

Имитационное моделирование вероятностно-временных характеристик MAC-протокола LTE-Advanced с поддержкой агрегации несущих

А. В. Андреев, В. Г. Дроздова

В настоящей статье описана имитационная модель, а также численные результаты имитационного моделирования вероятностно-временных характеристик протокола управления доступом к беспроводной среде LTE-Advanced с агрегацией нескольких несущих частот. Продемонстрированы характеристики среднего времени задержки и вероятности входных потерь в буфере базовой станции в зависимости от интенсивности входной нагрузки. Результаты данного исследования могут быть использованы производителями оборудования мобильных сетей 4-го поколения с целью анализа и оптимизации показателей качества сетей.

Ключевые слова: LTE-Advanced, MAC, агрегация несущих, протокол доступа, имитационное моделирование, вероятностно-временные характеристики.

1. Введение

LTE-Advanced (Long Term Evolution) – первая технология, отвечающая требованиям международного союза электросвязи ITU (International Telecommunication Union) к сетям 4-го поколения мобильной связи [1]. Под термином LTE-Advanced подразумевается 3GPP Release 10 и выше (3rd Generation Partnership Project – международная организация, занимающаяся разработкой спецификаций для сетей мобильной связи). Одно из ключевых требований ITU заключается в достижении 1 Гбит/с пропускной способности в нисходящем канале DL (Downlink) для статичных абонентов UE (User Equipment). Для достижения таких скоростей передачи данных требуется реализовать целый ряд дополнительных функций [2]: CA (Carrier Aggregation – агрегация, или объединение, несущих частот), CoMP (Coordinated Multi Point), усовершенствованные методы MIMO (Multiple Input Multiple Output) и многое другое. Агрегация несущих подразумевает объединение для передачи в нисходящем канале нескольких полос частот на разных несущих и, безусловно, является ключевой технологией, позволяющей достичь требуемых скоростей передачи данных для абонентов UE.

Однако даже успешная реализация всех дополнительных функций LTE-Advanced может не привести к увеличению пропускной способности до требуемой величины, если производитель использует неэффективный алгоритм динамического распределения ресурсов, существенно влияющий на коэффициент полезного использования радиointерфейса. Данный алгоритм является функцией канального уровня LTE-Advanced и реализуется в рамках MAC-протокола (Medium Access Control – управление доступом в среду) каждым производителем оборудования индивидуально, то есть не является стандартизованным [3]. В связи с этим задача изучения эффективности MAC-протокола LTE-Advanced является, безусловно, актуальной. Кроме того, представляет интерес исследование влияния алгоритмов протоколов доступа на эффективность использования радиоресурсов при поддержке агрегации нескольких несущих, так как полосы частот – это дорогостоящий ресурс.

Задачи исследования таких сложных телекоммуникационных систем, как LTE-Advanced, неаналитичны в реалистической постановке, и основным методом их решения является имитационное моделирование. В настоящее время существует целый ряд работ, где были предприняты попытки решения описанной выше задачи с помощью имитационного моделирования [4–8].

В [4] авторами анализируются различные стратегии распределения ресурсов DL с CA для нескольких моделей трафика, сравнивается производительность LTE с одной несущей и с несколькими несущими частотами. Однако авторы исследования проецируют имитационную модель преимущественно на физический уровень и среду распространения сигнала, не учитывая внутренней структуры MAC-протокола сети.

Работы [5–7] также посвящены имитационному моделированию характеристик протокола доступа LTE-Advanced с поддержкой агрегации несущих. В них рассматриваются общие методы распределения ресурсов на отдельных несущих частотах, такие как Round Robin, Best CQI (Channel Quality Indicator) и Proportional Fair, а также процедуры физического уровня. Но стоит отметить, что данные исследования выполнены на симуляторе NS3 с помощью стандартного модуля LENA [9], не позволяющего во всей полноте отразить особенности протоколов доступа LTE-Advanced.

В статье [8] авторами предложен собственный жадный алгоритм для стратегии Proportional Fair распределения ресурсов между пользователями, превосходящий по производительности базовый механизм, но не учитываются особенности назначения ресурсов абонентам, поддерживающим CA, и прочие особенности LTE-Advanced. Таким образом, несмотря на количество публикаций, посвященных изучению эффективности протокола доступа к общей среде LTE-Advanced, до сих пор остается целый ряд нерешенных задач. В рамках настоящей статьи авторами была предпринята попытка разработать собственный алгоритм имитационной модели MAC-подуровня LTE-Advanced с поддержкой агрегации несущих, отражающий внутренние особенности протокола, позволяющий изучать такие вероятностно-временные характеристики, как среднее время задержки пакетов и вероятность входных потерь в буфере базовой станции eNodeB. Ранее авторами настоящей статьи уже было выполнено имитационное моделирование протокола доступа в LTE (Release 8), продемонстрированы характеристики эффективности для таких случаев, как координация межсотовой интерференции, гетерогенная архитектура сети и пр. [10–11].

2. Описание имитационной модели протокола доступа LTE-Advanced с поддержкой агрегации несущих частот

Основными функциями MAC-протокола LTE-Advanced являются динамическое распределение радиоресурсов между абонентами сети UE и организация повторных передач транспортных блоков HARQ (Hybrid Automated Repeat ReQuest), содержащих биты данных. При имитационном моделировании процедур доступа абонентов в общей беспроводной среде необходимо учитывать специфику сигнальных взаимодействий между eNodeB и UE, описываемую стандартами 3GPP [3, 12–13].

Рассмотрим особенности обмена сигнальными сообщениями при скачивании абонентом данных (DL) в случае LTE-Advanced для одной несущей частоты (без CA) при условии, что UE уже подключен к сети (состояние RRC-Connected [12]), то есть миновал этапы синхронизации, авторизации и аутентификации.

При получении данных, предназначенных обслуживаемому базовой станцией абоненту, eNodeB помещает пакеты в свой буфер, емкость которого ограничена производителем оборудования. Если буфер (общая очередь) eNodeB полностью заполнен, то пакет отбрасывается. Такую ситуацию в рамках данной статьи мы будем расценивать как входные потери (discard ratio). Очевидно, что вероятность входных потерь будет во многом зависеть от числа ак-

тивных абонентов, обслуживаемых eNodeB, от интенсивности поступления их пакетов и от длительности обслуживания пакетов.

При появлении пакета в буфере eNodeB активирует функцию динамического распределения частотно-временных ресурсов между различными пользователями и различными типами трафика, отличающимися требованиями к качеству обслуживания QoS (Quality of Service). Данные для UE передаются в DL вместе с сигнальными сообщениями в общем канале трафика PDSCH (Physical Downlink Shared Channel). Канал PDSCH распределяется между абонентами в форме транспортных блоков, емкость которых определяется используемыми схемами модуляции и помехоустойчивого кодирования, а также режимами MIMO, и назначается абонентам базовой станцией каждую 1 мс (1 субкадр или 1 TTI – Time Transmission Interval) посредством канала PDCCH (Physical Downlink Control Channel). Получив транспортный блок, UE квитирует успешность или неуспешность его декодирования в специально выделенных ресурсных блоках канала PUCCH (Physical Uplink Control Channel) в рамках механизма HARQ. При получении отрицательной квитанции базовая станция повторно отправляет транспортный блок, наполняя его большим числом избыточных битов.

При разработке имитационной модели MAC-протокола LTE-Advanced авторами были учтены все вышеописанные особенности сигнального взаимодействия между ключевыми элементами радиосети – абонентами UE и базовыми станциями eNodeB. Кроме того, были рассмотрены особенности реализации передачи данных абонентам в нисходящем направлении на нескольких несущих частотах (CA). На рис. 1 показан пример реализации объединения несущих частот CC (Component Carrier) в нисходящем канале.

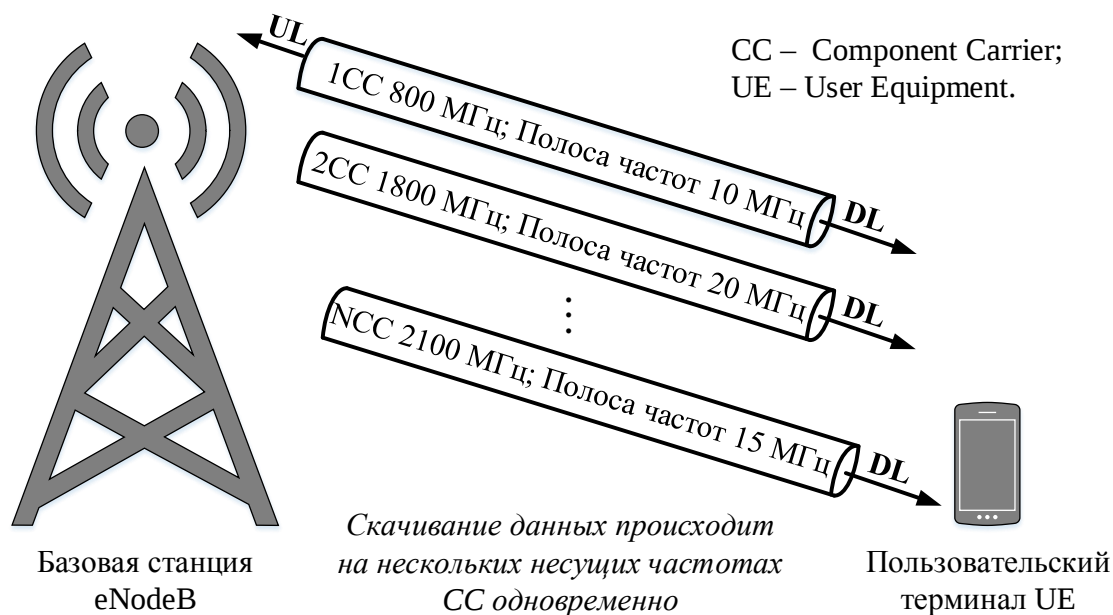


Рис. 1. Механизм объединения нескольких несущих в LTE-Advanced

Максимальное количество несущих, которое можно объединить для передачи данных N , равно 5 с максимально допустимой шириной полосы частот до 20 МГц. Таким образом, при соответствующей поддержке со стороны мобильного оборудования один абонент может скачивать свои данные в полосе 100 МГц. Агрегирование несущих частот подразумевает возможность объединения полос несущих разных диапазонов (например, как показано на рис. 1, объединяются полосы на несущих частотах 800 МГц, 1800 МГц и 2100 МГц).

Важными особенностями реализации CA в LTE-Advanced с точки зрения реализации протокола доступа к общей среде является необходимость распределения ресурсов одновременно нескольких несущих (логически это разные соты). Это называется функцией *cross-carrier scheduler*. Сложность такого механизма заключается в том, что несколько сот задей-

ствуют ресурсы каналов трафика PDSCH и каналов управления PDCCH. Помимо этого, усложняется процедура взаимодействия обслуживающей соты (соответствующей несущей частоты) и абонента, так как UE вынужден измерять радиосигналы всех дополнительных несущих и регулярно сообщать о качестве этих сигналов обслуживающей соте. Кроме того, возникает необходимость отправлять дополнительные квитанции, подтверждая успешность приема транспортного блока данных на каждой из агрегированных несущих. Это требует дополнительных ресурсов в восходящем канале управления PUSCH обслуживающей соты PCC (Primary Carrier Component).

Также при имитационном моделировании процедур доступа к радиоресурсам необходимо учитывать сигнальное взаимодействие между eNodeB и UE, направленное на конфигурацию и активацию дополнительных несущих частот, описываемое протоколом прикладного уровня RRC (Radio Resource Control) и показанное на рис. 2.



Рис. 2. Сигнальное взаимодействие между базовой станцией eNodeB и абонентом UE в LTE-Advanced с поддержкой Carrier Aggregation для активации дополнительной несущей частоты

Сообщение «RRC Connection Reconfiguration» [12] содержит всю необходимую информацию о дополнительно активируемой несущей частоте: PCI (Physical Cell ID – физический идентификатор соты), ARFCN (Absolute Radio Frequency Carrier Number – уникальный номер несущей частоты), конфигурация приемо-передающих антенн на новой частоте, параметры Cross Carrier Scheduling (информация о механизме динамического распределения ресурсов нескольких несущих CC), способы отправки отчетов о CQI и пр.

Ответным сообщением «RRC Connection Reconfiguration Complete» мобильный абонент подтверждает свою готовность получать данные на всех несущих частотах и отправлять необходимые отчеты об уровне радиосигналов и успешности декодирования транспортных блоков.

В результате детального изучения особенностей MAC-протокола LTE-Advanced и реализации механизма объединения нескольких несущих частот для передачи данных абонента в нисходящем канале была разработана имитационная модель, отражающая все вышеупомянутые нюансы, позволяющая получать адекватные, близкие к реальным, вероятностно-временные характеристики.

На рис. 3 представлена упрощенная функциональная блок-схема алгоритма имитационной модели протокола доступа к общей беспроводной среде абонентов LTE-Advanced с поддержкой CA.

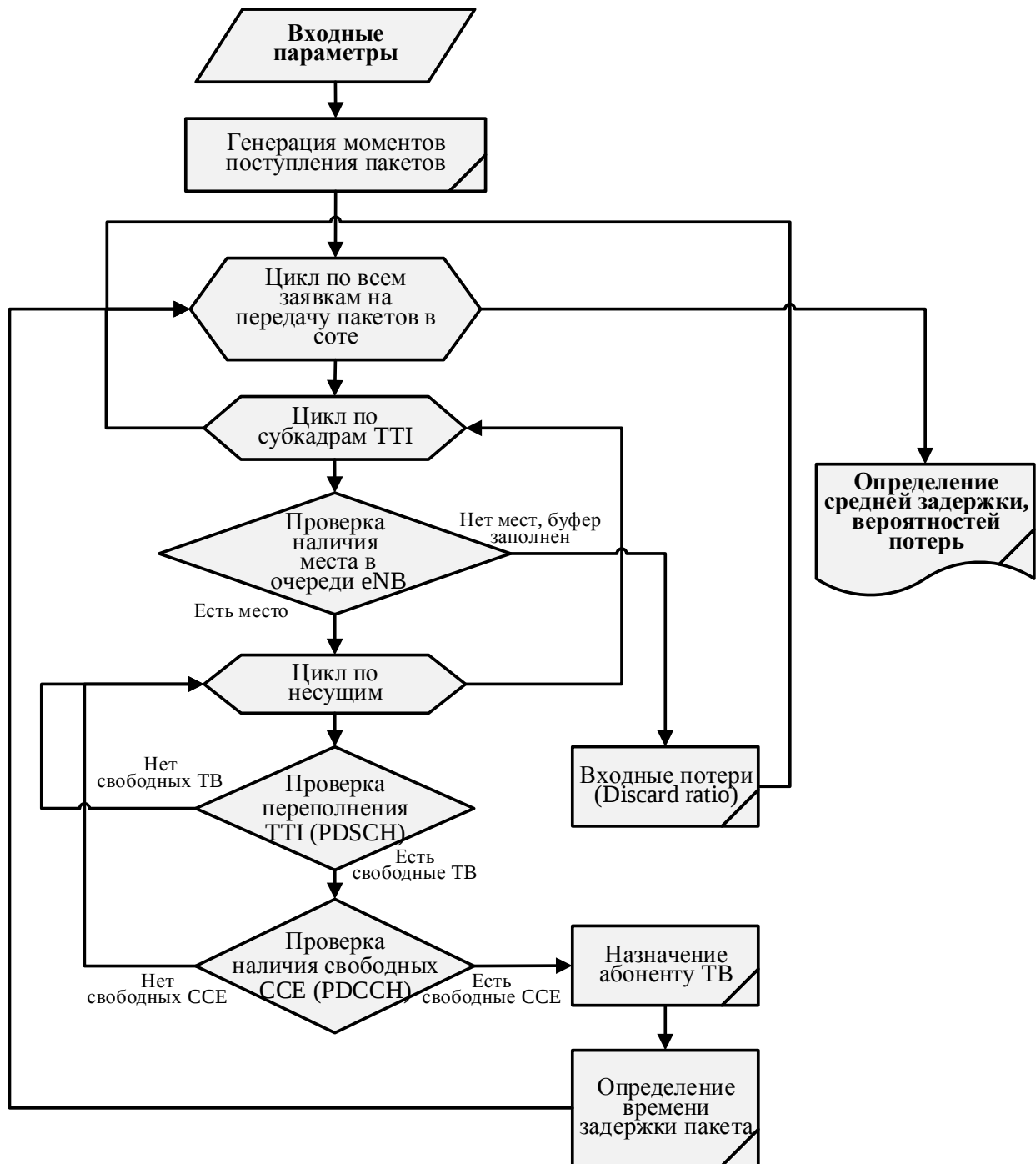


Рис. 3. Функциональная блок-схема алгоритма имитационной модели MAC-протокола LTE-Advanced с поддержкой Carrier Aggregation

Исходные параметры для разработанной имитационной модели: G_{in} – интенсивность входной нагрузки; U – число абонентов UE, обслуживаемых одной сотой eNodeB; $Pack_size$ – массив размеров пакетов данных (биты); BW – ширина полосы частот на каждой несущей; K – число пакетов, появляющихся у мобильного абонента; D_{RTD} – время распространения сигнала; buf_size – емкость буфера соты; n_{HARQ} – число повторных передач транспортного блока в рамках механизма HARQ; CQI – случайно генерируемый массив значений CQI абонентов, отражающих радиоусловия (удаленность от базовой станции) пользователей, N – число несущих частот, доступных для агрегации в DL; N_{CCE} – процентное количество CCE (Control Channel Elements – элемент канала управления), выделенных для назначения восходящего канала.

При имитационном моделировании важно учитывать ресурсы каналов трафика PDSCN и каналов управления PDCCH. Для назначения транспортных блоков в соте используется канал PDCCH, который разделен на элементы канала управления CCE. Один CCE составляет 36 OFDM-символов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) и является минимальной порцией ресурсов, необходимой для назначения канала трафика абоненту (номера ресурсных блоков, схемы модуляции и кодирования, режимы MIMO). Однако если радиоусловия пользователя ухудшаются (уменьшается значение CQI, которым UE информирует eNodeB о качестве радиоканала), то чтобы уведомить абонента о выделяемом ресурсе канала трафика, базовая станция увеличивает количество избыточных бит помехоустойчивого кодирования, иначе говоря, агрегирует абоненту несколько CCE (1, 2, 4 или 8). Может возникнуть ситуация, когда на соте недостаточно ресурсов канала трафика либо канала управления (свободных CCE), чтобы распределить имеющийся канал трафика. Вероятность блокировки канала трафика в такой ситуации оценивалась авторами в предыдущем исследовании [10].

Вероятностно-временные характеристики протокола доступа LTE-Advanced с поддержкой CA, которые будут исследоваться с помощью описанной имитационной модели, – это среднее время задержки пакета данных, то есть время с момента появления пакета в буфере соты eNodeB до момента его успешной отправки (подтвержденной соответствующей HARQ-квитанцией), а также вероятность входных потерь в буфере базовой станции (емкость буфера ограничена производителем оборудования).

Настоящая имитационная модель была разработана для экспериментального исследования BBX протокола доступа LTE-Advanced с поддержкой агрегации несущих частот и выполнена в программной среде MathCAD 15. Данная модель учитывает такие важные особенности протокола доступа, как структуры кадров и мультиплексирование каналов, последовательность сигнальных взаимодействий при передаче транспортных блоков и активации CA, число повторных HARQ-передач транспортных блоков данных, емкость буфера базовой станции, время распространения сигнала, радиоусловия абонентов и многое другое. В следующем разделе будут приведены значения входных параметров моделирования, а также полученные результаты.

3. Численные исследования

В данном разделе представлены вероятностно-временные характеристики протокола доступа LTE-Advanced с CA, полученные с помощью имитационного моделирования. В табл. 1 приведены входные данные, для которых выполнялось моделирование.

Таблица 1. Входные параметры для моделирования BBX протокола доступа LTE-Advanced

Параметр	Значение
Число абонентов UE в соте, U	10; 20
Размеры пакетов данных, $Pack_size$	64–1500 байт
Ширина полосы частот на каждой несущей, BW	10 МГц
Число пакетов, появляющихся у мобильного абонента, K	200–2000
Несущие частоты CC, f	0.8; 0.9; 1.8; 2.1; 2.6 ГГц
Емкость буфера соты, buf_size	100 Мбайт
Число повторных передач транспортного блока в рамках механизма HARQ, n_{HARQ}	8
Радиоусловия абонентов (определяются удаленностью от БС и влияют на уровень агрегирования CCE), CQI	0–15
Процентное количество CCE, выделенных для назначения восходящего канала, N_{CCE}	30 %
Время распространения сигнала, D_{RTD}	Зависит от удаленности UE от eNodeB и несущей частоты

3GPP [2] ограничивает пятью максимальное число агрегированных несущих частот в LTE-Advanced. В зависимости от наличия тех или иных лицензий мобильный оператор может объединять разное количество СС для своих абонентов. На рис. 4 смоделированы случаи, когда оператор имеет возможность активировать своим абонентам одну, три или пять несущих частот.

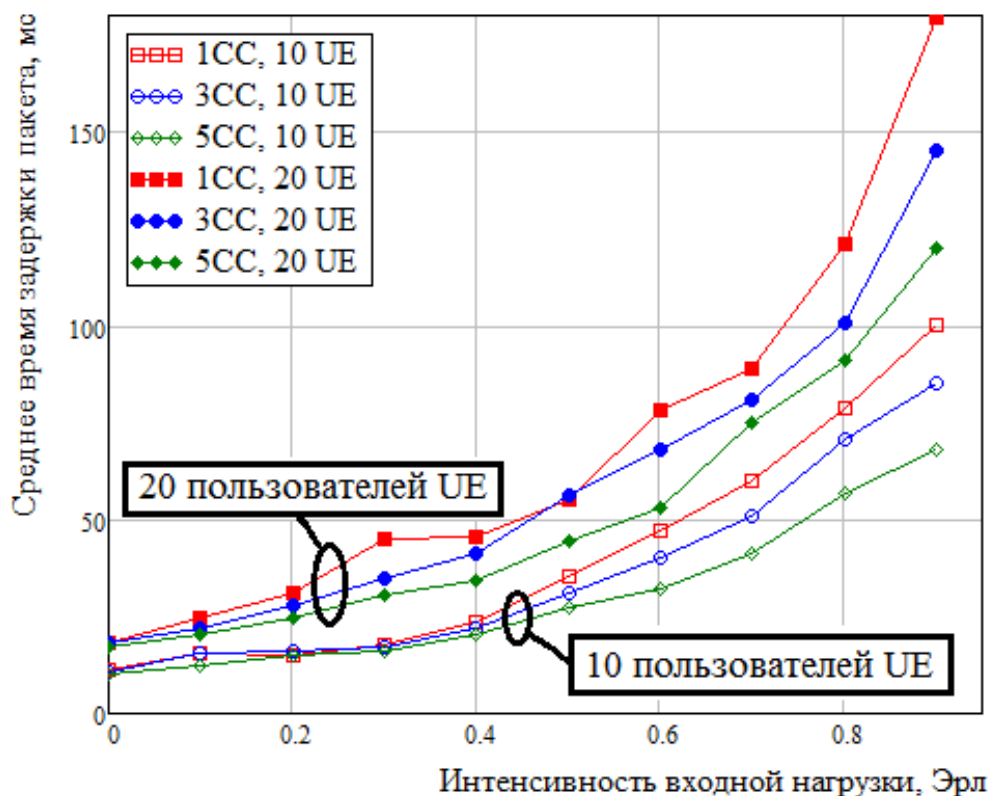


Рис. 4. Среднее время задержки пакета в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении числа агрегированных несущих ($N=1; 3; 5$) и при изменении числа абонентов, обслуживаемых одной сотой ($U=10; 20$)

Анализируя характеристики, представленные на рис. 4, можно отметить закономерный рост среднего времени задержки пакета при увеличении интенсивности входной нагрузки, обусловленный дополнительными задержками, связанными со скоростью высвобождения ресурсов. При максимальных значениях интенсивности нагрузки задержка достигает 65–170 мс для различных комбинаций входных параметров. Стоит отметить, что в LTE-Advanced предполагается передача голосового трафика, чувствительного к времени задержки. По статистике абоненты находят удовлетворительным качество голосовых услуг (MOS – Mean Opinion Score) при задержке менее 80 мс [14]. Это значит, что при высокой интенсивности нагрузки, имея всего одну несущую частоту, зачастую невозможно удовлетворить пользователей. Использование дополнительных несущих частот СС позволяет значительно улучшить качество восприятия голоса в LTE-Advanced за счет снижения времени выделения транспортными блоками данных.

Необходимо также отметить существенное влияние числа абонентов, обслуживаемых одной сотой, на среднее время задержки пакетов. Чем больше пользователей находится в зоне действия соты, тем чаще возникает ситуация нехватки ССЕ, то есть блокировки канала трафика PDСCH, что приводит к соответствующему росту времени задержки пакетов, обусловленной ожиданием решения eNodeB транспортного блока (задержка MAC-протокола).

На рис. 5 представлены зависимости вероятности входных потерь в буфере соты (речь идет именно о сотах, а не обо всей базовой станции, так как производители оборудования

используют отдельные аппаратные модули для реализации функционала каждой соты, отдельные буферы на каждой соте) от интенсивности входной нагрузки при различном числе агрегированных несущих и активных абонентов UE.

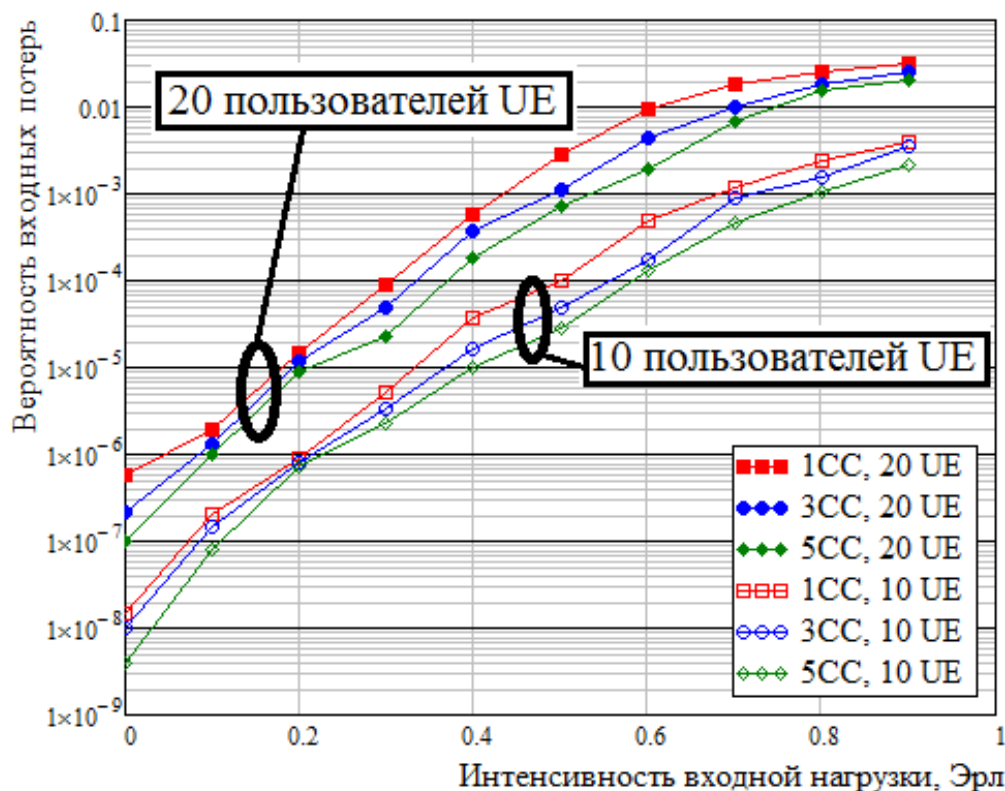


Рис. 5. Вероятность входных потерь пакета данных в буфере eNodeB (переполнение буфера) в зависимости от интенсивности входной нагрузки при изменении числа агрегированных несущих ($N=1; 3; 5$) и при изменении числа абонентов, обслуживаемых одной сотой ($U=10; 20$)

Зависимости, представленные на рис. 5, наглядно демонстрируют увеличение вероятности потери пакета из-за переполнения буфера станции при возрастании интенсивности поступления пакетов в систему, так как из-за роста длительности обслуживания пакетов (времени ожидания в буфере) буфер быстрее заполняется. Добавление дополнительных несущих частот СС приводит к существенному снижению вероятности потери пакетов. Можно также отметить существенное влияние числа активных пользователей, обслуживаемых сотой. Увеличение числа пользователей UE провоцирует увеличение входных потерь пакетов данных в буфере базовой станции eNodeB.

При имитационном моделировании заранее не известна среднеквадратическая ошибка σ , поэтому для оценки параметра σ был использован эмпирический стандарт, с помощью которого была получена доверительная оценка. Доверительные оценки были рассчитаны с доверительной вероятностью $P=0.99$. Можно отметить, что среднеквадратическое отклонение при росте нагрузок от 0.1 до 1.0 Эрл изменяется от 1–4 % до 8–13 %, что свидетельствует о высокой точности и достоверности полученных результатов.

4. Заключение

В настоящей статье описана имитационная модель, разработанная авторами для изучения вероятностно-временных характеристик протокола множественного доступа в мобильную сеть LTE-Advanced абонентов с поддержкой агрегации несущих частот (CA). Данная модель

позволяет учитывать принципиальные особенности MAC-протокола, последовательность обмена сигнальных RRC-сообщений, характеристики радиоинтерфеса, качество канала, время распространения и пр. Были получены характеристики среднего времени задержки пакета, вероятности потери пакета из-за ограниченности буфера базовой станции в зависимости от интенсивности входной нагрузки и при изменении числа активных абонентов и числа агрегируемых несущих частот. Показано, что увеличение числа несущих частот в нисходящем канале существенно улучшает качественные показатели сети LTE-Advanced.

Список литературы

1. ITU-R, Report M.2134, Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), November 2008.
2. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd ed., A John Wiley & Sons Ltd., 2011.
3. ETSI TS136 321, V12.5.0 2015, LTE: Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA); Medium Access Protocol specification, version 12.5.0, Release 12, 2015-04.
4. Chmiel M., Shi J., Zhou D. Downlink Scheduling and Rate Capping for LTE-Advanced Carrier Aggregation // Communications and Network. 2013. № 5.
5. Pedersen K. I., Frederiksen F., Rosa C., Nguyen H. T., Garcia L. G. U., & Wang Y. Carrier Aggregation for LTE-Advanced: Functionality and Performance Aspects // IEEE Communications Magazine. V. 49, № 6. P. 89–95.
6. Parikh J., Basu A. Scheduling schemes for carrier aggregation in LTE-Advanced systems // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. V. 3, Iss. 08.
7. Cheng X., Gupta G., Mohapatra P. Joint Carrier Aggregation and Packet Scheduling in LTE-Advanced Networks // IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON), 24–27 June 2013.
8. Liao H., Chen P., Chen W. An Efficient Downlink Radio Resource Allocation with Carrier Aggregation in LTE-Advanced Networks // IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014. V. 13.
9. LTE-EPC Network Simulator (LENA) [Электронный ресурс]. URL: <http://iptechwiki.cttc.es/> (дата обращения: 29.03.2017).
10. Дроздова В. Г., Лошкарев А. В., Андреев А. В. Исследование эффективности алгоритмов распределенного управления межсотовой интерференцией в нисходящем канале сетей LTE // Вестник СибГУТИ. 2014. № 4. С. 71–79.
11. Drozdova V., Nechaev A., Andreev A. The efficiency of downlink control channel utilization in LTE // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 2015, P. 130–132.
12. ETSI TS136.331 v. 13.0.0, LTE: Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC), Release 13, 2016.
13. ETSI TS136.211 v. 13.0.0, LTE: Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA); Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation, Release 13, 2016.
14. MOS – Mean Opinion Score for VoIP Testing [Электронный ресурс]. URL: <http://www.voipmechanic.com/mos-mean-opinion-score.htm> (дата обращения: 29.03.2017).

Статья поступила в редакцию: 25.01.2017;
Переработанный вариант: 30.03.2017

Андреев Андрей Валерьевич

старший преподаватель кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: ilansk@yandex.ru.

Дроздова Вера Геннадьевна

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: drozdova_vera@mail.ru.

The LTE-Advanced MAC-protocol with carrier aggregation support probability-time characteristics simulation

A. Andreev, V. Drozdova

In this paper, the simulation model and numerical results of simulation of the probability-time characteristics of LTE-Advanced wireless medium access control protocol with carrier aggregation support are described. The characteristics of packet delay time and buffer loss probability depending on input load intensity are demonstrated. The results of the investigation can be used by 4th generation mobile vendors for network quality indicators analysis and optimization.

Keywords: LTE-Advanced, MAC, Carrier aggregation, access protocol, Simulation, probability-time characteristics.