

DOI: 10.18721/JCSTCS.11202

УДК 004.77

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЯМЫХ СОЕДИНЕНИЙ D2D С СОТОВОЙ ПОДДЕРЖКОЙ LTE

А.В. Пяттаев¹, С.Д. Андреев¹, Е.А. Кучерявый²

¹ Российский университет дружбы народов,
Москва, Российская Федерация;

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Российская Федерация

Ввиду популярности мобильных пользовательских приложений операторы сотовой связи все чаще сталкиваются с задачей разгрузки своего ограниченного лицензированного спектрального ресурса. Применение для этих целей технологий радиодоступа, функционирующих в нелицензированном спектре, является привлекательным для сокращения соответствующих затрат. В статье описана система прямых соединений D2D в нелицензированной полосе частот на основе технологии WiFi Direct для разгрузки мобильного трафика, обслуживаемого сотовой системой LTE. Разработан протокол обеспечения сетевой поддержки соединений D2D со стороны архитектуры сети LTE, а также произведено имитационное моделирование на системном уровне для выявления соответствующего повышения эффективности управления трафиком. Описаны испытания связи D2D на модельной сети LTE.

Ключевые слова: мобильный трафик, сотовая связь LTE, прямые соединения с поддержкой сети, технология WiFi Direct, исследование и внедрение.

Ссылка при цитировании: Пяттаев А.В., Андреев С.Д., Кучерявый Е.А. Разработка и исследование системы прямых соединений D2D с сотовой поддержкой LTE // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11. № 2. С. 19–34. DOI: 10.18721/JCSTCS.11202

DESIGN AND EVALUATION OF A SYSTEM OF DIRECT D2D CONNECTIONS WITH LTE CELLULAR ASSISTANCE

A.V. Pyattaev¹, S.D. Andreev¹, Ye.A. Koucheryavy²

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation;

² National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation

Due to the growing popularity of mobile user applications, cellular network operators are increasingly interested in offloading their scarce licensed spectrum resources. To this aim, using unlicensed-band radio technologies is attractive owing to its reduced costs. This work designs a system of direct D2D (device-to-device)

connections to offload mobile traffic that is served by LTE (long-term evolution) cellular networks. In particular, a network assistance protocol over LTE architecture is proposed for D2D connections, and its system-level performance is evaluated to quantify the resulting traffic-steering efficiency. In addition, practical operation of D2D communication in a test LTE network is described, which allows making substantiated conclusions about the actual feasibility of the proposed solution in real-life conditions.

Keywords: mobile traffic, LTE cellular communication, direct connections with network assistance, WiFi Direct radio technology, design and evaluation.

Citation: Pyattaev A.V., Andreev S.D., Koucheryavy Ye.A. Design and evaluation of a system of direct D2D connections with LTE cellular assistance. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2018, Vol. 11, No. 2, Pp. 19–34. DOI: 10.18721/JCSTCS.11202

Введение и обзор литературы

Лицензированный беспроводной спектр продолжает оставаться крайне ограниченным и дорогим. Поскольку имеющегося спектра уже недостаточно для удовлетворения существующего спроса со стороны операторов мобильной связи, предпринимаются попытки лицензировать дополнительный спектральный ресурс [1]. Поэтому использование прямых соединений между пользовательскими устройствами (device-to-device – D2D) в нелицензированной полосе частот для целей выгрузки мобильного трафика исключительно важная задача. При этом нелицензированные спектральные ресурсы не могут быть зарезервированы только для целей D2D и, следовательно, соединения D2D должны использовать их совместно с существующими услугами беспроводного доступа.

Расширенное управление интерференцией с контролем доступа и мощности [2] требуется для поддержки нескольких соединений D2D на одном и том же канале. Исследовательские работы (например, [3–5]) предлагают способ контроля интерференции, использующий информацию о состоянии канала в реальном времени, местоположении пользователя, а также о состоянии среды передачи. При этом схема управления интерференцией должна решить, как поступить с каждым соединением D2D:

разделять общие ресурсы лицензированной полосы со стандартными сотовыми передачами (между пользователями и базовыми станциями) и испытывать интерференцию;

использовать выделенные ресурсы и стремиться обеспечить их эффективное использование;

оставаться в рамках сотовой инфраструктуры.

Данный процесс, известный также как *выбор режима*, привлек внимание исследователей, сфокусировавшихся на широком круге оптимизационных задач для таких показателей, как отношение сигнала и помехи к шуму (SINR) [6], пропускная способность [7], энергетическая эффективность [8], задержка передачи данных [9], справедливое распределение ресурсов и вероятность отказа [10]. Большинство этих исследований рассматривало D2D-технологии в лицензированном спектре в системах долгосрочной эволюции 3GPP LTE (long-term evolution) [11, 12].

С другой стороны, оператор не может обеспечить эксклюзивного использования какого-либо нелицензированного спектра. В результате интерференция становится непредсказуемой, что требует надежного контроля доступа к среде, способного справиться с данной проблемой. Например, были разработаны технологии Bluetooth и WiFi, которые становятся все более популярными в беспроводных персональных и локальных сетях (WPAN/WLAN). Основанное на стандартах IEEE 802.11 решение WiFi в настоящее время является преобладающим для подключения пользовательских устройств [13].

Однако поскольку WiFi не имеет гаран-

тированного контроля доступа, эту технологию часто критикуют за то, что она не всегда удовлетворяет требованиям по качеству обслуживания QoS [14]. Тем не менее, WiFi обеспечивает более высокие скорости передачи данных и энергоэффективность, чем любая из сотовых технологий. В принципе, при наличии соответствующих методов управления, для WiFi-соединения можно добиться стабильных результатов работы [15]. С увеличением количества соединений D2D и персональных сетей, в том числе построенных на более современной технологии WiFi Direct, такое управление становится необходимым.

В результате сотовые сети могут обеспечить интеллектуальное управление радиоресурсами, а также столь необходимую анонимность при обслуживании. Если пользовательские устройства постоянно связаны с сотовой сетью, она может предложить резервное соединение, когда для нелицензированной передачи QoS оказывается неудовлетворительным. Кроме того, при поддержке со стороны сотовой сети аутентификация устройств и безопасность линии D2D могут быть значительно улучшены, что, например, делает любой вид атаки «человек посередине» практически невозможным. Другими словами, наличие поддержки со стороны сотовой сети для D2D-соединений на нелицензированных частотах так, как это предлагается, например, в [16], представляется крайне перспективным подходом.

Архитектурная реализация системы прямых соединений

Как было сказано выше, для сотовых операторов желательной является выгрузка мобильного трафика в сеть D2D нелицензированного спектра как конкурентное решение с LTE- и WiFi-линиями для мультирадиоустройств. При этом ни WiFi, ни WiFi Direct (WFD) не располагают быстрыми и эффективными методами обнаружения устройств/услуг, а также не имеется простого способа внедрения D2D-взаимодействий вследствие очень коротких расстояний между устройствами. Наконец, анонимность прямых соединений остается

открытой задачей для решений D2D в нелицензированном спектре. С целью преодоления этих ограничений далее предлагается новая архитектура для внедрения поддерживаемых сетью D2D-решений.

Схема работы при обслуживании соединений D2D. Для начала определим, какие именно услуги должны быть обеспечены для конечного пользователя. Естественно, очень сложно гарантировать какие-либо адекватные условия передачи для D2D-линий, а качество обслуживания для таких соединений может существенно отличаться в различные моменты времени и в связи с перемещением пользователей. Поэтому услуги, толерантные к задержкам, такие как распределенное кэширование и кооперативная передача, могут рассматриваться как первые кандидаты на выгрузку трафика. Однако наиболее интересными для мобильных пользователей представляются услуги по запросу, требующие стабильных линий высокого качества и, таким образом, никогда не предполагавшиеся для случая использования D2D-технологий.

Тем не менее, если устройства находятся близко друг к другу и можно предсказать достаточно стабильный уровень качества связывающей их линии, многие запрашиваемые услуги становятся реализуемыми. На коротком промежутке времени работы приложения, такие как потоковое видео, игры со многими участниками и т. п., могут быть предоставлены посредством D2D-линий. Чтобы сделать эти услуги коммерчески привлекательными, необходимы определенные гарантии QoS, а также способы определения того, в какой мере выполнены предварительные условия для использования D2D.

Поэтому критически важные требования к разработке архитектуры сети D2D состоят в предоставлении пользователям знания о том, когда можно устанавливать D2D-соединения, с кем, какой контент доступен, и что делать, если почему-то нет возможности поддерживать QoS. Для этого, в частности, должна быть предусмотрена поддержка следующих функций:

- идентификации цели взаимодействия (хранение и поиск файловых и потоковых

данных, идентификация участников игры и т. д.);

- поиска ближайших партнеров, проявляющих интерес к контенту;
- аутентификации и авторизации для целей передачи контента;
- поддержки *надежного* дублирования при отказе D2D-линии.

Технически нахождение пары, имеющей подходящий контент, не является сложной задачей вследствие широкого распространения облачных и социальных сетей. Важнейшая проблема состоит в том, что соединение, которое еще не установлено, не может быть представлено традиционным образом: нет ассоциированных с ним интерфейсов, нет IP-адресов и т. д. Естественный выход из такой ситуации — необходимость создания нового объекта, специально разработанного для управления D2D-линией и принятия решений в реальном времени, основанных на позиционировании и доступности радиоресурсов. Поскольку такая информация в системе управления связью собирается только оператором, этот объект должен быть частью операторской сети.

С другой стороны, программные интерфейсы для приложений (API) доступны только провайдеру услуг. Тогда провайдер и оператор должны организовать взаимодействие для предоставления комплексных услуг пользователю. Это наиболее естественный интерфейс между двумя различными технологиями: специфичными возможностями контроля линии (управляемой по запросу сервером D2D, являющимся частью транспортной сети) и специфическими возможностями отслеживания контента (управляемого по запросу сервером приложений). Предложенное в данной статье решение (рис. 1) функционирует следующим образом:

1. Каждое пользовательское устройство применяет возможности уровня приложений для аутентификации с сервером приложений (например, Facebook). Это позволяет обеспечить взаимодействие с контентом, который авторизуется третьей стороной, а также устраняет требования по обработке метаданных и предоставляет возможность авторизации со стороны социальных сетей.

2. Пользовательское оборудование (user equipment — UE) позволяет серверу D2D своего оператора представлять его на сервере приложений при организации D2D-соединений. При этом сервер D2D никогда не получает доступ к контенту или его метаданным: осуществляется лишь аутентификация пользователя, чтобы убедиться, что устройство действительно принадлежит владельцу заявленных учетных данных уровня приложения. Таким образом, сервер D2D позволяет присваивать имена прикладного уровня физическим устройствам, в том числе и в случае, когда имеется несколько устройств, принадлежащих одному и тому же лицу.

3. Пользовательское устройство может публиковать или искать линии для передачи контента на сервере приложений, и эти линии будут ссылаться на конкретный контент некоторого пользователя (но не устройства). Линии могут быть постоянными, ограниченными по времени или одно-разовыми в зависимости от целей приложения.

4. Пользователь запрашивает сервер D2D перед созданием прямого соединения, чтобы обеспечить линию на уровне приложений, а сервер приложений преобразует этот запрос в фактическое соединение на уровне линии и обеспечивает IP-адрес, к которому могут быть привязаны сокет.

5. Наконец, может производиться обмен данными. Заметим, что сервер приложений не участвует в этом процессе и не отслеживает обмен контентом непосредственно, лишь удостовераясь в том, что линии следуют модели безопасности, не принимая участия в их локальном управлении. Сервер D2D при этом может осуществлять мониторинг и регулировать свойства D2D-линии при необходимости и в зависимости от его функций.

Далее кратко рассмотрим те особенности предложенной схемы, которые делают ее приемлемым решением с точки зрения безопасности для поддерживаемой сотовой сетью связи D2D.

Каждое соединение начинается с проверки контента линии. Потенциальным злоумышленникам необходимо будет по-

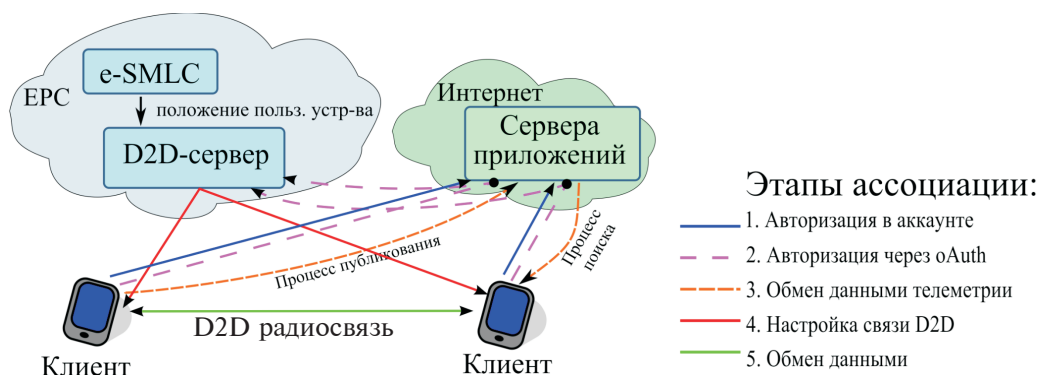


Рис. 1. Поддержка сети при создании D2D-линии

лучить доступ к серверу приложений для получения свойств такой линии. Поэтому любая атака на систему по существу блокируется одноразовым паролем, распространяемым сервером приложений через существующие защищенные каналы.

Ни одно из пользовательских устройств не должно широкоэмитивно транслировать никакую информацию об обнаружении или прослушивать запросы на обнаружение. Поскольку устройства поддерживают свои

радиоинтерфейсы D2D выключенными до тех пор, пока не будет получена соответствующая команда активации, они не могут быть атакованы или отслежены до того, как перейдут в активное состояние.

Интеграция с сотовой архитектурой 3GPP. Подчеркнем, что предложенный выше протокол является рабочим решением и не претендует на оптимальность. Он в значительной степени опирается на существующие решения, такие как OAuth и

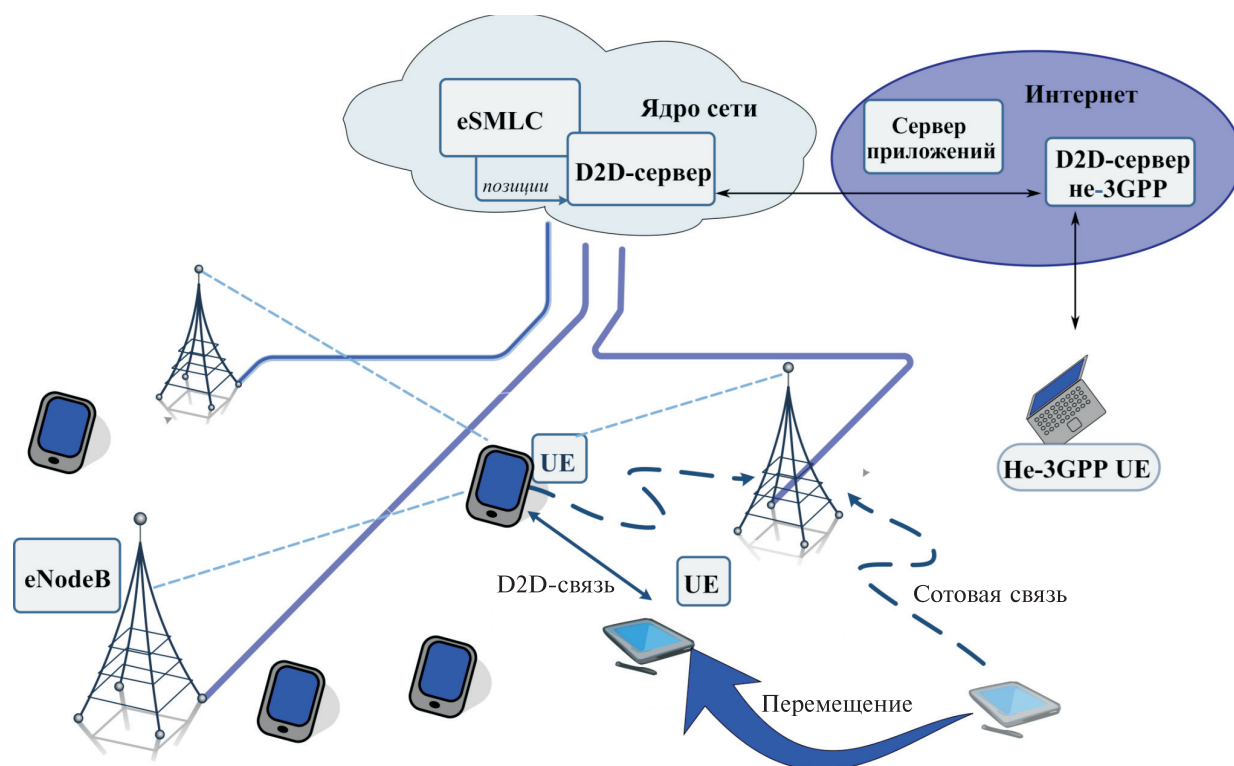


Рис. 2. Предложенное размещение сервера D2D в архитектуре 3GPP

SSL, для авторизации на сервере D2D при управлении соединениями и передаче команд, соответственно. Кроме того, протокол предполагает, что серверу D2D всегда можно доверять только потому, что он находится в сети оператора. Поэтому на практике необходимо оценить потенциальные риски безопасности в конкретных случаях, когда применяется связь D2D с поддержкой со стороны сотовой сети.

Далее сосредоточимся на вопросах интеграции системы с существующими сетевыми архитектурами. Благодаря гибкости ядра сети 3GPP относительно легко выполнить интеграцию сервера D2D в существующую архитектуру 3GPP LTE. На рис. 2 показано, как подобная интеграция может быть осуществлена.

Предложенная в данной статье схема может быть сопоставлена с объектами архитектуры 3GPP практически полностью, с единственным дополнительным объектом – сервером D2D, находящимся в EPC-фрагменте сети. Такое размещение позволяет серверу D2D связываться с центром определения местоположения (SMLC) для позиционирования пользовательского устройства, а также эффективно взаимодействовать с серверами приложений внешних провайдеров и операторов.

Фактически протокол для выгрузки трафика на соединения D2D на сегодняшний день уже является частью стандартов 3GPP. При этом некоторые детали стандартизованного решения 3GPP отличаются от первоначально предложенных нами. В частности, поток сообщений, описанный в документах 3GPP, не учитывает пробле-

мы взаимодействия с серверами приложений, поскольку это выходит за рамки работы 3GPP.

Исследование выгрузки трафика на прямые соединения

В данном разделе вводятся сетевые объекты и соответствующие механизмы, которые требуются для поддерживаемой со стороны сотовой сети технологии WiFi Direct. Далее предлагается описание разработанной системы имитационного моделирования, которая может использоваться для широкого класса перспективных приложений D2D и моделей трафика.

Подход к анализу эффективности работы.

В настоящей статье беспроводная сеть представляется как система, состоящая из ряда объектов, имеющих возможность поддерживать различные радиотехнологии (рис. 3).

Рассмотрим сеть 3GPP LTE, представленную базовыми станциями E-UTRAN NodeB (eNB). Каждая базовая станция связана с ядром сети, обеспечивающим сотовый доступ для всех беспроводных устройств, ассоциированных с сетью.

Любая базовая станция eNB доступна ряду мультирадиопользовательских устройств, каждое из которых имеет возможность взаимодействовать как с LTE, так и с WiFi. Каждому клиенту доступны возможности управления, реализуемые координатором уровня доступа (MAC), представляющим собой коммутатор потоков трафика. В зависимости от рекомендаций координатора, клиент может воспользоваться для передачи данных интерфейсом LTE или WiFi.

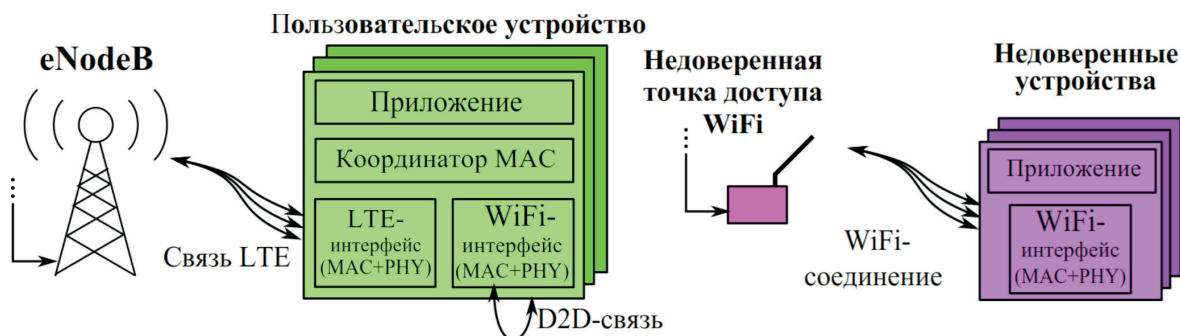


Рис. 3. Диаграмма объектов рассматриваемой сети

Необходимо также принимать во внимание интерференцию от устройств WLAN в нелицензированном спектре, которые могут быть расположены в непосредственной близости от точек доступа WiFi. В соответствии с принципами построения сетей WiFi, эти устройства имеют равные права с мультирадиоклиентами сети с точки зрения доступа к канальным ресурсам. В то же время они не могут быть ассоциированы с сотовой сетью, а значит их функционирование на нелицензированных частотах не может контролироваться или отслеживаться сетью LTE. Они именуются здесь «блуждающими» устройствами.

В соответствии с методологией исследований, заданной рекомендациям 3GPP в [17], предположим, что N клиентов LTE (которые в рассматриваемом случае имеют также возможность использования связи D2D) расположены равномерно в зоне покрытия сети. Плотность устройств выбирается достаточно высокой, так что каждый клиент в зоне действия связи D2D имеет возможность прямого соединения по крайней мере еще с одним клиентом. Однако только половина устройств может служить источниками данных и передавать трафик, поскольку прямые взаимодействия являются однонаправленными. При этом для каждой сессии существует только один источник и один получатель данных.

Такой трафик моделируется как насыщенный буфер с пакетами длиной 1500 байт каждый. Далее вместо моделирования некоторого распределения контента и запросов клиентов предполагается, что определенный процент устройств-источников x в радиусе действия D2D соединяется с соответствующими устройствами-получателями данных. Блуждающие устройства, предоставляющие другим пользователям «тяжелый» контент, также представляются моделью заполненного буфера с пакетами длиной 1500 байт, направляемыми к своей точке доступа. Для моделирования нисходящего трафика откорректируем число блуждающих устройств, чтобы получить некоторый уровень конкуренции на нелицензированных частотах.

Имитационное моделирование системы D2D. Для проведения исследований рассматриваемой системы разработан имитатор системного уровня (system-level simulator — SLS), базирующийся на методологии LTE, приведенной в TR 36.814 [17] и других документах 3GPP, а также в спецификациях IEEE для оценки производительности беспроводных сетей [18] и в текущих стандартах IEEE 802.11. Имитатор представляет собой гибкий инструмент, который может поддерживать различные способы построения сетей, модели трафика, характеристики каналов и беспроводные протоколы. Он позволяет моделировать существующую инфраструктуру системы LTE и требуемое размещение клиентов.

Для каждого устройства предусмотрен собственный выделенный генератор трафика, позволяющий варьировать его показатели. Каналы моделируются с учетом соответствующих характеристик источника, получателя и среды распространения. Каждый узел способен поддерживать несколько радиointерфейсов, которые могут использоваться для восходящих и нисходящих соединений и моделируются при этом в пределах единой временной шкалы. Этот имитатор был изначально предназначен для широкого круга задач и может рассматриваться как расширяемая система, подходящая для поддержки различных сценариев D2D и сотового взаимодействия.

Для оценки характеристик WiFi Direct с поддержкой от сотовой сети рассмотрим следующий сценарий, основанный на рекомендациях 3GPP при развертывании сетей в городских условиях. Сеть LTE включает в себя 19 шестиугольных сот с тремя секторами в каждой. Базовые станции eNB поддерживают технологические решения 3GPP LTE, расстояние между близлежащими базовыми станциями составляет 200 м, а радиус соты равен примерно 110 м. Все соты работают в одном и том же лицензированном спектре с полосой частот 60 МГц, которая разделена на три пары полос по 10 МГц для функционирования в режиме FDD.

Каждая сота, в свою очередь, разделена

на три сектора, и каждому сектору выделена пара полос по 10 МГц, что приводит к шаблону повторного использования частот 1х3х3. Клиенты 3GPP LTE связываются с базовой станцией eNB на основе наилучшего значения DL SINR с порогом переключения в 1 дБ. Для получения дополнительной информации о стандартной конфигурации LTE можно обратиться к табл. 1 и соответствующим документам по стандартизации (например, TR 36.814-900 и M.2135-1). Для целей проверки производительности также реализован сценарий калибровки по 3GPP

TR 36.814-900, табл. A-2.1 и проведены соответствующие тесты.

Далее будем полагать, что все точки доступа WiFi и относящиеся к ним клиенты (т. н. «блуждающие устройства») выполнены по одной и той же технологии IEEE 802.11-2012. Для того чтобы моделировать реальные сетевые структуры, такие устройства должны располагаться вокруг соответствующих точек доступа. Точки доступа могут размещаться повсеместно: в кафе, на транспорте, в магазинах, в торговых центрах и т. д. Расстояние от устрой-

Таблица 1

Основные параметры имитационного моделирования

Параметр	Значение/источник
Основные параметры	
Предел мощности устройства при конкуренции	23 дБм на интерфейс
Модель мобильности	Случайное направление движения, 3 км/ч
Период наблюдения	10 с
Система LTE	
Модель затухания	ITU-R M.2135-1 [19], табл. A.2.2-1, A1-3
Модель замираний	ITU-R M.2135-1 [19], разд. 1.3.1.1
Доступ к среде	Кольцевое расписание
Управление мощностью и скоростью передачи	SINR, целевое значение в 15 дБ
Частотные ресурсы	10 + 10 МГц FDD в каждом секторе, короткий CP
Режим сигнализации	2 из 20 специальных подкадров, кадр 10 мс
Радиооборудование	ITU-R M.2135-1 [19], табл. 8-4
Конфигурация антенны	1x2 (разнесенный прием на базовой станции eNB)
Система WiFi	
Модель затухания	Эмпирическая, основана на [20]
Модель замираний	Только корреляция, основана на [21]
Доступ к среде	CSMA/CA, мягкий порог -76 дБм
Управление мощностью и скоростью передачи	SINR, целевое значение 25 дБ
Частотные ресурсы	20 МГц TDMA
Режим сигнализации	Отдельный, контрольная скорость 18 Мб/с, RTS/CTS
Радиооборудование	Порог шума -95 дБм
Конфигурация антенны	1x1 (простая антенна)

ства до его точки доступа ограничено максимально допустимыми потерями в канале. Предположим при этом, что точки доступа и устройства не изменяют своего положения во время моделирования.

Рассмотрим случай, когда число блуждающих устройств равно максимально возможному числу активных D2D-соединений, поэтому такие устройства могут задействовать около половины имеющихся системных ресурсов в условиях максимальной выгрузки трафика. Проводимое исследование предполагает, что все WiFi-соединения используют один и тот же частотный диапазон и должны уступить любой активной передаче данных, для которой мощность превышает установленный порог. Для получения дополнительной информации о конфигурации сетей WiFi приведем табл. 1, основанную в том числе на документации драйвера с открытым исходным кодом Atheros.

Результаты проведенного моделирования.

Для того чтобы получить наиболее полную информацию о преимуществах от выгрузки сотового трафика на соединения D2D (WiFi Direct), проанализируем производительность WiFi Direct с сетевой поддержкой при различных уровнях интерференции. Не будем отдавать предпочтение моделированию какого-либо конкретного вида трафика, а вместо этого рассмотрим

различную плотность клиентских устройств, чтобы понять, как выгрузка трафика на WiFi Direct функционирует при различной загрузке. Для этого будем изменять процент WiFi Direct соединений от нуля до 30 %. Основываясь на текущей статистике трафика и поведении клиентов, будем считать маловероятным, чтобы более 30 % из них находились в пределах досягаемости D2D других клиентов.

Результаты для общей пропускной способности представлены на рис. 4. В частности, приведены уровни пропускной способности LTE и WiFi Direct в сумме на соту, основываясь на ассоциации источников данных с сотами. Видно, что выгрузка трафика LTE на линии D2D приводит к значительному увеличению пропускной способности соты, фактически удваивая ее при 30 % уровне выгрузки. Однако, если присутствуют блуждающие устройства, прирост пропускной способности более скромный, но он все еще составляет почти 50 % при том же уровне выгрузки трафика в 30 %.

Энергетическая эффективность обычно измеряется в битах на Джоуль и, следовательно, существенно зависит от свойств конкретной радиотехнологии. Поскольку энергетические показатели устройств, как правило, специфичны для их поставщиков, используем коэффициенты из табл. 2, которые не основаны на какой-либо конкретной

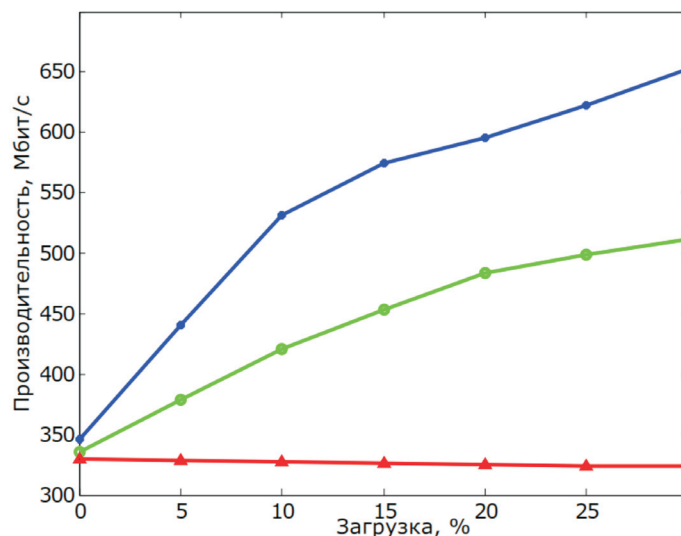


Рис. 4. Общая пропускная способность (сумма по LTE и WiFi)
 (—●—) D2D, без блуждающих устройств; (—●—) D2D, с блуждающими устройствами; (—▲—) LTE

Таблица 2

Нормированные затраты энергии

Режим функционирования	Система LTE	Система WiFi
Ожидание	0	0
Состояние покоя	0,1	0,1
Прослушивание	—	0,25
Прием данных	0,5	0,5
Передача данных	1,0	1,0

реализации. Зависимости для соответствующих значений энергетической эффективности, приведенные на рис. 5, ясно показывают, что использование WiFi значительно эффективнее по сравнению с LTE.

В частности, энергетическая эффективность WiFi более чем в четыре раза превосходит LTE в рамках рассматриваемой модели энергопотребления. Это во многом связано с более высокой скоростью передачи данных по WiFi. Кроме того, пользователям систем длительной эволюции LTE выделяются небольшие частотные фрагменты в нескольких временных слотах, поэтому их приемопередатчики должны оставаться активными в течение длительных интервалов времени, тогда как фактическая скорость передачи данных относительно мала. Для сравнения, протокол MAC WiFi активирует передатчик только тогда, когда он факти-

чески обращается к каналу и каждый раз использует всю полосу пропускания.

Даже когда у пользователей WiFi возникают задержки доступа к каналу из-за сообщений RTS или CTS, их устройства могут погрузиться в режим сна в течение этих периодов времени. В итоге только несколько радиointерфейсов WiFi в сети полностью задействованы в любой момент времени, и все они либо передают, либо получают данные. Результаты моделирования показывают, что время доступа к среде (т. е. время, которое пакет проводит в буфере уровня MAC и ниже) в отсутствие блуждающих устройств иногда оказывается даже меньше, чем у LTE (рис. 6). Это связано, прежде всего, с тем, что в LTE скорость передачи данных значительно ниже.

Когда блуждающие устройства присутствуют, ситуация более выгодна для LTE,

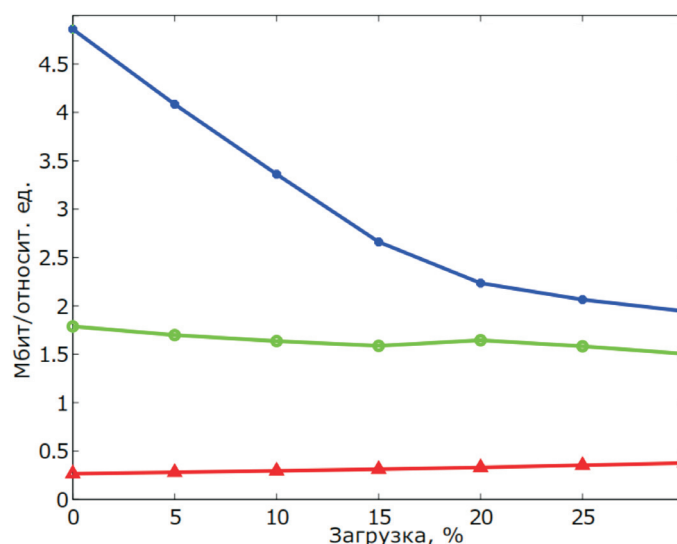


Рис. 5. Энергетическая эффективность
(—●—) D2D, без блуждающих устройств; (—●—) D2D, с блуждающими устройствами; (—▲—) LTE

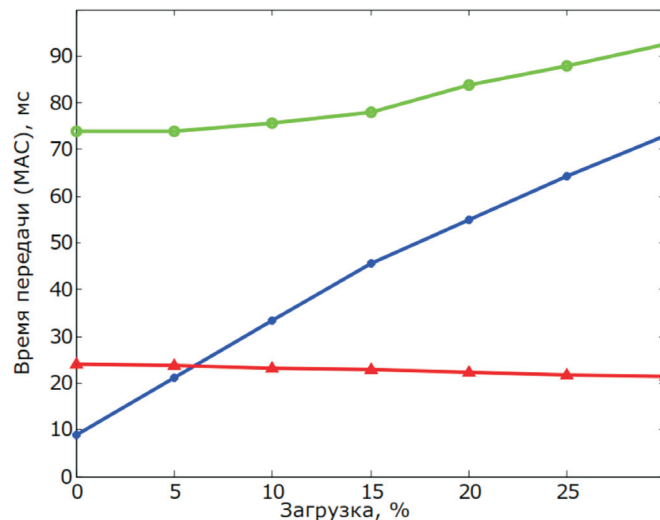


Рис. 6. Среднее время доступа к среде
(—●—) D2D, без блуждающих устройств; (—●—) D2D, с блуждающими устройствами; (—▲—) LTE

однако значительного ухудшения работы не наблюдается, как и прежде с пропускной способностью, поскольку выгружается все больше и больше трафика. Таким образом, в условиях активной интерференции выигрыш от использования связи D2D менее заметен, но все равно полностью оправдывает выгрузку трафика.

Внедрение и испытания связи D2D на модельной сети

В этом разделе рассмотрим некоторые основные особенности разработки, которая делает предложенную систему выгрузки трафика на соединения D2D с сетевой поддержкой достаточно реалистичной для интеграции с сотовыми сетями и Интернетом. На сегодняшний день ключевые аспекты протокола и сервисная архитектура уже являются частью версий 12 и 13 стандарта 3GPP LTE. В данной связи разработан прототип технологического решения для выгрузки трафика при поддержке сотовой сети, включающий в себя три основных компонента:

- 1) обслуживание на клиентской стороне, которое функционирует в фоновом режиме на пользовательских устройствах;
- 2) базу данных контента, поддерживающую хранение контента и управление доступом к нему;
- 3) сервер D2D, который также выполняет функции ProSe, управляет соединениями

и координирует их.

База данных контента представляет собой веб-платформу, предоставляющую услуги по обмену данными своим пользователям. Примером служат социальные сети, такие как Facebook, Google+ и YouTube. Сервер ProSe предназначен для оператора сотовой сети и/или поставщика услуг Интернет (ISP). Следует отметить, что альтернативно предложенной архитектуре аналогичная услуга может быть предоставлена и когда оба объекта управляются оператором. Однако при этом перенос пользователей из известных социальных сетей на новую платформу может быть более сложной задачей. Предложенное решение показывает, что база данных контента и сервер ProSe легко интегрируются в бесшовной форме в существующую инфраструктуру веб-обслуживания и не требуют каких-либо решений, которые не вписывались бы в традиционную веб-парадигму.

В испытаниях на модельной сети использовались телефоны Sony Xperia ZL с Android OS, а также Samsung Galaxy S4. Одной из основных функций, необходимых для пользовательского оборудования, была поддержка сотовых и WiFi-соединений одновременно. Из-за ограничений в потреблении энергии большинство систем избегают такой функции, поэтому необходимо было обойти систему управления

услугами на базе Android WiFi и напрямую взаимодействовать с драйвером WiFi. Аналогично GNU Linux Android предоставляет необходимые инструменты: интерфейс *wpa_supplicant*, управляемый с помощью утилиты *wpa_cli*. К сожалению, имеющиеся прошивки не позволяют получить доступ к этим утилитам даже для разработчиков, и поэтому использовалась модифицированная прошивка Cyanogenmod.

В качестве модельной сети использовалась экспериментальная сотовая система, развернутая департаментом телекоммуникаций Технологического университета

г. Брно (BUT), Чехия. LTE-система BUT является полным коммерчески пригодным решением для всех важнейших подсистем, входящих в современные сети 4G (рис. 7). Модельная сеть была сконфигурирована для обеспечения необходимых услуг, таких как VoIP, поверх конвергентной инфраструктуры радиодоступа LTE и WiFi. Ядро сети EPC обеспечивает высокую скорость передачи данных с соответствующим уровнем QoS, имея возможность поддерживать при этом до ста тысяч одновременно обслуживаемых пользователей. Для видео и голосовых услуг используется высокопро-

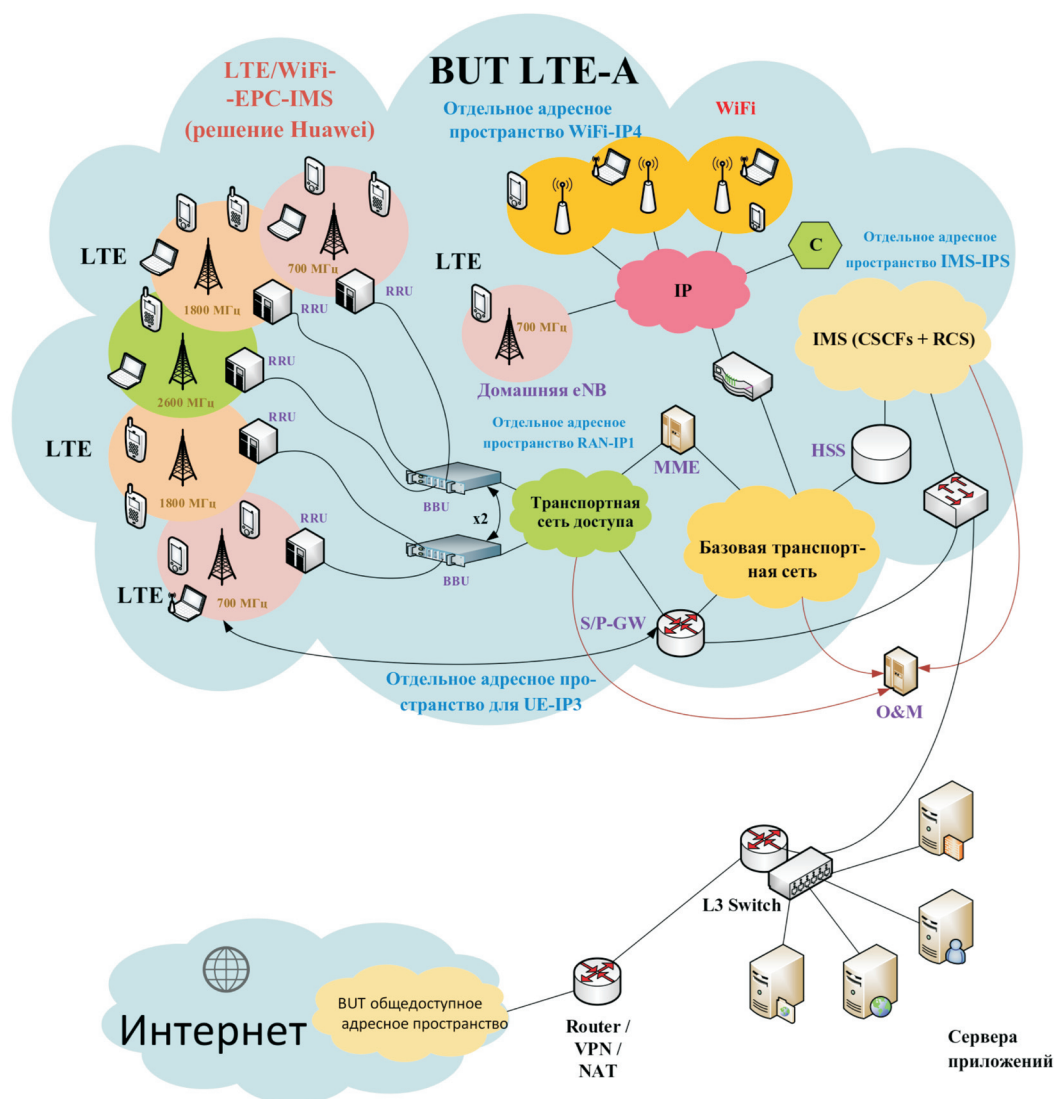


Рис. 7. Сеть LTE Технологического университета г. Брно

изводительная IP-мультимедийная подсистема (IMS).

Задачей испытаний стало доказательство наличия преимуществ при совместном использовании мобильной сети и системы D2D. Основные цели оценки производительности были сформулированы так, чтобы дополнить результаты, полученные выше при имитационном моделировании. Наибольший интерес вызывали те ситуации, когда возникали локальные перегрузки, что потенциально могло бы уменьшить эффективность работы D2D-технологий в будущих реальных сетях. Установление соответствующих пределов производительности и ограничений для технологии D2D и определение того, какие услуги могут быть наиболее подходящими для такого взаимодействия в обозримом будущем, стали важнейшими результатами проведенных испытаний.

Один из главных параметров при установлении соединения D2D – длительность интервала времени занятия линии. Этот параметр имеет решающее значение, т. к. его более низкое значение существенно снижает нагрузку на инфраструктуру сети LTE, перемещая трафик на альтернативную линию D2D, а также улучшает другие параметры работы. Время отклика при этом может быть разбито на несколько компонентов, как это описано ниже. Из-за небольшого размера сообщения другие требования к QoS для сигнализации D2D тривиальны и являются такими же, как и для любой другой сети доступа. Иные аспекты производительности линии D2D, которые напрямую

не связаны с инфраструктурой мобильной сети, выходят за рамки данной работы.

Изучая предложенный протокол для взаимодействия D2D, можно установить, что ключевым показателем является время отклика сервера, которое существенно зависит от нагрузки на соту. Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 8. Видно, что задержка на самом деле не достигает предельных значений, если сота не загружена почти на 100 %, но когда это происходит, вариация задержки растет до недопустимых значений. На практике система будет функционировать неудовлетворительно, если задержка превысит значение приблизительно в 100 мс. Это означает, что сигнальный трафик D2D должен получить приоритет на уровне планировщика LTE, если это возможно на практике.

Принимая во внимание то, что также может существовать некоторая дополнительная задержка, своевременное установление соединения D2D даст пользователям уверенность в получении контента вовремя, в том числе и в случаях, когда они перемещаются друг относительно друга. Можно сделать вывод о том, что в зависимости от качества сотовой связи полезность соединений D2D может отличаться. Однако даже с использованием современных технологий LTE задержки передачи информации могут быть до десяти раз больше, чем при использовании D2D поверх WiFi. Это означает, что технология D2D с использованием WiFi Direct является чрезвычайно конкурентоспособным решением.

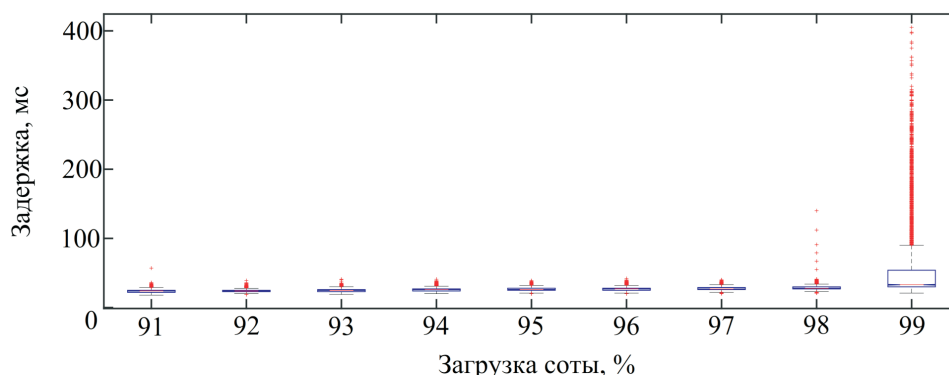


Рис. 8. Измерение задержки сервера в системе D2D

Заключение

Для операторов мобильной связи взаимодействие через D2D может стать весьма эффективным механизмом для выгрузки трафика из сотовой сети, а также для обеспечения поддержки социальных приложений посредством локализации предоставления услуг. В статье рассмотрена новая технология D2D с поддержкой сети, проведено ее исследование и описана реализация соответствующего прототипа, а также определены основные проблемы и потенциальные преимущества прямого взаимодействия между мобильными устройствами. Подчеркнем наиболее важные выводы и уроки, извлеченные из проведенных исследований.

- Успешная интеграция D2D и обеспечение совместимости с существующей архитектурой 3GPP LTE показывает, что нет никаких технических проблем, которые препятствовали бы провайдерам предлагать приложения D2D своим клиентам уже сейчас. Более того, некоторые из них могли бы существенно улучшить свою инфраструктуру и предоставлять новые услуги, которые были бы невозможны без необходимости непрерывного отслеживания местоположения с помощью ГЛОНАСС/GPS.

- Системы создания, управления и обслуживания D2D-соединений можно будет достаточно просто реализовать в рамках

разработанных протоколов. Только некоторые платформы, которые не реализуют стандартизованные стеки, могут столкнуться с определенными трудностями при управлении трафиком.

- Качество восприятия услуги для D2D-соединений будет превосходить лучшие сотовые соединения в пределах разумных расстояний между пользователями (до 50 м). При этом технология WiFi Direct позволяет передавать потоковое видео высокой четкости, а также поддерживать приложения реального времени с высокой энергетической эффективностью.

- Успех всей концепции D2D во многом зависит от поддержки мобильным оператором позиционирования в соте, а также от готовности различных операторов к взаимодействию. Это, как обычно, зависит от наличия соответствующих стандартов 3GPP и рыночных механизмов.

Все проблемы, выявленные в ходе исследования системы D2D и реализации прототипа выгрузки трафика, можно оперативно решить в ходе внедрения в сетях операторов мобильной связи. Поскольку требования пользователей к новым услугам все возрастают, можно утверждать, что предложенная в данной статье система D2D с сетевой поддержкой найдет в той или иной форме широкое применение в сетях связи при практическом внедрении мобильных систем четвертого и, в особенности, пятого поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kliks A., Holland O., Basaure A., Matimikko M. Spectrum and license flexibility for 5G networks // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. No. 7. Pp. 42–49.
2. Asadi A., Wang Q., Mancuso V. A survey on Device-to-Device communication in cellular networks // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2014. Vol. 16. No. 4. Pp. 1801–1819.
3. ElSawy H., Hossain E., Alouini M.-S. Analytical modeling of mode selection and power control for underlay D2D communication in cellular networks // IEEE Transactions on Communications. 2014. Vol. 62. No. 11. Pp. 4147–4161.
4. Lee N., Lin X., Andrews J.G., Heath R.W. Power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms, and analysis // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015. Vol. 33. No. 1. Pp. 1–13.
5. Huang Y., Nasir A.A., Durrani S., Zhou X. Mode selection, resource allocation, and power control for D2D-enabled two-tier cellular network // IEEE Transactions on Communications. 2016. Vol. 64. No. 8. Pp. 3534–3547.
6. Yu C.-H., Tirkkonen O., Doppler K., Ribeiro C. Power optimization of Device-to-Device communication underlaying cellular communication // Internat. Conf. on Communications. IEEE. 2009. Pp. 1–5.
7. Yu C.-H., Tirkkonen O. Device-to-Device underlay cellular network based on rate splitting // Wireless Communications and Networking Conf. IEEE. 2012. Pp. 262–266.

8. Yu C.-H., Doppler K., Ribeiro C., Tirkkonen O. Resource sharing optimization for Device-to-Device communication underlaying cellular networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10. No. 8. Pp. 2752–2763.
9. Seppala J., Koskela T., Chen T., Hakola S. Network controlled Device-to-Device (D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks // *Wireless Communications and Networking Conf. IEEE*. 2011. Pp. 986–991.
10. Min H., Seo W., Lee J. Reliability improvement using receive mode selection in the Device-to-Device uplink period underlaying cellular networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10. No. 2. Pp. 413–418.
11. Chen T., Charbit G., Hakola S. Time hopping for Device-to-Device communication in LTE cellular system // *Wireless Communications and Networking Conf. IEEE*. 2010.
12. Xu Y., Yin R., Han T., Yu G. Dynamic resource allocation for Device-to-Device communication underlaying cellular networks // *International Journal of Communication Systems*. 2012. No. 38.
13. Al-Kanj L., Dawy Z., Yaacoub E. Energy-aware cooperative content distribution over wireless networks: Design alternatives and implementation aspects // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013. Vol. 15. No. 4. Pp. 1736–1760.
14. Sankaran C.B. Data offloading techniques in 3GPP Rel-10 networks: A tutorial // *IEEE Communications Magazine*. 2012. Vol. 50. No. 6.
15. Xing B., Seada K., Venkatasubramanian N. An experimental study on Wi-Fi Ad-hoc mode for mobile Device-to-Device video delivery // *INFOCOM Workshops. IEEE*, 2009. Pp. 1–6.
16. Lei L., Zhong Z., Lin C., Shen X. Operator controlled Device-to-Device communications in LTE-advanced networks // *IEEE Wireless Communications*. 2012. Vol. 19. No. 3.
17. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) // 3GPP Technical Report (TR) 36.814-900. 2010.
18. Zhuang J., Jalloul L., Novak R., Park J. IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD). 2009.
19. ITU-R M.2135. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU, 2009.
20. Konstantinou K., Kang S., Tzaras C. A measurement-based model for Mobile-to-Mobile UMTS Links // *Vehicular Technology Conference*. 2007.
21. Gudmundson M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems // *Electronics Letters*. 1991. Vol. 27. No. 23. Pp. 2145–2146.

Статья поступила в редакцию 11.06.2018.

REFERENCES

1. Kliks A., Holland O., Basaure A., Matinmikko M. Spectrum and license flexibility for 5G networks. *IEEE Communications Magazine*, 2015, Vol. 53, No. 7, Pp. 42–49.
2. Asadi A., Wang Q., Mancuso V. A survey on Device-to-Device communication in cellular networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2014, Vol. 16, No. 4, Pp. 1801–1819.
3. ElSawy H., Hossain E., Alouini M.-S. Analytical modeling of mode selection and power control for underlay D2D communication in cellular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, Vol. 62, No. 11, Pp. 4147–4161.
4. Lee N., Lin X., Andrews J.G., Heath R.W. Power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms, and analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, Vol. 33, No. 1, Pp. 1–13.
5. Huang Y., Nasir A.A., Durrani S., Zhou X. Mode selection, resource allocation, and power control for D2D-enabled two-tier cellular network. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, Vol. 64, No. 8, Pp. 3534–3547.
6. Yu C.-H., Tirkkonen O., Doppler K., Ribeiro C. Power optimization of Device-to-Device communication underlaying cellular communication. *International Conference on Communications*, IEEE, 2009, Pp. 1–5.
7. Yu C.-H., Tirkkonen O. Device-to-Device underlay cellular network based on rate splitting. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2012, Pp. 262–266.
8. Yu C.-H., Doppler K., Ribeiro C., Tirkkonen O. Resource sharing optimization for Device-to-Device communication underlaying cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless communications*, 2011, Vol. 10, No. 8, Pp. 2752–2763.
9. Seppala J., Koskela T., Chen T., Hakola S. Network controlled Device-to-Device (D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2011, Pp. 986–991.
10. Min H., Seo W., Lee J. Reliability improvement using receive mode selection in the Device-to-Device uplink period underlaying cellular networks. *IEEE Transactions on*

Wireless Communications, 2011, Vol. 10, No. 2, Pp. 413–418.

11. **Chen T., Charbit G., Hakola S.** Time hopping for Device-to-Device communication in LTE cellular system. *Wireless communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2010.

12. **Xu Y., Yin R., Han T., Yu G.** Dynamic resource allocation for Device-to-Device communication underlaying cellular networks. *International Journal of Communication Systems*, 2012, No. 38.

13. **Al-Kanj L., Dawy Z., Yaacoub E.** Energy-aware cooperative content distribution over wireless networks: Design alternatives and implementation aspects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, Vol. 15, No. 4, Pp. 1736–1760.

14. **Sankaran C.B.** Data offloading techniques in 3GPP Rel-10 networks: A tutorial. *IEEE Communications Magazine*, 2012, Vol. 50, No. 6.

15. **Xing B., Seada K., Venkatasubramanian N.** An experimental study on Wi-Fi Ad-hoc mode for

mobile Device-to-Device video delivery. *INFOCOM Workshops*, IEEE, 2009, Pp. 1–6.

16. **Lei L., Zhong Z., Lin C., Shen X.** Operator controlled Device-to-Device communications in LTE-advanced networks. *IEEE Wireless Communications*, 2012, Vol. 19, No. 3.

17. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). 3GPP Technical Report (TR) 36.814-900*, 2010.

18. **Zhuang J., Jalloul L., Novak R., Park J.** *IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)*, 2009.

19. *ITU-R M.2135. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*. ITU, 2009.

20. **Konstantinou K., Kang S., Tzaras C.** A measurement-based model for Mobile-to-Mobile UMTS links. *Vehicular Technology Conference*, 2007.

21. **Gudmundson M.** Correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *Electronics Letters*, 1991, Vol. 27, No. 23, Pp. 2145–2146.

Received 11.06.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ПЯТТАЕВ Александр Владиславович

PYATTAEV Alexander V.

E-mail: alex.pyattaev@gmail.com

АНДРЕЕВ Сергей Дмитриевич

ANDREEV Sergey D.

E-mail: serge.andreev@gmail.com

КУЧЕРЯВЫЙ Евгений Андреевич

KOUCHERYAVY Yevgeni A.

E-mail: ykoucheryavy@hse.ru