

УДК 621.396; 621.396.97; 654.19

РАЗГРУЗКА СЕТЕЙ LTE ЧЕРЕЗ СЕТИ Wi-Fi

А.Н. Степутин^{a,b}, Н.О. Ромашенков^a, Г.А. Фокин^a

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

^b Портал 1234G.ru, Санкт-Петербург, 193168, Российская Федерация

Адрес для переписки: steputin@1234G.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.11.14, принята к печати 06.10.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1139-1146

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Степутин А.Н., Ромашенков Н.О., Фокин Г.А. Разгрузка сетей LTE через сети Wi-Fi // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1139–1146.

Аннотация

Исследованы вопросы разгрузки сетей LTE через сети Wi-Fi как один из способов решения проблемы нехватки ресурсов сети мобильной связи в будущем. Приведено сравнение предназначенных для разгрузки сетей мобильной связи технологий: фемтосоты, Small Cells и Wi-Fi. Представлено построение совмещенной сети LTE+Wi-Fi, включающее как новые элементы сети, так и новые функции для стандартных элементов сети LTE, а также взаимодействия между элементами. Особое внимание уделено использованию мобильных протоколов IP для организации доступа к ядру сети LTE через доверенный и недоверенный Wi-Fi доступ. Выполнена оценка эффективности внедрения данной технологии. В рамках моделирования процесса перехода абонентского терминала из сети LTE в сеть Wi-Fi представлены зависимость количества переведенных в сеть Wi-Fi абонентов и зависимость скорости передачи данных в сети LTE от плотности точек доступа. На основании исследования сделан вывод о том, что постепенное внедрение данной технологии позволяет успешно справляться с проблемой нехватки ресурсов сети мобильного оператора в крупных городах из-за постоянного роста трафика. Показано, что добавление точек доступа и перевод клиентов в сеть Wi-Fi значительно снижает нагрузку на базовую станцию, при этом увеличивает скорость передачи данных, позволяя сохранять качество предоставляемых услуг.

Ключевые слова: разгрузка сетей, стандарт 802.11n, шлюз MAG, шлюз LMA, шлюз WAG, шлюз ePDG, протокол PMIPv6, протокол DSMIPv6, доверенный доступ, недоверенный доступ.

LTE OFFLOADING THROUGH WiFi NETWORKS

A.N. Steputin^{a,b}, N.O. Romashenkov^a, G.A. Fokin^a

^aThe Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

^bPortal 1234G.ru, Saint Petersburg, 193168, Russian Federation

Corresponding author: steputin@1234G.ru

Article info

Received 05.11.14, accepted 06.10.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1139-1146

Article in Russian

For citation: Steputin A.N., Romashenkov N.O., Fokin G.A. LTE offloading through WiFi networks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1139–1146.

Abstract

The subject of the article is Wi-Fi offloading of LTE networks as one of the methods for solving a problem of the lack of availability of network resources in the future. Comparison of mobile networks offloading technologies, such as femtocells, Small Cells and Wi-Fi, is given. Architecture of cooperative LTE+Wi-Fi network including both new network components and new functions for standard LTE network components is presented as well as interaction between components. Special attention is paid to the usage of mobile IP protocols providing connection to the LTE Core both by trusted and untrusted Wi-Fi access. Evaluation of implementation effectiveness and prospective of the technology is given. The relation between amounts of users reconnected to Wi-Fi, data rate of LTE network and amount of access points are submitted as a part of the simulation of user's equipment transition process from LTE to Wi-Fi network. A conclusion based on the research is made that stepwise phase-in of this technology enables to solve the problem of mobile network resources shortage in metropolises due to permanent traffic growth. It is presented that access points addition and transference of the customers to Wi-Fi network significantly reduce the overload on the base station herewith it increases some data rate with preservation of quality of provided services.

Keywords

offloading of networks, 802.11n standard, MAG, LMA, WAG, ePDG, PMIPv6, DSMIPv6, trusted access, untrusted access.

Введение

Количество информации, передаваемое в сетях мобильной связи, огромно и продолжает расти быстрыми темпами. Это обстоятельство рано или поздно приведет к тому, что ограниченных ресурсов сетей мобильной связи стандарта LTE (Long-Term Evolution) окажется недостаточно, чтобы пропускать постоянно растущий объем трафика данных.

Решением проблемы является разгрузка сети, т.е. перевод части трафика в другие сети с меньшим размером сот. Для сетей LTE характерна неоднородность их структур, поэтому в них возможно несколько вариантов разгрузки: Small Cells, фемтосоты и Wi-Fi.

Технология Small Cells применяется в общественных местах и представляет собой маломощные беспроводные ТД (точки доступа), которые работают в лицензируемом диапазоне и управляются оператором связи [1].

Фемтосоты – это соты небольшого размера, устанавливаемые в квартире или офисе и обслуживаемые также маломощной базовой станцией сотовой связи [2].

Wi-Fi – технология локальной беспроводной передачи данных (стандарт IEEE 802.11) [3].

В табл. 1 приведено сравнение этих трех технологий по основным параметрам.

Параметр	Технология		
	Small Cells	Фемтосоты	Wi-Fi
Ширина спектра, МГц	1,4/3/5/10/15/20	5	20/40 (802.11n) 20/40/80/160 (802.11ac)
Максимальная скорость передачи данных на радиointерфейсе, Мбит/с	150/75	42,2/5,76	600 (802.11n) 2340 (802.11ac)
Безопасность. QoS	+	+	+
Положительный опыт	–	–	+
Масштабируемость	–	+	+
Эффективность затрат	–	–	+

Таблица 1. Сравнение технологий разгрузки сетей мобильной связи

В сетях Wi-Fi используется более широкий спектр, скорость передачи данных выше, имеется поддержка гарантированного качества обслуживания QoS (Quality of Service) и стандарта шифрования WPA2 (Wi-Fi Protected Access). Wi-Fi пользуется огромной популярностью среди абонентов во всем мире. Масштабироваться сети Wi-Fi могут путем добавления новых ТД, развертывание которых значительно дешевле и проще установки новых базовых станций. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для разгрузки сетей мобильных данных технология Wi-Fi является наиболее перспективной.

Построение совмещенной сети LTE+Wi-Fi

LTE включает в себя сеть радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) и усовершенствованное пакетное ядро EPC (Evolved Packet Core) [4].

Что касается сетей Wi-Fi, то доступ через ТД Wi-Fi может быть доверенным (сети Wi-Fi операторского класса с безопасным методом аутентификации) и недоверенным (общественные открытые ТД Hotspots, домашние беспроводные локальные сети пользователей).

Для обеспечения работы технологии разгрузки через Wi-Fi необходимо ввести следующие элементы.

1. Домашний агент НА (Home Agent) – маршрутизатор в домашней сети, в который направляются пакеты из сетей Wi-Fi. Также НА отправляет пакеты, пришедшие в EPC, абонентскому терминалу (User Equipment, UE) через сеть Wi-Fi [5].
2. Шлюз мобильного доступа MAG (Mobile Access Gateway), который отслеживает движение абонентского терминала UE и сообщает об этом в EPC.
3. Якорь управления мобильностью LMA (Local Mobility Anchor) – это частный случай НА для взаимодействия с MAG. LMA привязывает свой IP адрес к IP адресу UE, чтобы пакеты, пришедшие в EPC, отправлялись далее через MAG пользователю [6].

Для недоверенного доступа используются также дополнительные компоненты.

4. Усовершенствованный шлюз для пакетных данных ePDG (evolved Packet Data Gateway), который выполняет функцию MAG в доверенных сетях [7].
5. Шлюз беспроводного доступа WAG (Wireless Access Gateway), который является маршрутизатором, направляющим пакеты в ePDG. WAG гарантирует, что пакеты отправляются в EPC и что на UE приходят пакеты только из ePDG [8].

Структура сети LTE+Wi-Fi приведена на рис. 1.

При взаимодействии используются мобильный прокси-протокол IP версии 6 PMIPv6 (Proxy Mobile IPv6) на интерфейсах S2a и S2b и IP протокол, использующий версию 6 поверх версии 4 DSMIPv6 (Dual Stack Mobile IPv6) на интерфейсе S2c.

Протокол PMIPv6 [8] обеспечивает взаимодействие между MAG и LMA для доверенного доступа, а также учитывает использование WAG и ePDG для недоверенного доступа (дополнительно между UE и узлом ePDG организуется туннельное соединение с использованием протокола безопасности IPsec [9]).

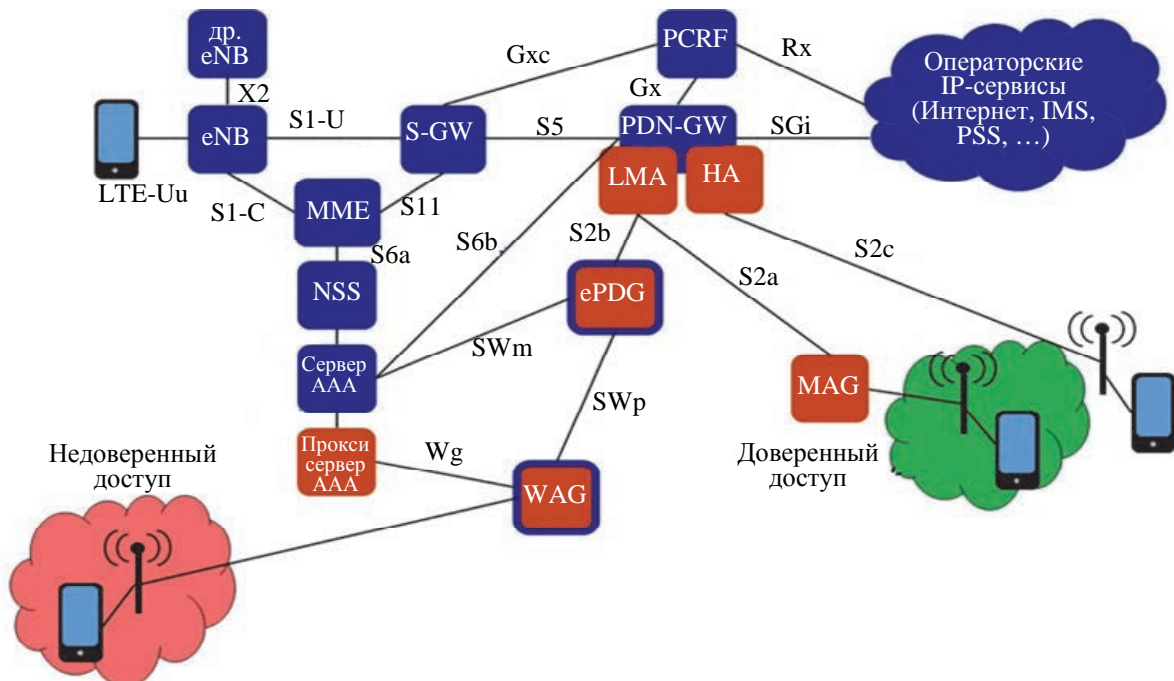


Рис. 1. Структура объединенной сети LTE+Wi-Fi

Протокол DSMIPv6 поддерживает возможность формирования туннелей с использованием как IPv4, так и IPv6. Для работы данного протокола не имеет значения, какой тип доступа используется (доверенный или недоверенный) [10]. Функционирование протокола DSMIPv6 значительно проще, протокол универсален для обоих видов доступа Wi-Fi и не требует большого количества дополнительных элементов. Однако реализация этого протокола требует, чтобы его поддерживал UE.

Оценка эффективности внедрения Wi-Fi offloading

На рис. 2 представлено распределение видов трафика по состоянию на февраль 2015 г. согласно мобильному отчету компании Ericsson [11]. В качестве «тяжелого» трафика будем рассматривать видео, аудио, загрузки и обновление программ. Именно этот трафик предлагается разгружать в сети Wi-Fi.



Рис. 2. Распределение трафика

Произведем оценку эффективности внедрения разгрузки сети стандарта LTE (FDD, полоса 10МГц и MIMO 2x2) с помощью технологии Wi-Fi 802.11n для центра Санкт-Петербурга (Центральный, Адмиралтейский, Василеостровский и Петроградский районы). Для оценки пропускной способности и емкости сети без применения разгрузки через Wi-Fi используем данные о средних значениях спектральной эффективности одной соты сети LTE [12] и рассчитаем среднюю пропускную способность соты базовой станции LTE (eNB) [13]:

$$R_{FDD} = S_{FDDaverage} \times W, \text{ Мбит/с,}$$

где $S_{FDDaverage}$ – средняя спектральная эффективность, бит/с/Гц; W – ширина канала, МГц.

Далее рассчитаем суммарную пропускную способность сети LTE по направлению к абоненту:

$$R_{NW} = R_{eNB} \times N_{eNB}, \text{ Гбит/с,}$$

где R_{eNB} – средняя пропускная способность eNB, Мбит/с; N_{eNB} – число eNB.

Рассчитаем усредненный трафик абонента в час наибольшей нагрузки (ЧНН):

$$R_{BH} = \frac{T_m \times N_{bit}}{N_d \times N_{BH} \times t_h}, \text{ Кбит/с,}$$

где T_m – величина трафика, расходуемая пользователем в месяц (Б); N_{bit} – число бит в байте (бит); N_d – число суток в месяце; N_{BH} – количество часов наибольшей нагрузки; t_h – число секунд в часе, с.

Усредненный трафик абонента на линии «вниз» в ЧНН:

$$R_{DL} = R_{BH} \times S_{DL}, \text{ кбит/с,}$$

где S_{DL} – доля трафика, приходящегося на линию «вниз».

Емкость сети составит

$$N_{sub} = \frac{R_{NW}}{R_{DL}}.$$

С применением данных о стандарте 802.11n [3] были проведены аналогичные расчеты для сети стандарта LTE, использующей разгрузку через Wi-Fi. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Параметр	Без применения Wi-Fi offloading	С применением Wi-Fi offloading (для 802.11n)		
		100 ТД/ км ²	200 ТД/ км ²	350 ТД/ км ²
Средняя пропускная способность eNB/ТД, Мбит/с	51	97		
Средняя скорость передачи «тяжелого» трафика, Мбит/с	1,7	9,7		
Площадь покрытия сети LTE, км ²	69			
Площадь покрытия сети Wi-Fi для разгрузки сети LTE, км ² (с учетом этажности застройки)	–	46	92	160
Максимальная емкость сети, тыс. чел.	38	7028	13987	24426

Таблица 2. Оценка эффективности применения технологии Wi-Fi offloading

Согласно табл. 2, средняя скорость передачи данных в сети с использованием разгрузки через Wi-Fi оказывается больше за счет того, что применяются ТД стандарта 802.11n. В современных системах радиодоступа можно максимально учесть условия распространения радиоволн в канале связи и адаптироваться к ним путем выбора наиболее подходящей схемы модуляции и кодирования MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурная амплитудная модуляция QPSK/16QAM/64QAM может комбинироваться с помехоустойчивым кодированием с различными скоростями на разном отдалении от ТД. Для поддержания качества предоставляемых услуг целесообразно рассматривать скоростные показатели на удалении 30 м от ТД. При расчетах во внимание принималось соотношение открытой и застроенной местности, равное 1: 3, средняя этажность – 5 этажей. В будущем применение нового стандарта 802.11ac [14] позволит увеличить скорость передачи данных в сети Wi-Fi до 2340 Мбит/с на радиointерфейсе (табл. 1).

Средняя скорость передачи «тяжелого» трафика определялась из расчета 10 активных пользователей на 1 сектор eNB или ТД Wi-Fi. «Тяжелый» трафик будет передаваться с большей скоростью, что улучшит качество предоставляемых услуг.

Площадь покрытия сети LTE составляет

$$S_{LTE} = S_{eNB} \times N_{eNB} \text{ [км}^2\text{]},$$

где S_{eNB} – площадь покрытия трехсекторного сайта, км²; N_{eNB} – число eNB.

Тогда необходимое число eNB для покрытия всего города составит

$$N_{eNB} = \frac{S_{LTE}}{S_{eNB}} = \frac{S_{CIT6}}{S_{eNB}}.$$

Площадь центра Санкт-Петербурга составляет $S_{CIT6} = 69 \text{ км}^2$, а с учетом этажности застройки площадь покрытия равна 153 км^2 . Площадь покрытия трехсекторного сайта в условиях средней городской застройки составляет $S_{eNB} = 0,54 \text{ км}^2$.

Таким образом, необходимое число eNB для покрытия центра города составит $N_{eNB} = 130$, однако это количество eNB не обеспечивает необходимую емкость в 740 тыс. человек населения центра города (табл. 2). По результатам выполненных расчетов при плотности 350 ТД/ км² сеть Wi-Fi сможет покрыть территорию центра Санкт-Петербурга, полностью обеспечивая широкополосным доступом в Интернет не только жителей, но и людей, находящихся в центре на работе, на прогулке, а также приезжих и туристов, что в общей сложности составляет около 2,5 млн. Более того, емкость такой совмещенной сети LTE+Wi-Fi на данный момент превышает в 10 раз потребности центра города (табл. 2). В этой связи на первом этапе внедрения технологии целесообразно разворачивать сеть Wi-Fi в местах массового скопления людей, где остро стоит вопрос нехватки ресурсов. Поскольку наблюдается лавинообразный рост трафика, то рассмотренный предельный случай будет актуален через 7 лет. Например, к 2019 г. общемировой трафик данных вырастет в 10 раз [8], таким образом, среднемесячный трафик (величина T_m), генерируемый тем же количеством абонентов, также возрастет в 10 раз. В этой ситуации необходимую пропускную способность обеспечат 200 ТД/ км² (рис. 3). Потребности пользователей будут продолжать расти экспоненциально [11], поэтому уже к 2022 г. встанет необходимость в полном покрытии центра Санкт-Петербурга сетью Wi-Fi операторского класса, т.е. в развертывании 350 ТД/ км² (рис. 3).

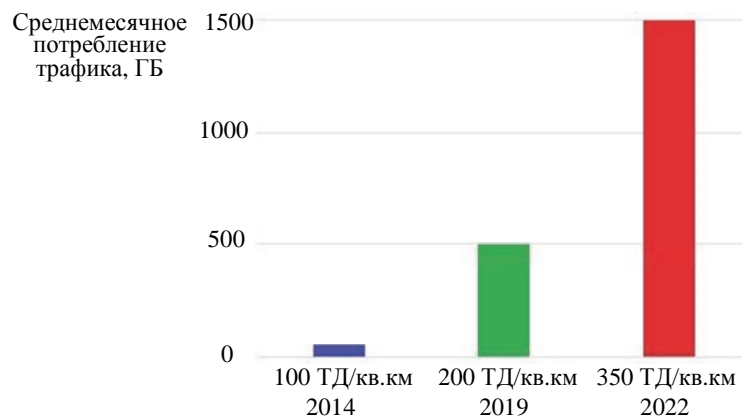


Рис. 3. Оценка эффективности внедрения технологии разгрузки через Wi-Fi

Моделирование процедуры перехода UE из сети LTE в сеть Wi-Fi

Рассмотрим участок местности 1 км². В центре участка расположена базовая станция eNB. Радиус одной соты eNB в условиях средней городской застройки – 0,53 м [9]. Исследуем поведение UE-абонентов, находящихся внутри соты. Абоненты распределены на участке местности случайно по равномерному закону распределения. Количество абонентов на участке 1 км² примем равным 1000. Количество ТД Wi-Fi на участке местности будем принимать различным, для того чтобы исследовать количество абонентов, перешедших из сети LTE в сеть Wi-Fi, при различной плотности ТД на 1 км².

Для определения изменения пиковой скорости передачи данных в сети LTE при переводе части абонентов в сеть Wi-Fi предположим, что в зоне действия eNB находится 20 активных абонентов. Согласно табл. 2, средняя пропускная способность eNB составляет 51 Мбит/с, средняя пропускная способность ТД Wi-Fi 802.11n – 97 Мбит/с. Пример исследуемого участка местности, распределения на нем абонентов, при зоне обслуживания 1 eNB и плотности 100 ТД/км² приведен на рис. 4.

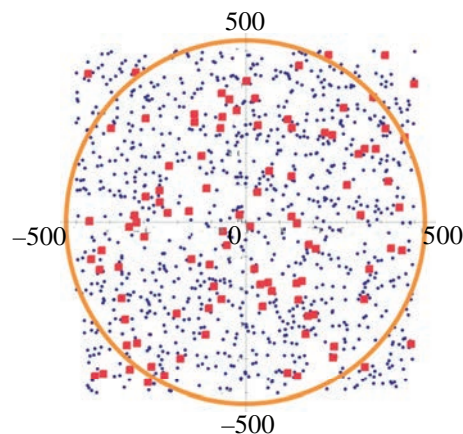


Рис. 4. Распределение абонентов и точек доступа на местности, где точками обозначены абоненты, квадратами – точки доступа, круг – граница зоны обслуживания eNB

UE подсоединяется к ТД, если она расположена в области соты с текущим Cell-ID. Этой областью будет являться окружность, описанная вокруг шестигранника зоны обслуживания одной антенны eNB. Радиус этой области $r = 0,53$ м. Основываясь на положении каждого абонента, можно оценить количество UE, подключившихся к ТД, с учетом того, что UE попадает в зону действия ТД Wi-Fi, которая составляет 30 м. Результат моделирования представлен на рис. 5.

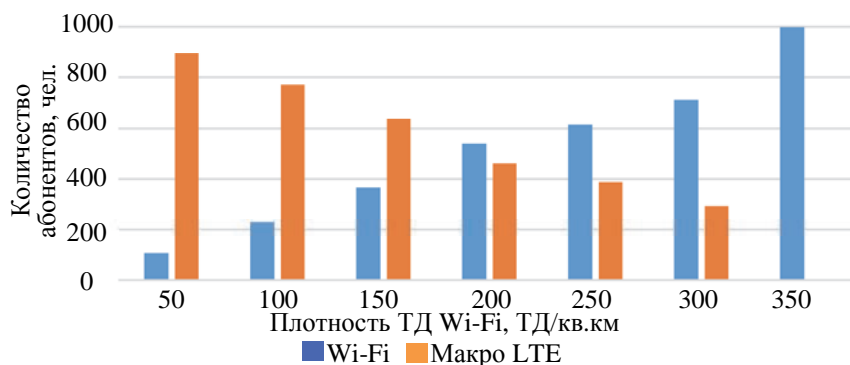


Рис. 5. Количество UE, переведенных в сеть Wi-Fi

Уже при 200 ТД/ км² величина абонентов, переведенных в сеть Wi-Fi, превышает число оставшихся в сети LTE. При 350 ТД/ км² сеть Wi-Fi оказывается полностью наложенной на сеть LTE, в результате чего все абоненты оператора оказываются в зоне действия Wi-Fi операторского класса.

На рис. 6, а, показан график зависимости средней скорости передачи данных в сети LTE от плотности ТД.

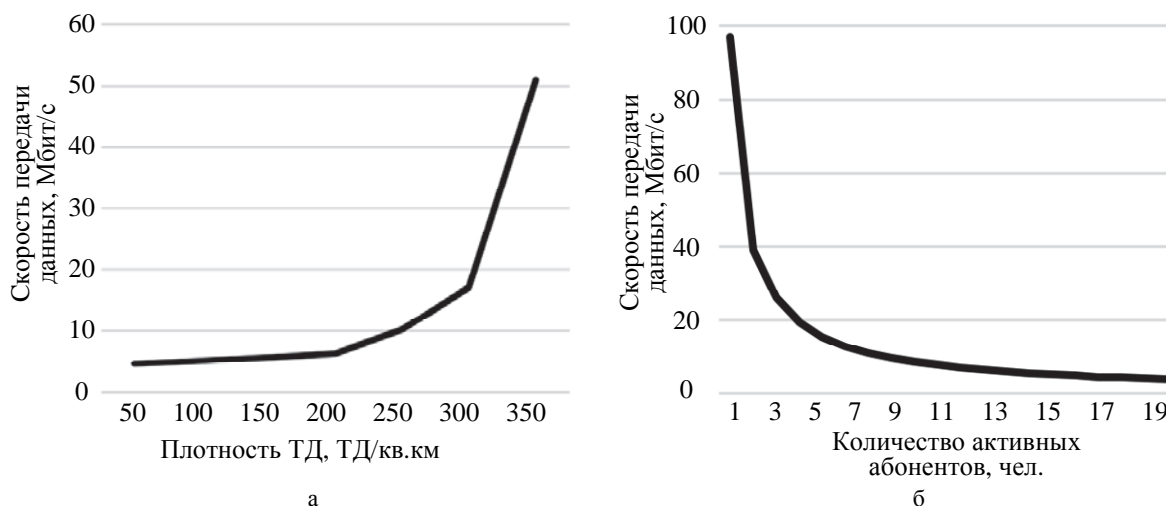


Рис. 6. Зависимость средней скорости передачи данных: в сети LTE от плотности точек доступа (а); в сети Wi-Fi от количества абонентов (б)

Скорость передачи данных в сети LTE значительно возрастает при увеличении плотности ТД: чем выше плотность, тем больше вероятность того, что активный абонент попадет в зону действия ТД Wi-Fi. При плотности 350 ТД/ км² скорость передачи данных в сети LTE оказывается равной 51 Мбит/с, в то время как без использования технологии разгрузки через Wi-Fi она составит лишь 2,6 Мбит/с.

На рис. 6, б, приведена зависимость скорости передачи данных в сети Wi-Fi для абонентов одной ТД от числа абонентов, подключенных к этой ТД.

Плотность 350 ТД/ км² обеспечивает перевод в сеть Wi-Fi всех 20 активных абонентов, если это необходимо. Даже если предположить, что все 20 абонентов были переведены в сеть Wi-Fi через одну ТД, скорость передачи данных для каждого из них составит 3,9 Мбит/с (рис. 6, б). Если бы эти абоненты находились в макросети LTE, скорость составляла бы 2,6 Мбит/с. Таким образом, при самом неудачном варианте попадания всех абонентов в зону действия одной ТД Wi-Fi скорость передачи данных возрастет в 1,5 раза. При всех остальных вариантах скорость будет выше, согласно рис. 6, б.

Наличие полного покрытия не всегда предполагает перевод всех абонентов в сеть Wi-Fi, так как необходимо учитывать конкретные значения нагрузки на eNB и ТД, а также ее вид. В будущем при возросших нагрузках могут возникать случаи, когда ТД Wi-Fi будет перегружена, и абонент будет оставаться подключенным к сети через eNB, несмотря на то, что будет находиться в зоне действия ТД. Исходя из

этого, одной из задач дальнейших исследований в данной области является балансировка нагрузки в совмещенных сетях LTE+Wi-Fi с использованием таких алгоритмов [15], как алгоритм переполнения (Spillover), циклический взвешенный алгоритм (Weighted Round Robin) и алгоритм, использующий правило менее загруженной очереди (Least Load First).

Заключение

Наиболее перспективной технологией для разгрузки сетей LTE является технология Wi-Fi. В данной работе произведен анализ возможных путей решения проблемы перегрузки сети, доказывающий преимущество технологии Wi-Fi.

Описано построение сети LTE+Wi-Fi, где в структуру сети LTE добавлены такие компоненты, как MAG, LMA, ePDG и WAG.

Полученные результаты расчетов и моделирования показывают эффективность внедрения данной технологии за счет роста скорости передачи данных, увеличения клиентской базы, устранения проблем в радиопокрытии. Эти факторы делают технологию разгрузки сети LTE через сети Wi-Fi привлекательной для операторов мобильной связи.

References

1. *3GPP Specification: 36.932. Scenarios and Requirements for Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN*. 2013. Available at: <http://www.3gpp.org/dynareport/36932.htm> (accessed 02.03.2014).
2. Horn G. *3GPP Femtocells: Architecture and Protocols*. 2010. Available at: <https://www.qualcomm.com/documents/3gpp-femtocells-architecture-and-protocols> (accessed 16.03.2014).
3. *IEEE 802.11–2012. IEEE Standard for Information Technology. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2012.
4. Nikitina A.V., Ryzhkov A.E. *Radio Access Network of the Fourth Generation. Standard LTE: Technologies and Procedures*. St. Petersburg, SUT Publ., 2012, 84 p.
5. *IETF RFC 5944. IP Mobility Support for IPv4, Revised*. 2010. Available at: <http://www.ietf.org/proceedings/86/rfc/rfc5944.txt> (accessed 16.03.2014).
6. *IETF RFC 5213. Proxy Mobile IPv6*. 2008. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc5213> (accessed 16.03.2014).
7. Tikhvinskii V.O., Terent'ev S.V., Yurchuk A.B. *Mobile Network LTE: Technology and Architecture*. Moscow, Eko-Trendz, 2010, 284 p.
8. *3GPP Specification: 23.234. 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; System Description*. 2012. Available at: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23234.htm> (accessed 16.03.2014).
9. *3GPP Specification: 23.402. Architecture Enhancements for non-3GPP Accesses*. 2013. Available at: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23402.htm> (accessed 16.03.2014).
10. *3GPP Specification: 24.303. Mobility Management based on Dual-Stack Mobile IPv6; Stage 3*. 2013. Available at: <http://www.3gpp.org/dynareport/24303.htm> (accessed 16.03.2014).
11. *Ericsson Mobility Report*. 2015. Available at: www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-feb-2015-interim.pdf (accessed 07.03.2015).
12. *3GPP Specification 25.912. Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*. 2012. Available at: <http://www.3gpp.org/DynaReport/25912.htm> (accessed 12.04.2014).
13. Varukina L. *Uprazhnenie po Planirovaniyu Radiosetei LTE, a Takzhe o Tekhnicheskikh Predposylkakh Ob"edineniya Operatorov* [Exercise Planners Radio LTE, as well as the Technical Prerequisites Operators Association]. Available at: http://www.mforum.ru/arc/20110520_LTE_RNP_Varukina_180511.pdf (accessed 21.04.2014).
14. Gast M.S. *802.11ac: A Survival Guide*. O'Reilly Media, 2013, 152 p.
15. *Load Balancing between the two WAN-ports on the ZyWALL*. Available at: <http://zyxel.ru/kb/1443> (accessed 27.04.2014).

Степутин Антон Николаевич

– кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация; руководитель, Портал 1234G.ru, Санкт-Петербург, 193168, Российская Федерация, steputin@1234G.ru

Ромашенков Никита Олегович

– специалист, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, nikitaromashenkov@gmail.com

Фокин Григорий Алексеевич

– кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,

grihafokin@gmail.com

Anton N. Steputin

- PhD, Associate professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; CEO, Portal 1234G.ru, Saint Petersburg, 193168, Russian Federation, steputin@1234G.ru

Nikita O. Romashenkov

- specialist, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, nikitaromashenkov@gmail.com

Grigoriy A. Fokin

- PhD, Associate professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, grihafokin@gmail.com