

Исследование эффективности алгоритмов распределённого управления межсотовой интерференцией в нисходящем канале сетей LTE

В.Г. Дроздова, А.В. Лошкарев, А.В. Андреев

В настоящей статье рассматриваются несколько ключевых подходов к решению задачи снижения межсотовой интерференции в мобильных сетях LTE, обусловленной отсутствием повторного использования частот. На основе разработанной авторами имитационной модели был осуществлён сравнительный анализ существующих решений с точки зрения достигаемой пропускной способности и вероятности блокировки каналов трафика PUSCH и PDSCH. Результаты моделирования наглядно демонстрируют неэффективность использования временного разделения ресурсов на краях сот между абонентами, обслуживаемыми разными станциями, в рамках любых процедур координации межсотовой интерференции.

Ключевые слова: LTE, интерференция, нисходящий канал, распределение ресурсов, SINR, пропускная способность.

1. Введение

LTE (*от англ. Long Term Evolution – Долгосрочная Эволюция*) – это технология мобильной связи четвёртого поколения, описываемая спецификациями 3GPP [1]. Сети на базе LTE позиционируются как мультисервисные сети, способные гарантировать требуемое качество обслуживания (QoS – Quality of Service) для самых разнообразных типов трафика (трафик реального времени, голосовой трафик, пакетная передача данных, нечувствительная к времени задержки и пр.). Для обеспечения подобной гибкости в отношении всех видов передаваемых по сети данных, в LTE предусмотрено динамическое распределение ресурсов между пользователями и логическими каналами на MAC (Medium Access Control) подуровне. Распределение ресурсов происходит с периодичностью 1 мс и является частью функции «Планировщика» (Scheduler). Здесь возникает сложная задача нахождения баланса между сигнальной ёмкостью канала управления, помехоустойчивостью сигнальных сообщений и пропускной способностью. Изучению вопросов оптимального планирования ресурсов посвящено множество работ, в частности работы [2–4].

Внимание автора статьи [2] сосредоточено на проблеме, называемой «Blocked PDSCH» – блокировка трафиковых ресурсов, вызванная отсутствием свободных каналов управления. В статье предлагается собственный алгоритм распределения каналов управления и доказываемся его оптимальность посредством имитационного моделирования. Работы [3–4] – лишь немногие примеры предлагаемых в настоящее время алгоритмов динамического распределения ресурсов в мобильных сетях LTE. Однако, несмотря на количество публикаций, посвящённых разработке и исследованию эффективности алгоритмов распределения, до сих пор не рассматривалась комплексная задача определения оптимального меха-

низма планирования сигнальных каналов и каналов управления при необходимости координировать межсотовую интерференцию.

Ещё одной отличительной особенностью сетей LTE является отказ от сотовой концепции – повторного использования частот. Это означает, что абоненты, находящиеся в соседних сотах, передают и принимают данные в одних и тех же полосах частот в одно и то же время, не используя ортогональных последовательностей для того, чтобы различать сигналы, предназначенные для них, порождая межсотовую интерференцию (Inter-Cell Interference). Для решения данной проблемы предлагается использовать эффективные алгоритмы контроля мощности, а также координации межсотовой интерференции (ICIC – inter-cell interference coordination) [5]. Спецификации на реализацию подобных схем координации, также как и на планировщик, не предусмотрены, а это значит, что вендоры используют собственные алгоритмы для решения этой проблемы. В литературе представлен целый ряд публикаций, посвящённых вопросам разработки и исследования эффективных механизмов координации межсотовой интерференции в LTE [6–8].

В статье [6] авторы предлагают децентрализованный алгоритм координации межсотовой интерференции, позволяющий получать большие значения пропускной способности абонентам на краях сот с меньшими затратами на сигнальный обмен между базовыми станциями по сравнению с классическими статическими и централизованными методами координации.

Авторы статьи [7] предлагают полураспределённый (semi-distributed) алгоритм распределения ресурсов, базирующийся на предварительно собранной информации о пользовательских радиоусловиях (SINR – Signal to Noise plus Interference Ratio), в то время как в статье [8] авторы изучают динамические подходы к координации интерференции по интерфейсу X2 (интерфейс взаимодействия между базовыми станциями eNodeB). Однако по-прежнему представляет интерес оценка принципиально достижимых значений относительной пропускной способности и эффективности использования сигнальных и трафиковых ресурсов для любых базовых схем межсотовой координации.

В настоящей статье авторами с помощью имитационного моделирования решалась комплексная задача изучения эффективности различных схем координации межсотовой интерференции с точки зрения пропускной способности и вероятности блокировки сигнальных ресурсов канала PDCCH, используемых планировщиком для информирования абонентов о том, каким образом распределены ресурсы в текущем субкадре (1 мс).

2. Описание задачи

2.1. Механизм распределения ресурсов в сетях LTE

В спецификации [9] описываются основные процедуры и механизмы физических каналов в LTE. Вся ось времени разбивается на 10-миллисекундные интервалы, называемые кадрами. Каждый кадр состоит из 10 одномиллисекундных субкадров. Важно, что распределение ресурсов осуществляется каждую миллисекунду. Пропускная способность системы зависит от ширины полосы частот, которая по стандарту может варьироваться от 1.4 до 20 МГц. Вся полоса частот разбивается на ортогональные поднесущие, частотный разнос между которыми равен 15 кГц. Минимальная порция ресурса, выделяемая абоненту – это 1 мс по времени и 12 поднесущих по частоте или один физический ресурсный блок (RB – Resource Block).

Каждую миллисекунду планировщик, руководствуясь вендорским алгоритмом (эти алгоритмы не стандартизованы), информирует абонентов соты о том, какая часть ресурса, в какой части спектра предназначена для них в восходящем и нисходящем направлении в канале управления PDCCH (Physical Downlink Control Channel). В зависимости от удалённости аба-

нентов от базовой станции планировщик задействует различный объём ресурса для того, чтобы уведомлять абонентов о распределении ресурсов. Минимальный объём ресурса, требуемый для информирования одного абонента – это 36 OFDM-символов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) или один CCE (Control Channel Element – элемент канала управления). Однако для обеспечения помехозащищённости информации управления стандартом предусмотрено 4 опции или 4 уровня агрегирования CCE с различным объёмом избыточных битов (1, 2, 4 и 8 CCE в зависимости от радиоусловий пользователя: чем ниже SINR, тем больше требуется CCE). Таким образом, абоненты, находящиеся на краю соты, в худших радиоусловиях, требуют больше CCE, чтобы узнать решение планировщика.

Тут возникает серьёзная проблема: максимальное число символов, выделяемых под PDCCH в субкадре – это 3 символа, то есть сигнальное пространство планировщика ограничено именно размером этого канала. Есть вероятность того, что при наличии свободного канала трафика (PDSCH и PUSCH) он может быть не выделен абонентам по причине отсутствия свободных CCE. Такая проблема известна под названием «Blocked PDCCH» [2]. В связи с этим при оценке эффективности планирования ресурсов, в частности, с координацией межсотовой интерференцией, представляет интерес оценить вероятность блокировки PDCCH, которая определяется как:

$$P_{\text{Blocked_PDCCH}} = \frac{\sum_{\text{Agg_level}=0}^3 \#CCE_{\text{Agg_level}}}{\#Candidates_for_scheduling}, \quad (1)$$

где $\#CCE_{\text{Agg_level}}$ – число CCE с заданным уровнем агрегирования; $\#Candidates_for_scheduling$ – число абонентов, выбранных планировщиком в текущем субкадре для выделения ресурсов.

2.2. Методы координации межсотовой интерференции

Одним из базовых методов для борьбы с межсотовой интерференцией, вызванной отсутствием повторного использования частот, является координация межсотовой интерференции ICIC по интерфейсу X2 (рис.1) [5].

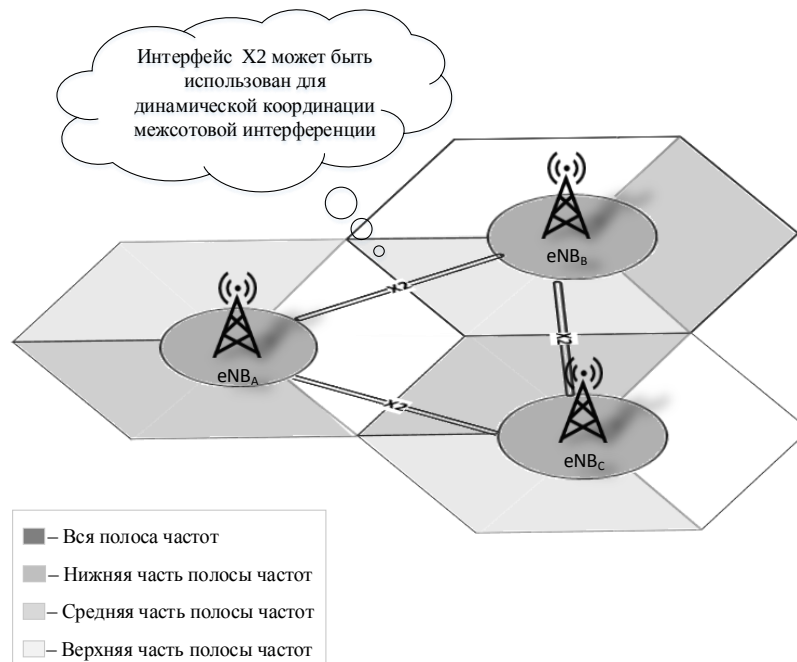


Рис. 1. Координация межсотовой интерференции в LTE

Существует несколько подходов к такой координации: статическая, динамическая и полудинамическая координация. Независимо от того, какой используется подход, его суть сводится к следующему: абонентам, находящимся ближе к приёмопередатчику базовой станции (eNB), может быть выделена вся полоса для передачи данных, так как они передают с меньшей мощностью, а следовательно, создают меньше интерференции соседним сотам. Абонентам же, находящимся на границах сот, выделяется либо часть спектра (fractional frequency reuse – частичное переиспользование частот, рис.2), либо вся полоса частот, но через определённые интервалы времени (Time Frequency Reuse – временное переиспользование частот, рис.3).

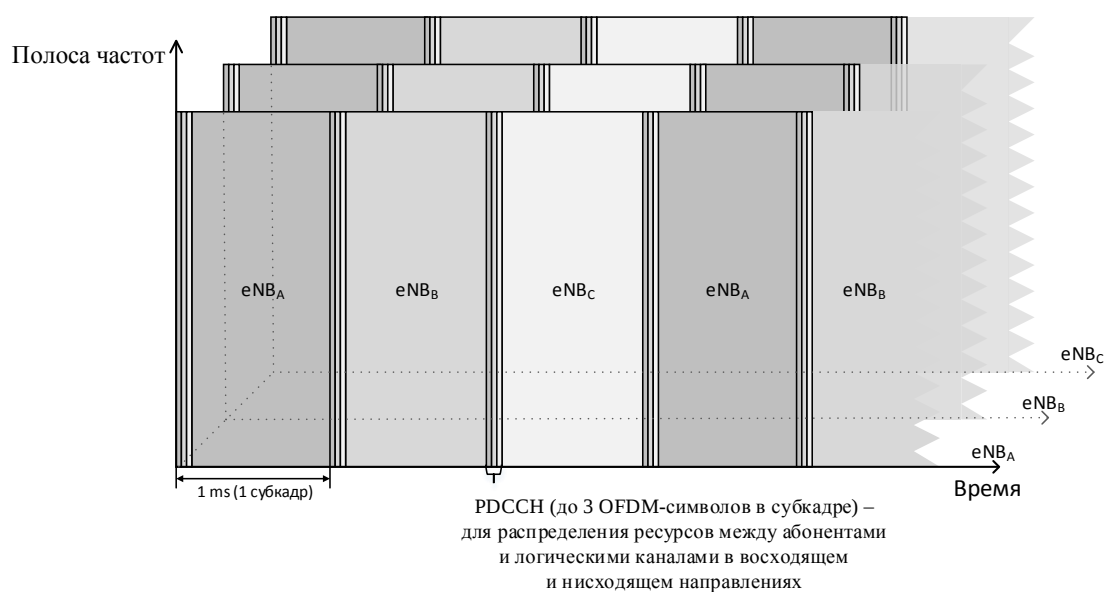


Рис. 2. Временное разделение полосы на краях сот (TFR)

В рамках данной работы авторы ставили перед собой задачу сравнения эффективности частичного и временного переиспользования частот с точки зрения вероятности блокировки канала PDCCH и достигаемой пропускной способности.

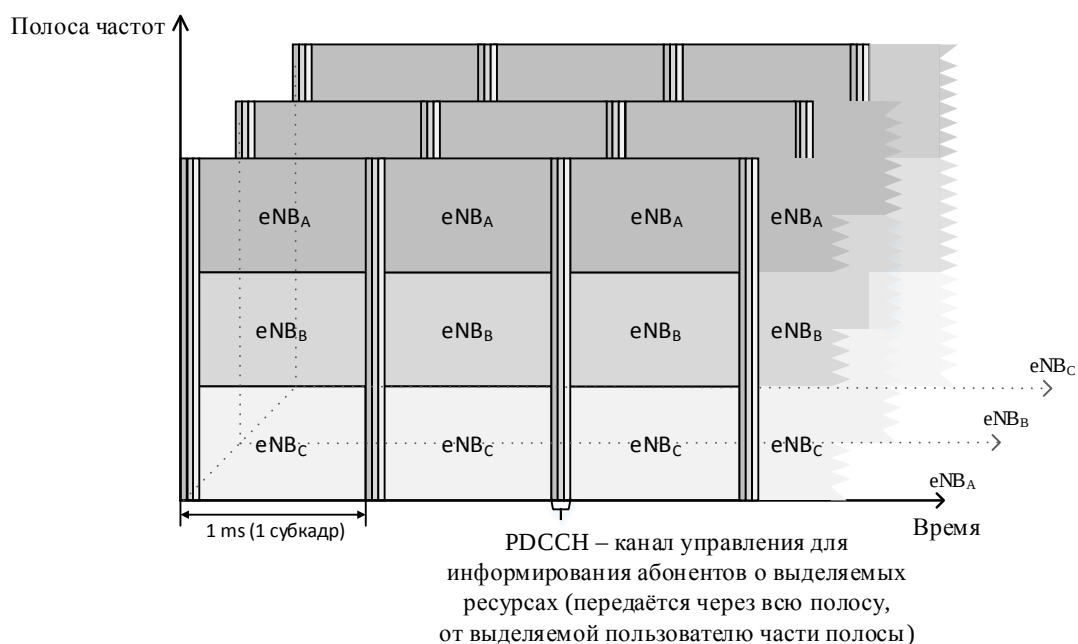


Рис. 3. Частичное переиспользование частот (Fractional Frequency Reuse)

Очевидно, что при частичном переиспользовании частот (рис.3) планировщик обладает большей ёмкостью каналов управления. Можно предположить, что вероятность блокировки канала PDCCH будет значительно ниже, чем при временном частотном переиспользовании (рис.2), так как в последнем случае за период координации (3 субкадра = 3 мс, если коэффициент повторного использования частот равен 3) планировщик задействует лишь те CCE, которые находятся в субкадре передачи eNB (соты).

3. Параметры имитационной модели

В табл. 1 приводятся исходные данные для моделирования.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования алгоритмов распределения ресурсов в мобильных сетях LTE

Параметр	Значение
Размер полосы, МГц (ресурсные блоки)	10 МГц (50 RBs)
Метод дуплексирования восходящего и нисходящего каналов	FDD
Максимальное число CCE для распределения канала трафика в нисходящем направлении (остальные CCE резервируются восходящим каналом и пр.)	32
Число OFDM-символов для PDCCH в субкадре	3
Длительность циклического префикса	Нормальный
Уровень агрегирования CCE	4; 8
Число абонентов в одном субкадре (UE)	1; 3; ..; 15
Число ресурсных блоков на абонента в субкадре	1; 2; ...; 12

В ходе имитационного моделирования были приняты следующие упрощающие допущения, не влияющие принципиально на результаты:

- одна передающая антенна (SIMO);
- в данной программе абонентами запрашивается один и тот же тип сервиса (требуется одинаковые скорости), приоритезация пользователей также не берётся во внимание;
- все абоненты находятся на краю сот, чем обуславливается высокий порядок агрегирования сигнальных каналов (4 и 8), а следовательно, и большая избыточность кодирования;
- затраты ресурсов на прочие физические каналы и сигналы (PCFICH, PHICH, RS, PSS, SSS, PBCH и пр.) не учитываются;
- базовые станции синхронизированы;
- модель трафика: Full Buffer (в очереди всегда есть запросы).

Имитационное моделирование было выполнено в Wolfram Mathematica (версия 10.0). Пакет Mathematica позволяет вычислять функции с произвольной точностью, выполнять большое количество аналитических вычислений и преобразований, строить графики и т.д.

4. Численные исследования

В данном разделе графически представлены результаты, полученные с помощью имитационного моделирования в программной среде Wolfram Mathematica (рис. 4 и 5). Были полу-

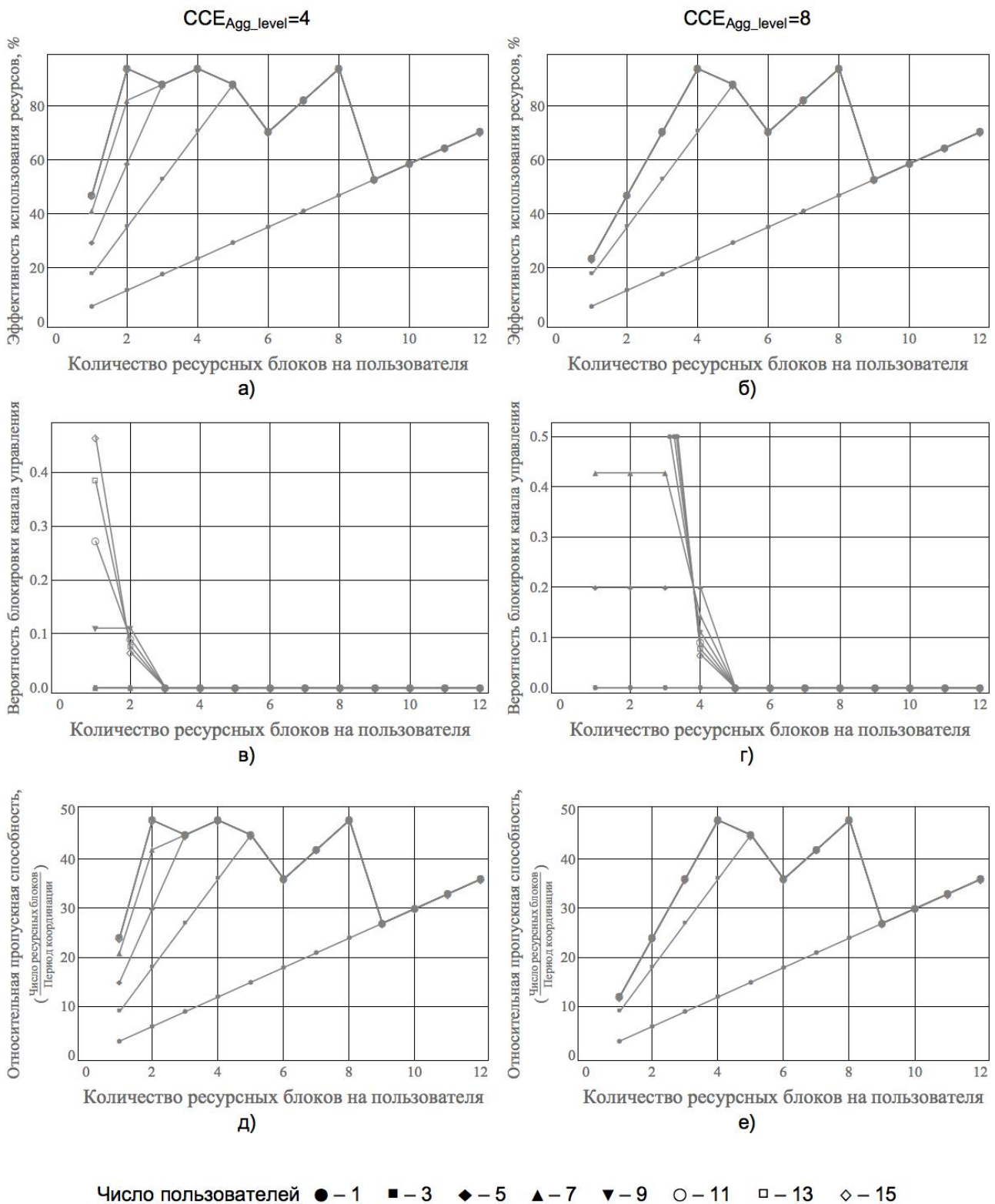
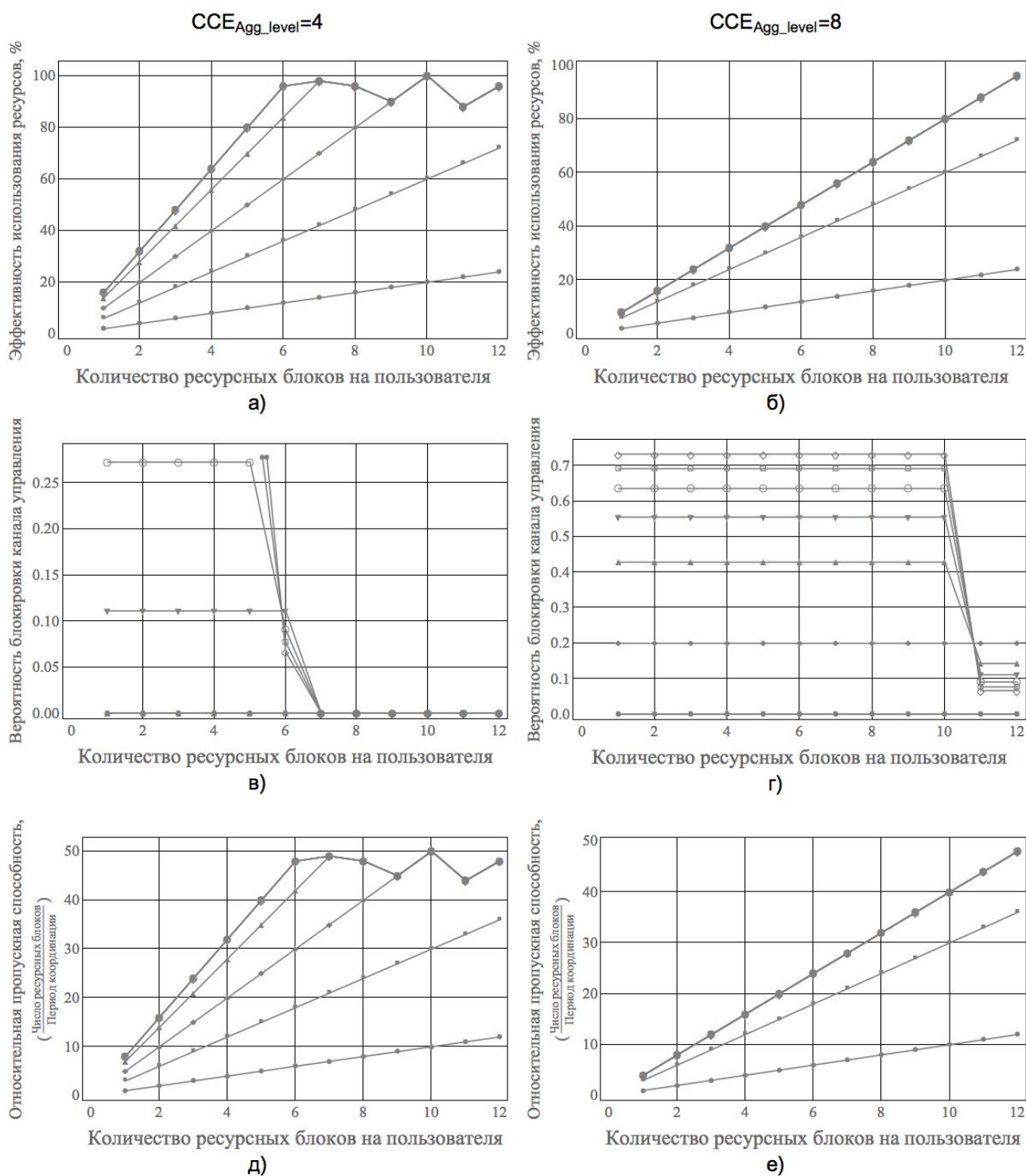


Рис. 4. Частичное переиспользование частот (Fractional Frequency Reuse): а) эффективность использования ресурсов при $CCE_{Agg_level} = 4$; б) эффективность использования ресурсов при $CCE_{Agg_level} = 8$; в) вероятность блокировки каналов управления при $CCE_{Agg_level} = 4$; г) вероятность блокировки каналов управления при $CCE_{Agg_level} = 8$; д) относительная пропускная способность при $CCE_{Agg_level} = 4$; е) относительная пропускная способность при $CCE_{Agg_level} = 8$.



Число пользователей ● – 1 ■ – 3 ◆ – 5 ▲ – 7 ▼ – 9 ○ – 11 □ – 13 ◇ – 15

Рис. 5. Временное переиспользование частот (Time Frequency Reuse): а) эффективность использования ресурсов при $CCE_{Agg_level} = 4$; б) эффективность использования ресурсов при $CCE_{Agg_level} = 8$; в) вероятность блокировки каналов управления при $CCE_{Agg_level} = 4$; г) Вероятность блокировки каналов управления при $CCE_{Agg_level} = 8$; д) относительная пропускная способность при $CCE_{Agg_level} = 4$; е) относительная пропускная способность при $CCE_{Agg_level} = 8$.

чены зависимости эффективности использования ресурсов, вероятности блокировки каналов управления, а также относительная пропускная способность от объёма, запрашиваемого абонентами в субкадре ресурса (определяет тип сервиса) для различного числа пользователей в одном субкадре (от 1 до 8) и двух значений уровня агрегирования канала управления (4 и 8).

Относительная пропускная способность измеряется в ресурсных блоках, выделенных абонентам для передачи данных за период координации интерференции.

Сравнивая полученные зависимости для частичного и временного переиспользования частот (рис.4 и рис.5), можно сделать вывод о том, что при достаточно близких значениях эффективности использования ресурсов, при временном переиспользовании вероятность блокировки канала управления значительно выше, чем при частичном частотном разделении. Это обусловлено большей сигнальной ёмкостью механизма с частичным переиспользованием частот. Также очевидно, что чем выше уровень агрегирования элементов канала управления (чем хуже радиоусловия абонентов), тем выше вероятность блокировки для обоих механизмов координации.

5. Заключение

В данной статье была описана имитационная модель планировщика базовой станции LTE, разработанная для экспериментального исследования вероятностных характеристик, а также эффективности использования имеющихся в системе ресурсов при различных подходах к координации межсотовой интерференции. Данная имитационная модель позволяет учесть внутренние параметры MAC-протокола сетей LTE (форматы и структуры кадров, использование X2-интерфейса для координации и пр.).

Литература

1. 3rd Generation Partnership Project, «Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Layer Procedures (Release 8)», TS 36.213v8.4.0, September 2008.
2. *Hosein P.* Resource allocation for the LTE Physical Downlink Control Channel, GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE, p.1-5.
3. *Chang R., Tao Z., Zhang J. and Kuo C.* A Graph-Based Approach to Multi-Cell OFDMA Downlink Resource Allocation, in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (Globecom)*, Nov. 2008.
4. *Shen Z., Andrews J. G., and Evans B. L.* Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems With Proportional Rate Constraints, *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 4, no. 6, Nov. 2005.
5. *Sesia S., Toufik I., Baker M.* LTE – the UMTS Long Term Evolution: from theory to practice, 2nd edition, July 2011, p.792.
6. *Fraimis I. G., Papoutsis V. D. and Kotsopoulos S. A.* A Decentralized Subchannel Allocation Scheme with Inter-cell Interference Coordination (ICIC) for Multi-Cell OFDMA Systems, *IEEE Globecom* 2010.
7. *Li G. and Liu H.* Downlink Resource Allocation for Multi-Cell OFDMA System, *IEEE Tran. Wireless. Commun.*, vol. 5, no 12, pp. 3451-3459, Dec. 2006.

8. *Rahman M., Yanikomeroglu H. and Wong W.* Interference avoidance with dynamic inter-cell coordination for downlink LTE system, in Proc., IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC), April 2009.
9. 3rd Generation Partnership Project, «Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Channels and Modulation (Release 9)», TS 36.211v9.1.0, March 2010.

Статья поступила в редакцию 15.10.2014.

Дроздова Вера Геннадьевна

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств СибГУТИ (630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-383, e-mail: drozdova_vera@mail.ru.

Лошкарёв Александр Васильевич

аспирант, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств СибГУТИ (630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-383, e-mail: mailbox@aloshkarev.com.

Андреев Андрей Валерьевич

аспирант, ассистент кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств СибГУТИ (630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-383, e-mail: 5t0dgm@gmail.com.

**Analysis of efficiency of distribute inter-cell interference control algorithms
in LTE networks**

V.G. Drozdova, A.V. Loshkarev, A.V. Andreev

This article covers some key approaches to problem solving of reducing inter-cell interference in mobile LTE networks, caused by lack of frequency reuse. On the basis of the authors' simulation model, a comparative analysis of the existing solutions in terms of attainable bandwidth and the probability of blocking traffic channels PUSCH and PDSCH was implemented. Simulation results demonstrate the inefficient use of time division of resources at the edges of cells between subscribers served by different stations as part of any inter-cell interference coordination procedures.

Keywords: LTE, interference, downlink resource allocation, SINR, bandwidth.