

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.18721/JCSTCS.12305
УДК 621.391

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ D2D В СОТОВЫХ СЕТЯХ

А.Я. Омётов¹, К.А. Жиданов², С.В. Беззатеев², Е.А. Кучерявый¹

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Повсеместные исследования в области беспроводной связи предлагают огромный спектр технологических инструментов для потенциального натурального моделирования и интеграции. Одно из перспективных направлений в данной области – применение прямых соединений между мобильными узлами в географической близости (D2D). В статье проанализированы коммуникационные сценарии, возникающие в сетях связи пятого поколения с использованием прямых D2D соединений между пользовательскими мобильными узлами. Предложен метод кластеризации мобильных узлов в физической и социальной близости. Проведено численное исследование задержек, агрегированного трафика и вероятности разрыва сессии для выявления эффектов, связанных с применением прямых соединений в сетях пятого поколения 5G. Показаны преимущества по сравнению с использованием классических инфраструктурных решений в случаях неполного сотового покрытия.

Ключевые слова: D2D, 5G, кластеризация, имитационное моделирование, беспроводная связь.

Ссылка при цитировании: Омётов А.Я., Жиданов К.А., Беззатеев С.В., Кучерявый Е.А. Перспективы использования технологии D2D в сотовых сетях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 58–66. DOI: 10.18721/JCSTCS.12305

ON THE UTILIZATION OF D2D TECHNOLOGY IN CELLULAR NETWORKS

A.Ya. Ometov¹, K.A. Zhidanov², S.V. Bezzateev², Y.A. Koucheryavy¹

¹ National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russian Federation;

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

Today, wireless research offers an enormous range of technologies for potential prototyping and real-life integration. One of the promising directions in this area is the utilization of proximity-based direct connections between mobile nodes (D2D).

This paper studies proximity-based D2D communication scenarios related to beyond 5G cellular networks. A method of clustering mobile nodes in physical and social proximity is proposed. Numerical evaluation of delays, aggregated traffic, and the session interruption probability is provided aiming to identify the effects associated with the use of direct connections in 5G networks. The advantages of using classic infrastructure solutions in cases of incomplete cellular coverage are also provided.

Keywords: D2D, 5G, clustering, simulation campaign, wireless communications.

Citation: Ometov A.Ya., Zhidanov K.A., Bezzateev S.V., Koucheryavy Y.A. On the utilization of D2D technology in cellular networks. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 58–66. DOI: 10.18721/JCSTCS.12305

Введение

Использование персональных мобильных устройств – неотъемлемая часть жизни из-за существования сравнительно надежной беспроводной сотовой связи. На сегодняшний день более 60 % населения России пользуются мобильным Интернетом. Согласно статистике, пользователи мобильного телефона активно взаимодействуют с устройством более трех часов в день, что составляет почти сутки в неделю [1].

Возрастающий объем мобильного трафика вызывает дополнительную нагрузку на современные широкополосные беспроводные системы. В частности, большая часть трафика состоит из созданных пользователями видео и изображений, которые распространяются в социальных сетях [2]. Чтобы эффективно справиться с растущей нагрузкой, современные сотовые технологии активно развиваются в направлении к своему пятому поколению (5G), охватывая более высокие несущие частоты, многоантенные системы и сверхплотные гетерогенные сети. Ожидается, что все эти и другие технологические инновации резко увеличат доступную пропускную способность сети в тысячу раз к 2020 году [3]. С другой стороны, прогресс в развитии мобильных устройств с более мощными вычислительными и коммуникационными возможностями позволяет ориентироваться на новые архитектуры, где интеллектуальное оборудование становится более вовлеченным в принятие решений о динамическом выборе технологии и типе связи наравне с сетевой инфраструктурой.

Ожидается, что более умные мобильные устройства, оснащенные большими интеллектуальными возможностями, различными радиомодулями и расширенными возможностями кэширования и противодействия помехам, будут играть более важную роль в управлении будущими сетями 5G. В частности, предполагается, что прямая связь между устройствами, находящимися в географической близости (D2D), в конечном итоге поможет эффективнее передавать пользовательскую информацию между соседствующими устройствами. Таким образом, контроль за соединениями может сместиться от централизованного центра к более распределенным системам связи.

Действительно, в то время как в унаследованных от телефонных сетей общего пользования системах все пользователи связываются исключительно через сетевую инфраструктуру, в эпоху современных коммуникаций пользователи часто обмениваются данными по беспроводной связи, в том числе и напрямую, минуя инфраструктуру.

Однако установка связи с учетом потребностей пользователей сильно отличается от централизованного управления тем, что она тесно связана с «социальным» поведением человека, а также может быть охарактеризована соответствующими потребностями пользователей. Исторически форумы и чаты были первой формой социальных сетей, основанных на стремлении людей свободно общаться. Позже они были дополнены множеством файлообменных систем, что привело к парадигме современных социальных сетей [4].

Сейчас новые возможности, такие как ориентированность на устройства (улучшенная локализация посредством GPS и сотовой связи), высокая осведомленность о контексте (с использованием различных сенсоров), множество технологий ближнего радиуса действия и повсеместный доступ к сети Интернет, позволили пользователям получать доступ к привычному контенту и без привязки к персональному стационарному компьютеру. В то же время человеку свойственно общаться в узком социальном кругу. Фактические взаимодействия людей и социальные отношения остаются в высокой степени локальными, организованными вокруг общего географического пространства. Однако социальные сети смещают чашу весов, перемещая своих пользователей из физических пространств в виртуальные. По сути, новые пространства состоят из людей, организованных в соответствии с определенными устойчивыми социальными группами, их конкретными моделями взаимодействия, которые демонстрируют социальные отношения.

Несмотря на то, что появление классических централизованных сотовых сетей оказало влияние на производительность и возможность подключения людей, также оно привнесло ряд ограничений и проблем для реальных социальных отношений. Основным препятствием для таких виртуальных сообществ и онлайн контактов является то, что люди не осведомлены о богатых социальных возможностях, доступных для них в реальном окружающем мире (например, новые возможности для знакомства, бизнеса и развлечений, коллективных игр, контекстных медиаданных). Кроме того, исследования показали, что удаленная связь препятствует живому общению «лицом к лицу» – самой традиционной и естественной форме социализации.

Таким образом, будущая связь 5G должна предоставлять эффективные средства для объединения физических и виртуальных миров, позволяя пользователям взаимодействовать с рекомендованными

людьми (например, людьми со схожими интересами) в географической близости, а также фактически участвовать в совместной деятельности в соответствии с личными предпочтениями. Это может не только повысить общий уровень взаимодействия между людьми, но и помочь с выявлением важных потенциальных контактов людей и их навыков или создать лучшее чувство общности в среде городов, где одиночество становится все более серьезной проблемой для современного человека.

В свете сказанного выше мы предполагаем, что прямая D2D связь на основе географической близости может решить проблемы социального характера в реальном времени, а также позволит обеспечить более гибкое управление сетями в городской среде.

В статье рассмотрены основные сценарии использования связи D2D. Предложена модель кластеризации пользователей на основании социальной и пространственной близости. В частности, проведено численное исследование работы классической инфраструктурной и D2D-расширенной сетей с точки зрения пропускной способности, задержки и вероятности прерывания сессии.

Основные сценарии использования технологии

Статистика использования современных беспроводных сетей показывает, что большая часть трафика приходится на загрузку популярного контента, такого как видео и мобильные приложения [5]. Поэтому пользователи в географической близости могут получить возможность загрузки популярных данных локально и непосредственно от своих «соседей», чтобы уменьшить общую нагрузку на инфраструктурные сети, что является преимуществом для сотовых операторов [6]. Также это выгодно для пользователей за счет применения более энергоэффективных технологий ближнего радиуса действия [7]. Тем не менее, технология D2D, хотя и изначально разрабатываемая для повышения агрегированной пропускной способности беспроводной связи за счет разгрузки сотового

трафика на нелицензируемый диапазон, превращается в одно из самых многообещающих нововведений на пути к сетям мобильной связи 5G, предоставляя новые сервисы и услуги. Далее приведем некоторые из наиболее популярных.

Обнаружение устройств/услуг в географической близости. D2D может содействовать в распространении данных идентификации пользователя для упрощения дальнейшего взаимодействия. D2D также может помочь в поиске новых социальных связей, т. е. людей, разделяющих схожие интересы, особенно при наличии соответствующих социальных рекомендаций. Эта категория в основном фокусируется на улучшении последующего взаимодействия с пользователем в различных сценариях и предоставляет средства для поиска ближайших партнеров D2D.

Совместное создание и распространение контента. Как следует из названия, D2D дает возможность пользователям загружать и обмениваться своим или уже скачанным контентом. Такие данные могут быть, например, созданы пользователем (фотографии, видео и т. д.) и могут относиться к определенному событию, на котором присутствуют другие пользователи.

Профессиональное и специальное применение. Данные приложения связаны с использованием технологии D2D в профессиональных целях или для нужд бизнеса. Например, это может потребоваться для быстрого и упрощенного установления соединения (передачи визиток, презентаций, и т. п.), а также для более критичных требований к безопасности, конфиденциальности и доверия. С точки зрения специального назначения, D2D может использоваться в случае отказа сотовой сети (когда сотовая инфраструктура становится частично или полностью недоступной), а устройства со специальным функционалом могут продолжать связь в случае чрезвычайной ситуации, используя связь D2D.

Проактивное взаимодействие. Важно отметить, что D2D также может использоваться для заблаговременного уведомления

пользователя об определенных событиях (близлежащие коммерческие предложения в торговых центрах, реклама на основе местоположения и т. д.) или даже осуществлять торговлю и обмен данными.

Локализованные контакты и медиа. D2D может помочь людям совместно участвовать в коллективных действиях и контактировать друг с другом с целью социализации и досуга. Эта категория также включает в себя множество приложений, работающих на основе определения местоположения, и, в первую очередь, предназначена для распространения контента во время мероприятий. Например, мгновенные повторы на спортивном матче могут быть переданы всем заинтересованным пользователям, находящимся в определенном радиусе.

Игровая индустрия. D2D имеет огромный потенциал для поддержки игровых сценариев с участием как находящихся поблизости людей, так и интерактивных объектов. Такие игры являются привлекательным занятием для людей, без необходимости явных социальных взаимодействий или идентификации других игроков. Вполне вероятно, что это приложение станет более распространенным при интеграции D2D.

Исходя из вышесказанного, технология D2D является сильным дополнением к уже существующим классическим инфраструктурным беспроводным сетям.

Модель системы

Рассмотрим набор мобильных узлов, каждый из которых передает данные на сервер в сети сотового оператора. На практике рассматриваемый смартфон может иметь несколько радиointерфейсов ближнего (например, BLE, WiFi) и дальнего (LTE) радиусов действия. Кроме того, предполагается, что этот узел может напрямую подключаться к другому узлу по D2D-каналу. Предполагается, что существует инфраструктурная сотовая сеть со всеми подключенными к ней узлами, некоторые из которых могут временно терять

соединение по различным причинам (слабое покрытие, нахождение в лифтах, подвалах и т. п.). Подробный обзор рассматриваемой архитектуры можно найти в [8]. Данные могут пересылаться по сотовой связи в сеть оператора и далее в соответствующее облако. В случае ненадежного сотового соединения данные могут передаваться другими ближайшими пользователями (реле), тогда как сами пользователи могут перемещаться в соответствии с определенной моделью мобильности.

Под коалицией будем понимать набор узлов, находящихся в географической близости, связанных между собой с использованием технологии ближнего радиуса действия. В зависимости от местоположения такой коалиции может быть рассмотрено несколько случаев, представляющих интерес. Коалиция может полностью находиться под покрытием сотовой сети, и для защиты данных, передаваемых по сотовой сети, могут использоваться традиционные процедуры защиты информации, т. е. в первом случае предполагается, что как процедуры безопасности, так и данные используют сотовый канал для распространения, в то время как во втором случае сотовая сеть отвечает только за процедуры безопасности (обмен данными осуществляется напрямую между смартфонами). В третьем случае как процедуры безопасности, так и потоки данных используют прямую связь между узлами.

Хотя предложенная структура предназначена для охвата всех обсуждаемых вариантов использования, последний из трех представляет особый интерес. Предоставление ближайшим пользователям возможности не только напрямую общаться в защищенном режиме, но и производить обмен данными при прерывистой связи с инфраструктурой, является одной из основных целей данного исследования. Как последний возможный случай, коалиция может оказаться полностью вне зоны действия сотовой сети. Однако поскольку в соответствии с концепцией D2D в сетях 5G управление инициализацией, работой и разрывом D2D соединений координирует-

ся сотовой инфраструктурой, последний случай не рассматривается в данной статье.

В рамках предлагаемой архитектуры и указанных выше сценариев, коалиции могут быть сформированы на основании двух параметров, связанных с «близостью». Во-первых, существует географическая близость мобильных узлов, что влияет на возможность формирования коалиций с учетом качества беспроводного канала. Под другим типом подразумевается «социальная близость» пользователей. Мобильное устройство может знать о своих предыдущих соединениях с мобильными пользователями, или, в качестве альтернативы, эта информация может быть получена из контактов, уже сохраненных на смартфоне. Далее мы покажем, как эта информация может эффективно применяться для повышения производительности системы с использованием алгоритма безопасности, представленного в работе [9], где впервые приведен метод социальной кластеризации пользователей с употреблением как пространственных, так и социальных метрик близости. Вкратце, формирование начальной коалиции может производиться при наличии соединения с сотовой сетью минимум у одного из узлов. Важно отметить, что при наличии такого соединения за этот процесс отвечает сама сотовая сеть, в то время как при полном отсутствии такого соединения D2D связь полностью организовывается в соответствии с протоколами децентрализованных сетей.

Под набором коалиций определим множество C , такое, что $C = \{C_1, \dots, C_k\}$, то есть это множество взаимно непересекающихся коалиций $C_i \subset N$ так, что $C_i \cap C_j = \emptyset$ для любого $i \neq j$. В случае, если в коалиции присутствуют все пользователи из N , $\bigcup_{i=1}^k C_i = N$, то обозначим N разделом Π от всего набора коалиций. Все пользователи имеют возможность вступить и покинуть коалиции.

Определим предпочтение \triangleright для сравнения двух $S \subseteq N$ ($L = \{L_1, \dots, L_N\}$) и ($Q = \{Q_1, \dots, Q_q\}$) для проверки принадлежности одинаковых узлов к двум набо-

рам, т. е. если L разделов в S предпочтительнее, чем Q разделов в S , то $L \succ Q$. Используемый порядок предпочтений основан на двух правилах.

1. Можно объединить любые наборы непересекающихся коалиций $C = \{C_1, \dots, C_K\}$ тогда и только тогда, когда из

$$\{U_{i=1}^k C_i\} \succ \{C_1, \dots, C_K\} \quad \text{следует, что}$$

$$\{C_1, \dots, C_K\} \rightarrow \{U_{i=1}^k C_i\}.$$

2. Можно разделить любую коалицию $\{U_{i=1}^k C_i\}$, если из $\{C_1, \dots, C_K\} \succ \{U_{i=1}^k C_i\}$ следует, что

$$\{U_{i=1}^k C_i\} \rightarrow \{C_1, \dots, C_K\}.$$

Важно, что предлагаемая структура учитывает влияние мобильности пользователей. Классические методы теории оптимизации рассматривают момент работы сети t , а затем нацелены на разработку практических алгоритмов для оптимизированной работы системы по отношению к определенной метрике. Такой подход не может напрямую оценивать мобильность пользователей, поскольку движение может вызвать значительные отклонения от оптимального решения в другое время $t + \Delta t$.

Численные результаты

Для оценки эффективности предлагаемого подхода произведено имитационное моделирование в среде Python. Рассматривалась сота 3GPP LTE с радиусом 100 м, где мобильные узлы случайно распределены по равномерному закону, а покрытие сотовой связи доступно лишь в 70 % пространства. Для моделирования мобильности была выбрана модель Леви с α равным 1,5 и скоростью пользователя, варьирующейся в диапазоне $[0,2; 2,0]$ м/с. Параметр α позволяет настроить форму распределений по размеру шага [10]. Иными словами, рассматривается 3GPP сценарий, который стандартизирован в разделе 5.2.4.3 спецификации 3GPP TS 36.304. Модель трафика соответствует передаче видео с невысокой интенсивностью входного потока и размером пакета 100 МБ. Максимальная дальность соеди-

нения D2D взята равной 30 м, а время установления соответствующего соединения – равным 1 с.

Система анализируется с точки зрения времени загрузки мультимедийного контента, а также максимального трафика узла, когда видео загружается по любому из каналов. Последней характеристикой взята вероятность прерывания сеанса связи между любыми двумя узлами. Таким образом, производится сравнительный анализ систем, работающих в инфраструктурном и D2D-расширенных режимах.

Рассмотрим характер суммарного трафика в системе в зависимости от количества пользователей (рис. 1 а) и скорости движения (рис. 1 б). Важно отметить, что предложенная система кластеризации демонстрирует значительное превосходство по сравнению с традиционным инфраструктурным решением. Это обусловлено возможностью подключения к коалиции пользователей, которые находятся также вне сотового покрытия. В этом случае дополнительный трафик генерируется в обмен на дополнительные задержки установления D2D соединений, что показано на рис. 2.

Исходя из рис. 2, мы можем наблюдать, что задержка линейно уменьшается с увеличением скорости узла, а также с увеличением количества пользователей. Это обусловлено тем, что увеличение скорости пользователя приводит к увеличению числа потенциальных D2D контактов между ними. Таким образом, пользователи могут загружать контент по D2D с более высокой скоростью передачи данных. Результаты исследования с точки зрения задержки можно сравнить с графиком 5 из работы [11]. Отметим, что в нашем сценарии используются системы с высоким входным потоком, таким образом можно обратиться к правой части графика, где входной поток соответствует 40 мс и более. Значения, приведенные в данной статье, подтверждают полученные результаты с точностью до единиц миллисекунд.

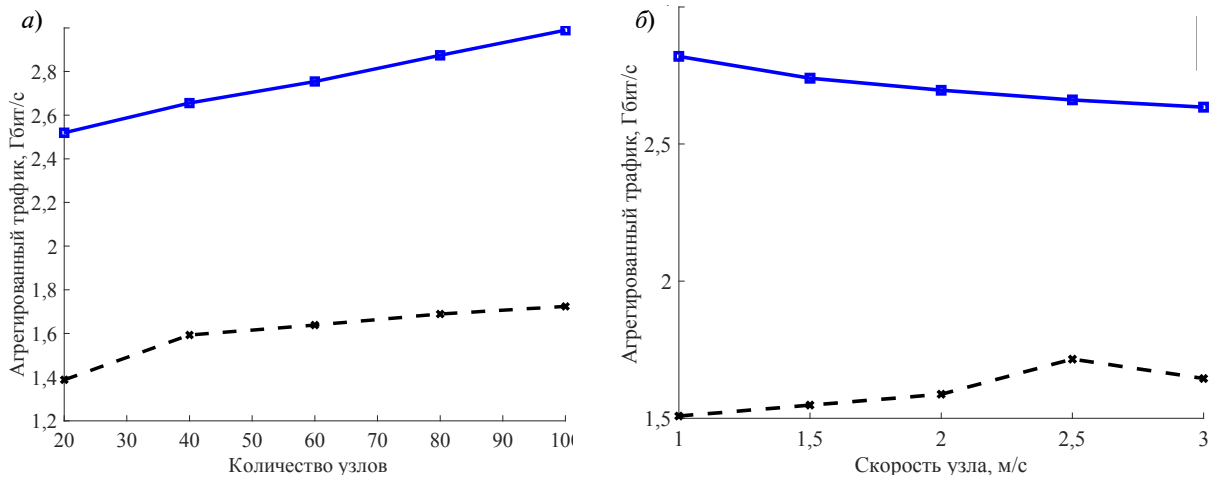


Рис. 1. Анализ агрегированного трафика: *a* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано 20 узлов

(—*) — передача через сотовую сеть; (—■) — передача с использованием D2D

Fig. 1. Aggregated traffic analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

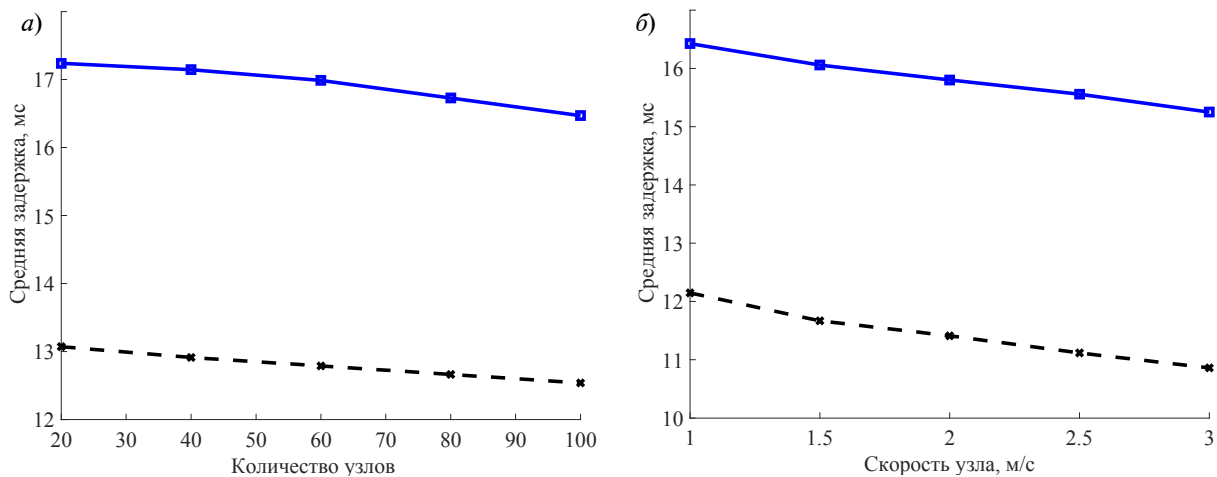


Рис. 2. Анализ средней задержки: *a* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано 20 узлов

(—*) — передача через сотовую сеть; (—■) — передача с использованием D2D

Fig. 2. Average delay analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

Наконец, вероятность разрыва сеанса связи приведена на рис. 3. Как видно из графиков, предлагаемый подход работает более эффективно по сравнению с обычным инфраструктурным решением. Объяснение снова заключается в том, что предлагаемая структура способна гарантировать возможность соединения, даже если пользователи не находятся в зоне покрытия сети. Как следствие, узлы получают более длительные сеансы связи

за счет дополнительной задержки: повышают вероятность получения желаемого контента. Сравнение результатов пропускной способности и вероятности разрыва сессии с существующими работами является проблематичным в силу специфики сценария (интеллектуальная кластеризация пользователей с использованием прямых соединений и сотового канала): из-за отсутствия в современной литературе соответствующего анализа.

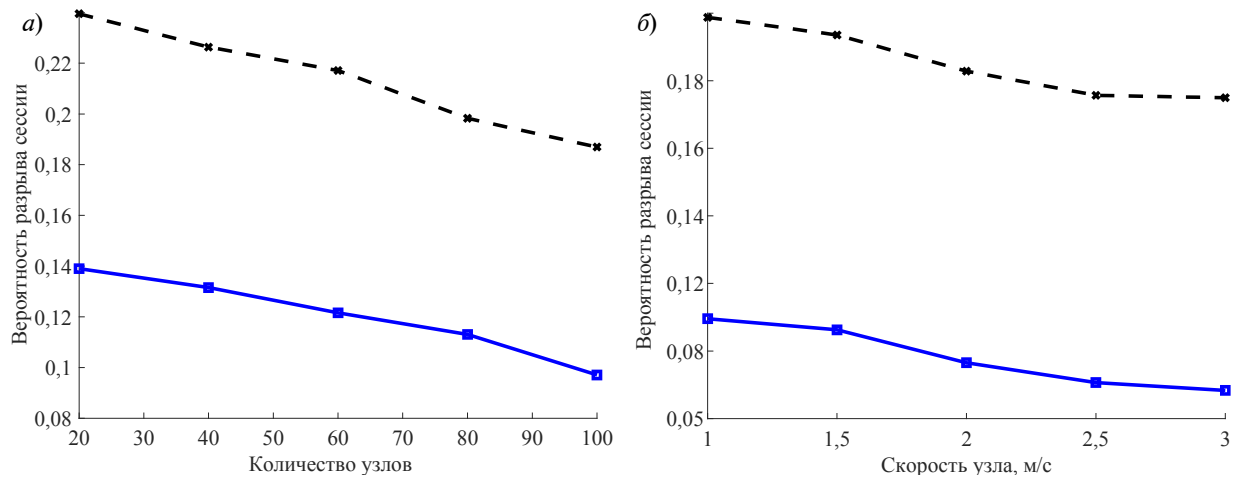


Рис. 3. Анализ вероятности разрыва сессии: *а* – зафиксирована скорость 1,5 м/с; *б* – зафиксировано количество узлов – 20

(—*) – передача через сотовую сеть; (—■) – передача с использованием D2D

Fig. 3. Session disruption probability analysis: *a* – fixed user speed 1.5 m/s; *b* – fixed number of users is set to 20

Подводя итог, можно заключить, что предлагаемая кластеризация, основанная на пространственной и социальной близости, значительно улучшает некоторые характеристики сети, представляющие интерес для характерных сценариев D2D.

Заключение

Предложенная методика кластеризации мобильных узлов на основании географической и социальной близости, работающих

с технологией D2D, позволяет получить значительный прирост агрегированного трафика в системе, что показано в данной статье с использованием имитационного моделирования. В частности, продемонстрировано, что получаемый положительный прирост суммарного трафика, а также снижение вероятности разрыва сессии также привносят дополнительные задержки, связанные с необходимостью установления прямого D2D-соединения между мобильными узлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asadi A., Wang Q., Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. No. 4. Pp. 1801–1819.
2. Araniti G., Orsino A., Militano L., et al. Context-aware information diffusion for alerting messages in 5G mobile social networks // IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 4. No. 2. Pp. 427–436.
3. Zhang B., Li Y., Jin D., Hui P., Han Z. Social-aware peer discovery for D2D communications underlying cellular networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2015. Vol. 14. No. 1. Pp. 177–190.
4. Person L., Gotsurve P. World LTE market – opportunities and forecasts, 2012–2020 // Allied Market Research, Report. 2014. IC 14144. P. 107.
5. Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., et al. Exploring synergy between communications, caching, and computing in 5G-grade deployments // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. No. 8. Pp. 60–69.
6. Ahmed E., Yaqoob I., Gani A., et al. Social-aware resource allocation and optimization for D2D communication // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24. No. 3. Pp. 122–129.
7. Militano L., Orsino A., Araniti G., Iera A. NB-IoT for D2D-enhanced content uploading with social trustworthiness in 5G systems // Future Internet. 2017. Vol. 9. No. 3. P. 31.
8. Gandotra P., Jha R.K., Jain S. A survey on device-to-device (D2D) communication: Architecture and security issues // J. of Network and Computer Applications. 2017. No. 78. Pp. 9–29.

9. **Омётов А.Я., Андреев С.Д., Левина А.Б. и др.** Обеспечение информационной безопасности прямых соединений 5G при изменении скорости движения абонентов и наличии сотового содействия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. No. 1.

10. **Brockmann D., Hufnagel L., Geisel T.** The scaling laws of human travel // *Nature*. 2006. No. 439. Pp. 462–465.

11. **Orsino A., Kovalchukov R., Samuylov A., et al.** Caching-aided collaborative D2D operation for predictive data dissemination in industrial IoT // *IEEE Wireless Communications*. 2018. Vol. 25. No. 3. Pp. 50–57.

Статья поступила в редакцию 23.07.2019.

REFERENCES

1. **Asadi A., Wang Q., Mancuso V.** A survey on device-to-device communication in cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, Vol. 16, No. 4, Pp. 1801–1819.

2. **Araniti G., Orsino A., Militano L., et al.** Context-aware information diffusion for alerting messages in 5G mobile social networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, Vol. 4, No. 2, Pp. 427–436.

3. **Zhang B., Li Y., Jin D., Hui P., Han Z.** Social-aware peer discovery for D2D communications underlying cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, Vol. 14, No. 1, Pp. 177–190.

4. **Person L., Gotsurve P.** World LTE market – opportunities and forecasts, 2012–2020. *Allied Market Research*, Report, 2014, IC 14144, P. 107.

5. **Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., et al.** Exploring synergy between communications, caching, and computing in 5G-grade deployments. *IEEE Communications Magazine*, 2016, Vol. 54, No. 8, Pp. 60–69.

6. **Ahmed E., Yaqoob I., Gani A., et al.** Social-aware resource allocation and optimization for D2D

communication. *IEEE Wireless Communications*, 2017, Vol. 24, No. 3, Pp. 122–129.

7. **Militano L., Orsino A., Araniti G., Iera A.** NB-IoT for D2D-enhanced content uploading with social trustworthiness in 5G system. *Future Internet*, 2017, Vol. 9, No. 3, P. 31.

8. **Gandotra P., Jha R.K., Jain S.** A survey on device-to-device (D2D) communication: Architecture and security issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, No. 78, Pp. 9–29.

9. **Ometov A., Andreev S., Levina A., et al.** On information security solutions applicable to D2D communications within 5G domain: Analyzing the influence of user mobility. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, Vol. 17, No. 1. (rus)

10. **Brockmann D., Hufnagel L., Geisel T.** The scaling laws of human travel. *Nature*, 2006, No. 439, Pp. 462–465.

11. **Orsino A., Kovalchukov R., Samuylov A., et al.** Caching-aided collaborative D2D operation for predictive data dissemination in industrial IoT. *IEEE Wireless Communications*, 2018, Vol. 25, No. 3, Pp. 50–57.

Received 23.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ОМЁТОВ Александр Ярославич

OMETOV Aleksandr Ya.

E-mail: aometov@hse.ru

ЖИДАНОВ Константин Александрович

ZHIDANOV Konstantin A.

E-mail: konstantin.zhidanov@gmail.com

БЕЗЗАТЕЕВ Сергей Валентинович

BEZZATEEV Sergey V.

E-mail: bsv@aanet.ru

КУЧЕРЯВЫЙ Евгений Андреевич

KOUCHERYAVY Yevgeni A.

E-mail: ykoucheryavy@hse.ru