие между беспроводным интерфейсом радиодоступа и проводной базовой сетью осложняет и замедляет развитие единой системы планирования и управления сетью. Используя открытые и независимые интерфейсы, архитектура SDN для сетей 5G предоставляет единое управление различными беспроводными стандартами, а также согласование работы между RAN и проводной базовой сетью [5].

– Энергоэффективность – в соответствии с нагрузкой на сеть, контроллеры динамически распределяют нагрузку между базовыми станциями SDN. Таким образом, снижается количество незанятых базовых станций, которые потребляют почти такое же количество энергии, как и активные. Также, в связи с реализацией базовых станций SDN, количество физических площадок может быть значительно уменьшено.

### **Архитектура SDN в случае взаимодействия с D2D**

Возможные сценарии применения D2D-коммуникаций включают, среди прочего, локализованные услуги, когда D2D-устройства, обнаруживая близость, взаимодействуют между собой [6]. К числу таких услуг относятся: социальные приложения, реализация которых обусловлена близостью вызванного пользователя, реклама, местный обмен информацией; смарт-связь («умная» связь в условиях конкретной, измеримой, достижимой и значимой цели). Другие приложения включают в себя поддержку информационной безопасности, когда D2D-устройства обеспечивают подключение к локальной сети, в том числе и в случае повреждения инфраструктуры гетерогенной зоны 5G [7].

D2D-коммуникации должны дать возможность пользователям почувствовать преимущества сверхплотной сетевой архитектуры с точки зрения уменьшения длительности задержек, увеличения скорости передачи данных и сокращения потребления энергии. D2D-коммуникации позволяют решать также новые задачи в области проектирования и безопасности, управления мобильностью и помехами (рис. 2). Кроме того, успех этой технологии в значительной степени зависит от сценариев, в которых пользователи в непосредственной близости друг от друга общаются, а также от приложений, которые будут разработаны в ближайшие годы.

Предлагается использовать D2D для создания мобильных облаков, мощной концепции, которая позволяет разнообразные услуги для широкого спектра приложений, таких как близости на базе социальных сетей (например, онлайн-игры, потоковое видео), реклама для прохожих, общественной безопасности (устройства обеспечивают, по крайней мере локальную связность в случае повреждения радио инфраструктуры), интеллектуальные коммуникации транспортного средства, а также эффективного распределения контента. Во-вторых, архитектура строится для улучшения общественной безопасности для LTE. Основная идея 3GPP – связь приложений контроллера D2D и иерархии контроллеров SDN в сети,



таким образом, чтобы соединить образование и управление мобильными облаками устройств с централизованным управлением, распределением ресурсов и функций маршрутизации из SDN.

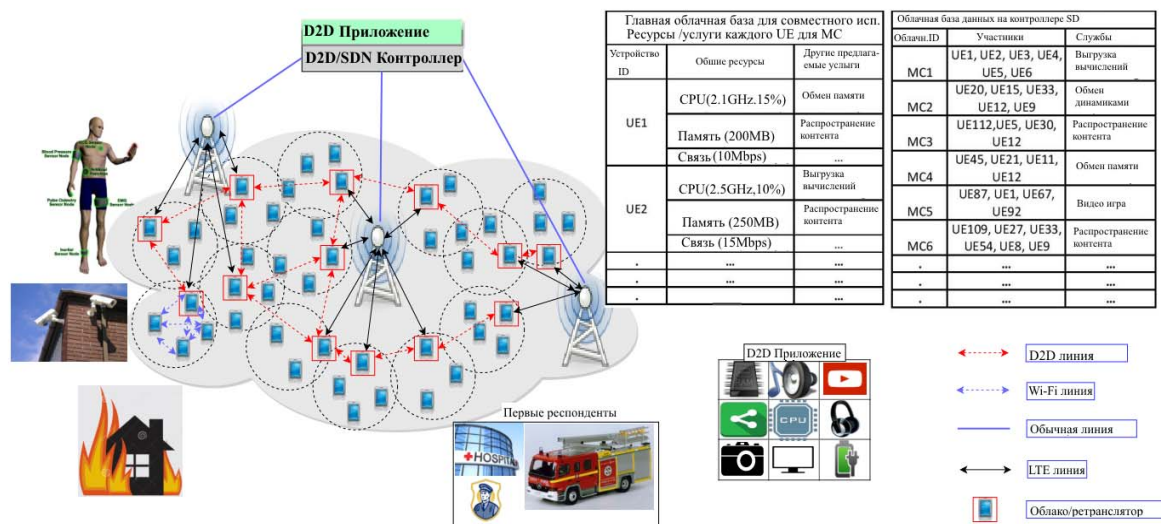


Рис. 2. Предлагаемая программно-определяемая архитектура связи D2D для приложений общественной безопасности

Процесс формирования облака делится на два этапа (см. рис. 3). На первом этапе, абонентский аппарат инициирует формирование мобильного облака посредством передачи запроса с близлежащих устройств с использованием технологии outof-диапазона, например, Wi-Fi Direct, Bluetooth и т. д. На основе информации, полученной от респондентов UEs, мобильное облако формируется и регистрируется на глобальном контроллере SDN. На втором этапе, центральный контроллер SDN будет иметь глобальное представление всех обслуживаемых облаков с услугами, которые они предлагают [8]. На данный момент, глобальный контроллер сможет настроить облака по запросам пользователей. Контроллер SDN имеет также видимость качества линии связи между UE, CHS и остаточными батареями, которые он может использовать для вычисления путей маршрутизации между CHs.

### Вычисление маршрута

На рис. 3. показана возможная сигнализация, которая может быть выполнена для доставки информации от источника к месту назначения в случаях, которые обсуждались выше.

Сигнал, показанный на рис. 4 для случая, когда целевой eNB имеет адекватные радиоресурсы для приёма запросов на входящие ресурсы, посредством чего выделяет сотовые радиоресурсы для передачи, как показано в номере сигнализации [(1)–(7)].

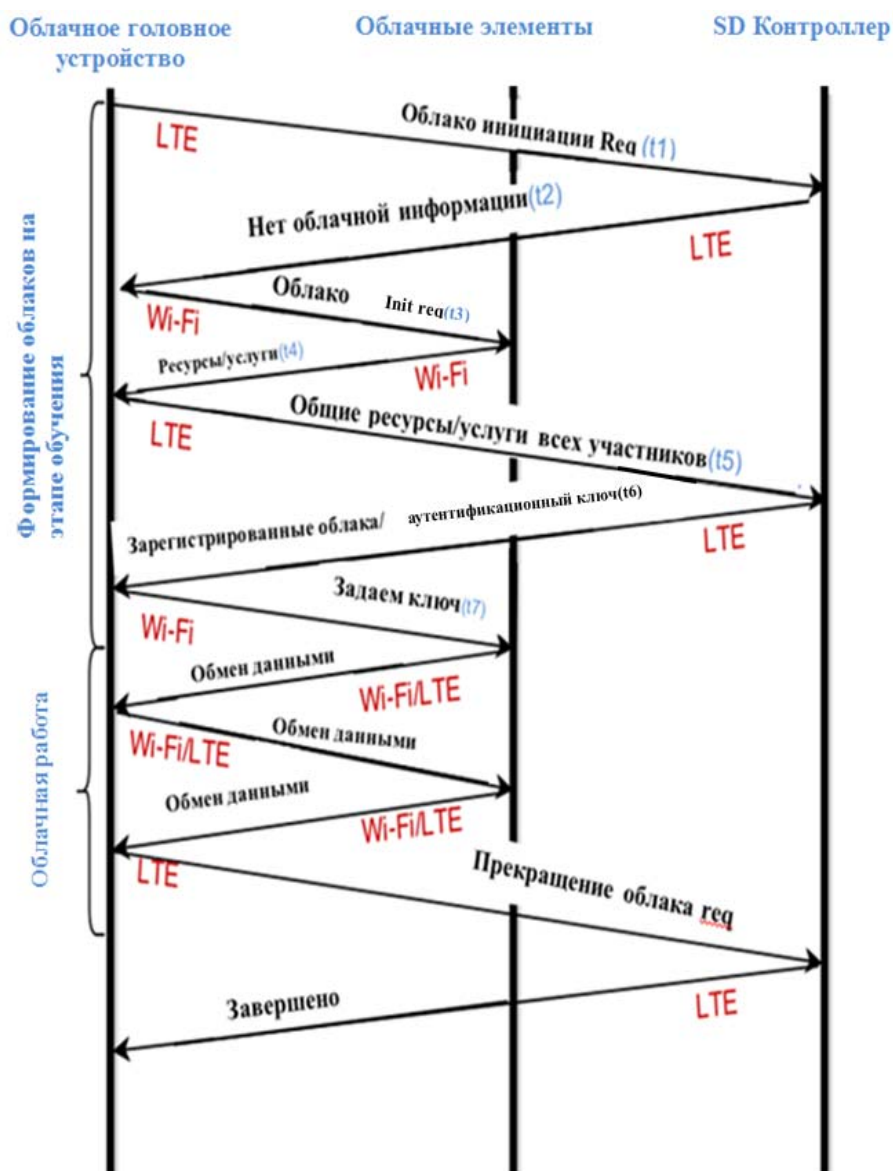


Рис. 3. Описание передачи сигналов для формирования облака

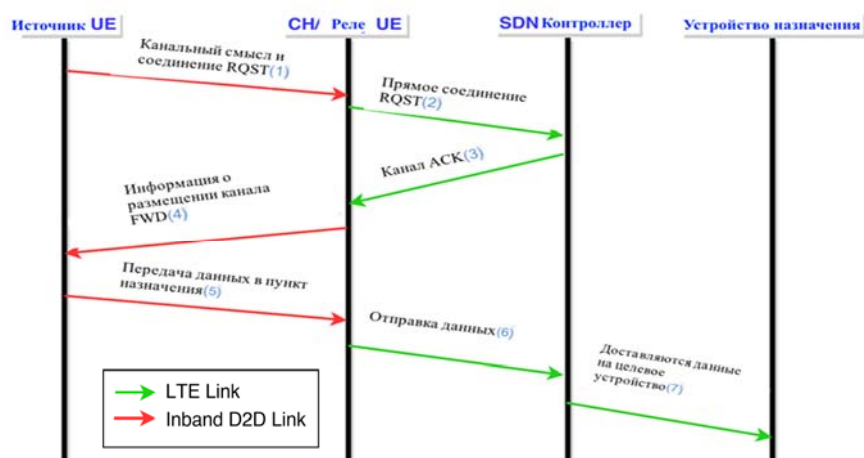


Рис. 4. Соответствующий ресурс, доступный в eNB

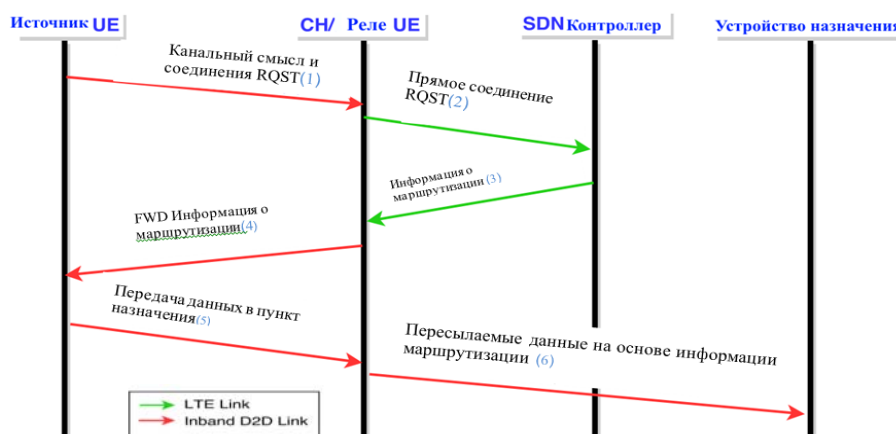


Рис. 5. Сигнализация для маршрутизации мультитранзитного участка между облачными головами

Тогда как рис. 5 показывает сигнализацию, когда радиоресурс сотовой сети полностью исчерпан. В этом случае центральный контроллер SDN вычисляет маршрут от источника (т. е., ретрансляционного UE) до целевого устройства, используя внутриволновые D2D-линии связи между CHS и пересылает Информацию маршрутизации к ретрансляционному UE (т. е., как показано номером сигнализации (4)). Вычисление информации о маршрутизации может быть выполнено с использованием различных алгоритмов маршрутизации, таких как алгоритм маршрутизации Дейкстры.

### Построение имитационной модели

Для испытания контроллеров SDN при использовании D2D коммуникация была построена mesh сеть в эмуляторе Mininet-WiFi. При помощи утилиты Iperf исследована круговая задержка и пропускная способность такой сети (рис. 6, табл. 1, рис. 7).

```

--- 10.0.0.13 ping statistics ---
14 packets transmitted, 14 received, 0% packet loss, time 13022ms
rtt min/avg/max/mdev = 4.434/4.812/8.898/1.134 ms
mininet-wifi> sta1 ping sta3 -c 20
PING 10.0.0.13 (10.0.0.13) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=1 ttl=64 time=4.76 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=2 ttl=64 time=4.44 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=3 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=4 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=5 ttl=64 time=4.50 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=6 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=7 ttl=64 time=4.44 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=8 ttl=64 time=4.44 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=9 ttl=64 time=4.51 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=10 ttl=64 time=4.49 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=11 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=12 ttl=64 time=4.45 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=13 ttl=64 time=4.51 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=14 ttl=64 time=4.52 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=15 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=16 ttl=64 time=4.49 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=17 ttl=64 time=4.49 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=18 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=19 ttl=64 time=4.43 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=20 ttl=64 time=4.50 ms
--- 10.0.0.13 ping statistics ---
20 packets transmitted, 20 received, 0% packet loss, time 19031ms
rtt min/avg/max/mdev = 4.432/4.496/4.765/0.108 ms
mininet-wifi>

```

Рис. 6. RTT



Таблица 1.

## Получение круговой задержки RTT

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RTT	4,76	4,44	4,48	4,50	4,48	4,44	4,44	4,51	4,49	4,48	4,45	4,51	4,52

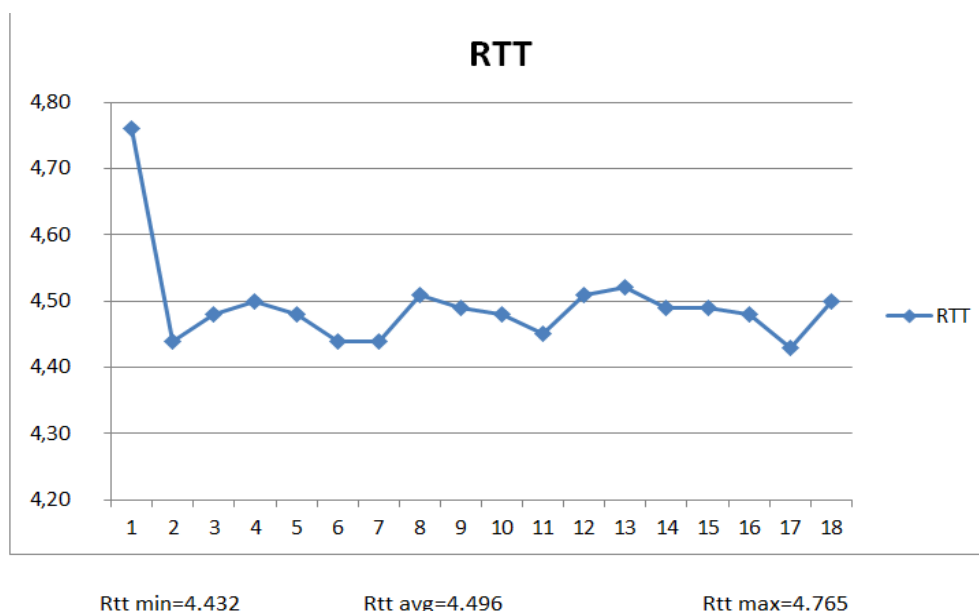


Рис. 7. Круговая задержка

Полученные при тестировании пропускной способности сети результаты представлены на рис. 8, 9, 10, табл. 2, 3.

```
mininet-wifi> sta1 ping sta3 -c 20
root@SDNmininet:~/Downloads# iperf -c 10.0.0.11 -u
PING 10.0.0.13 (10.0.0.13) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=1 ttl=64 time=4.49 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=2 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=3 ttl=64 time=4.43 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=4 ttl=64 time=4.50 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=5 ttl=64 time=4.49 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=6 ttl=64 time=4.48 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=7 ttl=64 time=4.47 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=8 ttl=64 time=4.46 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=9 ttl=64 time=4.45 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=10 ttl=64 time=4.44 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=11 ttl=64 time=4.43 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=12 ttl=64 time=4.42 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=13 ttl=64 time=4.41 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=14 ttl=64 time=4.40 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=15 ttl=64 time=4.39 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=16 ttl=64 time=4.38 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=17 ttl=64 time=4.37 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=18 ttl=64 time=4.36 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=19 ttl=64 time=4.35 ms
64 bytes from 10.0.0.13: icmp_seq=20 ttl=64 time=4.34 ms
--- 10.0.0.13 ping statistics ---
20 packets transmitted, 20 received, 0% packet loss, time 19031ms
rtt min/avg/max/mdev = 4.432/4.496/4.765/0.108 ms
mininet-wifi> iperf -u
invalid number of args: iperf src dst
mininet-wifi> xterm sta1
mininet-wifi> xterm sta3
mininet-wifi>
```

Рис. 8. Пропускная способность сети UDP

Таблица 2.

Получение пропускной способности сети при использовании UDP

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Полученные результаты	1,05	0,99	1,03	1,07	1,04	1,09	1,00	1,11	1,06	1,02	1,10

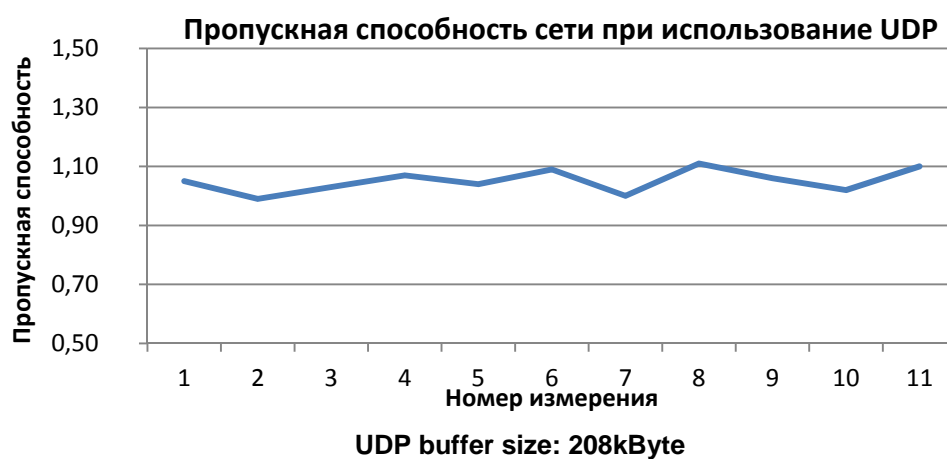


Рис. 9. Пропускная способность сети UDP

Таблица 3.

Получение пропускной способности сети при использовании TCP

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Полученные результаты	4,81	4,76	4,80	4,84	4,77	4,82	4,79	4,83	4,78	4,85	4,86

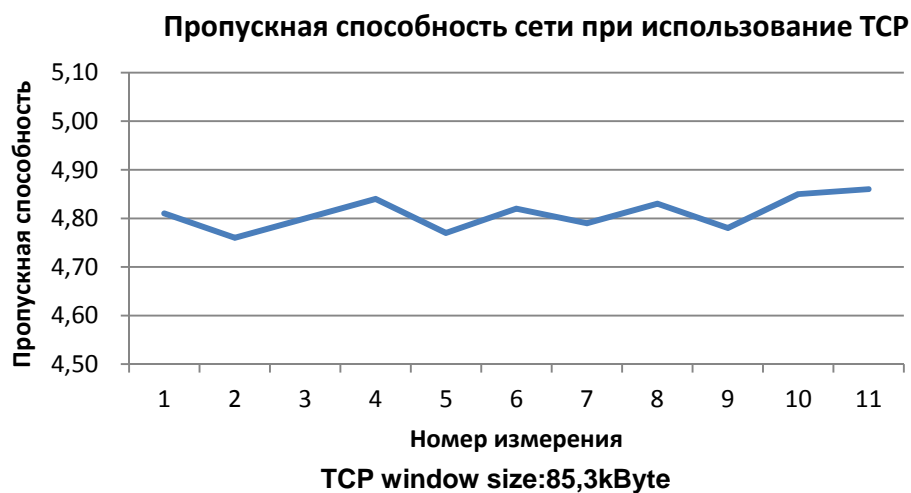


Рис. 10. Пропускная способность сети TCP

## Заключение

В ходе работы было предложено решение по организации сетей связи пятого поколения, на основе конвергенции двух современных парадигм: программно-определяемых сетей (SDN) и D2D – коммуникаций.

Для проверки работоспособности предлагаемого решения была построена имитационная модель для испытания контроллеров программно-определяемой сети для взаимодействия с D2D коммуникациями.

В результате тестирования были исследованы основные характеристики контроллеров и их изменение при различных профилях нагрузки. Получили круговую задержку и пропускную способность.

Эксперимент показал, что пропускная способность сети SDN, построенной с использованием ячеистой топологии, при большом числе подключённых устройств не отклоняется от заданных ей значений в рамках допустимой статистической погрешности. Круговая задержка в эксперименте не превысила 4,8 мс, что является хорошим результатом для беспроводных mesh сетей, в которых каждый узел выступает в роли маршрутизатора и вносит свою задержку. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использовании SDN технологии для D2D коммуникаций оправдано.

## Литература

1. Demestichas P., Georgakopoulos A., Karvounas D., Tsagkaris K., Stavroulaki V., Lu J., Xiong C., Yao J. 5G on the Horizon: Key Challenges for the Radio-Access Network // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2013. Vol. 8. Iss. 3. pp. 47–53.
2. Granelli F., Gebremariam A. A., Usman M., Cugini F., Stamati V., Alitska M., Chatzimisios P. Software Defined and Virtualized Wireless Access in Future Wireless Networks: Scenarios and Standards // IEEE Communications Magazine, Communications Standards Supplement. 2015. Vol. 53. Iss. 6. pp. 26–34.
3. Xia W. et al. A Survey on Software-Defined Networking // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17. Iss. 1. pp. 27–51.
4. Гимадинов Р. Ф., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Кластеризация в мобильных сетях 5G. случай частичной мобильности // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 2 (10). С. 44–52.
5. Greene K. 10 Emerging Technologies of 2009. Software Defined Networking. MIT Technology Review. 2009.
6. Kirichek R., Vladyko A., Zakharov M., Koucheryavy A. Model Networks for Internet of Things and SDN // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2016. pp. 76–79.
7. Muthanna A., Masek P., Hosek J., Fujdiak R., Hussein O., Paramonov A., Koucheryavy A. Analytical evaluation of D2D connectivity potential in 5G wireless systems // Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9870, pp. 395–403.
8. Kirichek R., Vladyko A., Zakharov M., Koucheryavy A., Model networks for Internet of Things and SDN // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2016. pp. 76–79.

## References

1. Demestichas P., Georgakopoulos A., Karvounas D., Tsagkaris K., Stavroulaki V., Lu J., Xiong C., Yao J. 5G on the Horizon: Key Challenges for the Radio-Access Network // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2013. Vol. 8. Iss. 3. pp. 47–53.

2. Granelli F., Gebremariam A. A., Usman M., Cugini F., Stamati V., Alitska M., Chatzimisios P. Software Defined and Virtualized Wireless Access in Future Wireless Networks: Scenarios and Standards // IEEE Communications Magazine, Communications Standards Supplement. 2015. Vol. 53. Iss. 6. pp. 26–34.
3. Xia W. et al. A Survey on Software-Defined Networking // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17. Iss. 1. pp. 27–51.
4. Gimadinov R., Muthanna A., Koucheryavy A. Clustering in Mobile Network 5G based on Partial Mobility // Telecom IT. 2015. Vol. 2 (10). pp. 44–52.
5. Greene K. 10 Emerging Technologies of 2009. Software Defined Networking. MIT Technology Review. 2009.
6. Kirichek R., Vladuko A., Zakharov M., Koucheryavy A. Model Networks for Internet of Things and SDN // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT). 2016. pp. 76–79.
7. Muthanna A., Masek P., Hosek J., Fujdiak R., Hussein O., Paramonov A., Koucheryavy A. Analytical evaluation of D2D connectivity potential in 5G wireless systems // Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9870, pp. 395–403.
8. Kirichek R., Vladuko A., Zakharov M., Koucheryavy A., Model networks for Internet of Things and SDN // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT). 2016. pp. 76–79.

**Амелянович Алексей Вадимович**

– магистр, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, lexe0596@gmail.com

**Шпаков Михаил Николаевич**

– магистр, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, Mikhail.N.Shpakov@nw.rt.ru

**Мутханна Аммар Салех Али**

– кандидат технических наук, ассистент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, ammarexpress@gmail.com

**Киричек Руслан Валентинович**

– кандидат технических наук, доцент, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, kirichek@sut.ru

**Владыко Андрей Геннадьевич**

– кандидат технических наук, начальник научного управления, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, vladuko@sut.ru

**Amelyanovich Alexey**

– undergraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, lexe0596@gmail.com

**Shpakov Mikhail**

– undergraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, Mikhail.N.Shpakov@nw.rt.ru

**Muthanna Ammar**

– Candidate of Engineering Sciences, Assistant, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, ammarexpress@gmail.com

**Kirichek Ruslan**

– Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, kirichek@sut.ru

**Vladuko Andrey**

– Candidate of Engineering Sciences, IEEE member (M'14)), head of R&D department, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, vladuko@sut.ru