

Логинов Вячеслав Аркадьевич

**Исследование методов случайного доступа к
общему каналу беспроводных локальных и
сотовых сетей**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа прошла апробацию в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН)

Научный руководитель: **Ляхов Андрей Игоревич**
доктор технических наук,
профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Защита состоится 25.09.2020 года в 12:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.05.12.13.005 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «05» июня 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Требования пользователей к пропускной способности сотовых сетей растут с каждым годом. Современные сотовые сети используют лицензируемые полосы частот, в которых передача разрешена только устройствам одного сотового оператора-владельца лицензии. Несмотря на ряд преимуществ такого подхода, у него есть как минимум один существенный недостаток, препятствующий дальнейшему росту пропускной способности, — ограниченная ширина и дороговизна лицензируемых диапазонов частот. В связи с этим одним из наиболее перспективных способов увеличения пропускной способности сотовых сетей является использование нелицензируемых частот для передачи данных.

Для решения проблемы дефицита частотных ресурсов консорциум 3GPP, занимающийся разработкой спецификаций сотовых сетей LTE, разработал ряд технологий (LTE-LAA, LTE-eLAA, NR-U), позволяющих базовой станции сотовой сети (БССС) передавать данные пользовательскими устройствами в нелицензируемом диапазоне 5 ГГц. Одна из главных сложностей работы в этом диапазоне заключается в том, что он уже используется другими технологиями связи, в частности, беспроводными локальными сетями, построенными по технологии Wi-Fi.

И станции беспроводной локальной сети (СБЛС), и БССС используют методы случайного доступа к каналу, основанные на множественном доступе с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ. CSMA/CA). В частности, перед каждой попыткой передачи они выполняют процедуру отсрочки. Основное отличие методов доступа заключается в том, что СБЛС всегда может начать передачу данных в момент окончания процедуры отсрочки, в то время как БССС из-за протокольных ограничений может начать передачу данных только на границе слотов в лицензируемом канале.

Кроме того, в связи с тем, что в сотовых сетях используются методы случайного доступа, коллизии передач неизбежны, как и обусловленные ими существенные потери канальных ресурсов. В отличие от беспроводных локальных сетей, имеющих механизм RTS/CTS, в спецификации сотовых сетей отсутствуют какие-либо механизмы снижения негативного влияния коллизий на их пропускную способность. Поэтому актуальными являются разработка и анализ методов детектирования и разрешения коллизий для БССС, позволяющих как повысить пропускную способность сотовых сетей, так и обеспечить справедливое разделение канальных ресурсов между беспроводными локальными и сотовыми сетями.

Степень разработанности темы. Случайный доступ к каналу является глубоко изученной темой, однако исследование совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей в одном и том же нелицензируемом канале с учетом специфики соответствующих технологий является открытой задачей. Исследованиям методов случайного доступа в локальных и сотовых сетях посвящено значительное количество работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных учёных: Н.Д. Введенской, В.В. Зяблова, Е.А. Крука, А.И. Ляхова, К.В. Михайлова, А.Н. Рыбко, С.Н. Степанова, А.М. Тюрликова, И.И. Цитовича, Б.С. Цыбакова, В. Bellalta, G. Bianchi, M. Dohler, L. Kleinrock,

I. Tinirello и др. Исследованию совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей в одном нелицензируемом канале также посвящен ряд работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных учёных: С.Д. Андреева, Ю.В. Гайдамака, Е.А. Кучерявого, К.Е. Самуйлова, Е.М. Хорова, Q. Chen, M. Cierny, M. Ghosh, T. Henderson, S. Lagen, M. Mehrnoush и др.

Практически все работы, посвященные исследованию методов доступа сотовых сетей к нелицензируемому каналу, используют предположение о том, что БССС посылает резервирующий сигнал после окончания процедуры отсрочки. Однако, во-первых, этот подход приводит к возникновению накладных расходов, так как резервирующий сигнал не несет никаких пользовательских данных. Во-вторых, спецификация сотовых сетей LTE допускает реализацию метода доступа БССС к нелицензируемому каналу без резервирующего сигнала, эффективность которой на момент публикации результатов диссертации мало изучена. Таким образом, возникает необходимость проведения сравнительного анализа методов доступа БССС к нелицензируемому каналу и построения аналитических моделей, позволяющих оценить эффективность рассматриваемых методов доступа.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности методов случайного доступа в сотовых сетях при совместном существовании с беспроводными локальными сетями в общем канале нелицензируемого частотного диапазона.

Для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

1. Проведение сравнительного анализа методов доступа к нелицензируемому каналу в сотовых сетях при помощи аналитического моделирования.
2. Разработка метода разрешения коллизий для БССС, позволяющего обнаруживать и разрешать коллизии передач СБЛС и БССС, снизив тем самым негативное влияние коллизий на эффективность работы беспроводных локальных и сотовых сетей.
3. Разработка аналитической модели работы сети, использующей предложенный метод разрешения коллизий, которая позволит оценить вероятность разрешения коллизии и найти пропускные способности беспроводной локальной и сотовой сетей.

Методы исследования. В диссертации используются методы теории телекоммуникационных сетей, теории вероятностей, теории случайных процессов, теории цепей Маркова, математического и комбинаторного анализа. При имитационном моделировании используется среда имитационного моделирования ns-3.

Научная новизна. В диссертации впервые:

- Проведен сравнительный анализ методов доступа БССС к нелицензируемому каналу с применением и без применения резервирующего сигнала, построены аналитические модели работы системы из СБЛС и БССС, работающих в одном канале, позволяющие сравнить эффективность рассматриваемых методов доступа.
- Разработан метод разрешения коллизий для БССС, позволяющий обнару-

живать и разрешать коллизии передач СБЛС и БССС, а также разработана аналитическая модель, с помощью которой была показана его высокая эффективность.

Практическая ценность и реализация результатов. Использование теоретических результатов, полученных в диссертации, позволит увеличить пропускную способность сотовых сетей, а также добиться более справедливого и эффективного разделения канальных ресурсов между устройствами беспроводных локальных и сотовых сетей.

Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, разработанные модели и методы использованы в НИР, выполняемых ИППИ РАН по проектам: РФФИ «Методы совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей в нелицензируемом диапазоне радиочастотного спектра» (№ 18-07-01223 а), РНФ «Цифровые технологии и их применение» (№ 14-50-00150), Мегагрант Правительства Российской Федерации «Облачные беспроводные сети пятого и последующих поколений» (договор № 14.W03.31.0019), «Разработка и анализ методов повышения качества обслуживания гетерогенного трафика в беспроводных сетях пятого и последующих поколений» (по теме Государственного задания № 0061-2019-0016), а также для организации учебного процесса на Кафедре проблем передачи информации и анализа данных МФТИ в ИППИ РАН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная аналитическая модель работы в общем нелицензируемом канале системы из БССС и СБЛС для случая, когда БССС используют метод доступа с резервирующим сигналом, учитывает влияние асимметричных коллизий и позволяет оценить пропускную способность обеих сетей, а также оценить справедливость и эффективность разделения канальных ресурсов.
2. Разработанная аналитическая модель работы в общем нелицензируемом канале системы из БССС и СБЛС для случая, когда БССС используют метод доступа без резервирующего сигнала, позволяет оценить пропускную способность обеих сетей, а также определить область значений параметров метода доступа базовой станции сотовой сети, в которой достигается справедливое и эффективное разделение канальных ресурсов.
3. Разработанный метод разрешения коллизий для БССС позволяет обнаруживать и разрешать коллизии передач БССС и СБЛС, что приводит к увеличению пропускной способности сотовой сети до 25% по сравнению с методом доступа с резервирующим сигналом, а пропускной способности беспроводной локальной сети – до 2 раз, а также улучшить справедливость разделения канальных ресурсов между беспроводными локальными и сотовыми сетями.
4. Разработанная аналитическая модель работы системы из СБЛС и БССС, использующих предложенный метод разрешения коллизий, позволяет найти пропускные способности беспроводной локальной и сотовой сетей, а также показать эффективность предложенного метода для решения проблемы асимметричных коллизий.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях: IFIP Networking 2019 Conference (NETWORKING 2019) (Польша, 2019 г.), IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (Турция, 2019 г.), 2019 July IEEE 802.11 Coexistence Workshop (Австрия, 2019 г.), «Информационные технологии и системы» (Россия, 2019 г.), а также на семинарах ИППИ РАН.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 5 статей [1–5] — в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК (в том числе 5 статей [1–5] в журналах и сборниках, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science), а также 3 статьи [6–8] — в сборниках трудов иных конференций. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Алгоритмы и модели, являющиеся результатами диссертации, разработаны диссертантом лично. Во всех приведенных работах вклад соавторов заключался в постановке задач, частичном анализе литературы и частичном получении и анализе численных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 105 страниц, включая 32 рисунка и 9 таблиц. Библиография включает 91 наименование.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассматриваются особенности методов доступа к нелицензируемому каналу в сотовых сетях, приводится сравнение с аналогичными методами доступа в беспроводных локальных сетях, приводится обзор работ, посвящённых теме диссертации, и формулируются задачи диссертации.

В современных беспроводных локальных сетях используется следующая реализация метода доступа CSMA/CA. Перед совершением каждой попытки передачи кадра СБЛС выполняет процедуру отсрочки. Для этого она сначала инициализирует счетчик отсрочки случайным целым числом, равномерно распределенным на интервале $[0, W - 1]$, где W — это текущее значение конкурентного окна. Счетчик отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда СБЛС обнаруживает канал свободным в течение слота отсрочки длительностью $\sigma = 9$ мкс. В противном случае, т.е. если СБЛС обнаруживает, что канал занят, она замораживает счетчик отсрочки до тех пор, пока канал снова не станет свободным. Как только значение счетчика отсрочки достигает нуля, СБЛС начинает попытку передачи данных, длительность которой не превышает значение $TXOP_{limit}$. Если попытка была успешной, т.е. если был получен кадр-подтверждение, текущее значение W конкурентного окна устанавливается равным минимальному значению W_{min} . Если же кадр-подтверждение не был получен, то попытка передачи считается неуспеш-

ной, и значение конкурентного окна становится равным $W = \min(2W, W_{max})$, где W_{max} — это максимальное значение конкурентного окна.

При использовании CSMA/CA возможны коллизии при передаче кадров, уменьшающие эффективность работы СБЛС, особенно в плотных сетях с большим числом устройств. Для решения этой проблемы СБЛС может перед передачей данных обмениваться с СБЛС-получателем короткими служебными кадрами RTS и CTS. Как итог, использование этого механизма приводит к тому, что в коллизию могут попадать только служебные кадры RTS, что приводит к повышению пропускной способности беспроводной локальной сети в сценариях с большим числом активных или скрытых СБЛС.

Метод доступа к нелицензируемому каналу в сотовых сетях также основан на CSMA/CA и во много схож с аналогичным методом в беспроводных локальных сетях. Однако есть ряд значительных отличий. Во-первых, в сотовых сетях отсутствуют какие-либо аналоги механизма RTS/CTS. Во-вторых, передача данных БССС может начинаться только на границе слотов в лицензируемом канале. Спецификация 3GPP не определяет поведение БССС в случае, если процедура отсрочки завершилась не на границе слотов в лицензируемом канале. Если БССС будет ожидать эту границу, то другие устройства (например, СБЛС) могут занять канал в это время, т.е. у БССС случится неудача доступа. Согласно спецификации, в таком случае БССС должна повторить процедуру отсрочки с текущим значением конкурентного окна.

Одним из возможных решений этой проблемы, которое часто используется в литературе, является посылка резервирующего сигнала (шума) вплоть до ближайшей границы слотов в лицензируемом канале для того, чтобы не допустить занятия канала другими устройствами. Помимо того, что посылка резервирующего сигнала является неэффективным расходом канальных ресурсов, у нее есть, как минимум, еще один недостаток. Допустим, что СБЛС и БССС одновременно окончили процедуру отсрочки и начали передачу кадра RTS и резервирующего сигнала, соответственно. Если длительность кадра RTS меньше, чем длительность резервирующего сигнала, то произойдет «асимметричная» коллизия: СБЛС не получит в ответ кадр CTS, задетектирует коллизию и удвоит текущее значение своего конкурентного окна, в то время как БССС не задетектирует коллизию, так как передаваемые ею данные не будут повреждены, и установит текущее значение конкурентного окна равным минимальному значению. Очевидно, что это приведет к более высокой вероятности доступа БССС к каналу и, следовательно, несправедливому разделению частотных ресурсов.

В данной диссертации рассматривается сценарий совместного существования, в котором система из N_w СБЛС и N_l БССС работает в общем нелицензируемом канале, см. рис. 1. Кроме того, рассматривается вспомогательный (базовый) сценарий, в котором все БССС заменены на СБЛС.

При анализе эффективности методов доступа к каналу в сотовых сетях будем придерживаться критериев оценки, используемых консорциумом 3GPP, разрабатывающим спецификации сотовых сетей. В качестве первого критерия будем ис-

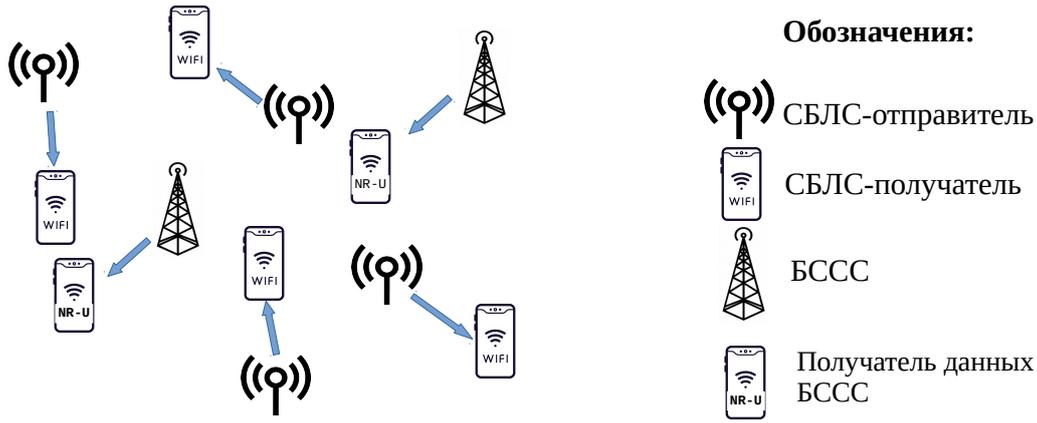


Рис. 1. Рассматриваемый сценарий совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей

пользовать *справедливость* (англ. fairness) разделения канальных ресурсов между устройствами различных технологий в сценарии совместного существования. Разделение будем называть справедливым, если удельная пропускная способность СБЛС в сценарии совместного существования больше либо равна удельной пропускной способности СБЛС в базовом сценарии.

Вторым критерием является *эффективность* БССС. Согласно нему удельная пропускная способность БССС в сценарии совместного существования должна быть выше удельной пропускной способности СБЛС в базовом сценарии.

При анализе численных результатов будем использовать понятие *прирост пропускной способности* СБЛС (БССС), под которым будем понимать отношение удельной пропускной способности СБЛС (БССС) в сценарии совместного существования к удельной пропускной способности СБЛС в базовом сценарии. Заметим, что если эта величина положительна и для СБЛС, и для БССС, метод доступа БССС является справедливым и эффективным.

Во второй главе разрабатывается аналитическая модель работы системы из N_w СБЛС и N_l БССС для случая, когда БССС после окончания процедуры отсрочки посылает резервирующий сигнал вплоть до ближайшей границы слотов в лицензируемом канале.

Будем считать, что передача БССС с учетом длительности t резервирующего сигнала составляет суммарно T_l секунд, а в течение бесколлизийной передачи БССС доставляет $d_l(1 - t/T_l)$ байт данных. Кроме того, будем считать, что не затронутая коллизией часть передачи БССС успешно принимается.

Длительность успешной передачи СБЛС равна $T_{w,s} < T_l$. Кроме того, будем предполагать, что неуспешная попытка передачи СБЛС длится $T_{w,c} \ll T_{w,s}$ в случае использования механизма RTS/CTS и $T_{w,c} \approx T_{w,s}$ в противном случае. В случае успешной передачи СБЛС доставляет d_w байт данных.

Будем считать, что длительность t интервала между концом процедуры отсрочки БССС и следующей границей слотов в нелицензируемом канале распределена равномерно на интервале $[0, \theta)$, где θ — это длительность слота в лицензиру-

емом канале.

Так как в рассматриваемом случае БССС и СБЛС отсчитывают отсрочку синхронно, для нахождения пропускных способностей рассматриваемых сетей используется метод моделирования Дж. Бьянки, основанный на понятии виртуального слота — интервала между двумя отсчетами времени отсрочки этих сетей.

Пропускная способность S_w беспроводной локальной сети равна:

$$S_w = \frac{\pi_{w,s} d_w}{T_{slot}}, \quad (1)$$

где T_{slot} — это средняя длительность виртуального слота, $\pi_{w,s}$ — это вероятность того, что в выбранном виртуальном слоте какая-либо СБЛС успешно передаст свои данные:

$$\pi_{w,s} = N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1} (1 - \tau_l)^{N_l},$$

где τ_l (τ_w) — это вероятность того, что БССС (СБЛС) выберет текущий слот для передачи.

Пропускная способность S_l сотовой сети в случае, когда в беспроводной локальной сети механизм RTS/CTS не используется, равна:

$$S_l = \left[p_{l,1} \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \left(1 - \frac{T_{w,c}}{T_l}\right) \right] \frac{d_l}{T_{slot}},$$

где $p_{l,1}$ — это вероятность того, что в выбранном виртуальном слоте произойдет бесколлизийная передача какой-либо БССС, в этом случае $\theta/2$ будет в среднем занимать резервирующий сигнал; $p_{l,2}$ — это вероятность того, что в выбранном виртуальном слоте произойдет коллизия передачи какой-либо БССС и хотя бы одной СБЛС, в этом случае часть передачи, равная $T_{w,c}/T_l$, будет повреждена.

Пропускную способность S_l сотовой сети в случае, когда в беспроводной локальной сети используется механизм RTS/CTS, можно найти следующим образом:

$$S_l = \left[p_{l,1} \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \left(\frac{T_{w,c}}{\theta} \left(1 - \frac{T_{w,c}}{T_l}\right) + \left(1 - \frac{T_{w,c}}{\theta}\right) \left(1 - \frac{\theta + T_{w,c}}{2T_l}\right) \right) \right] \frac{d_l}{T_{slot}},$$

где $T_{w,c}/\theta$ — это вероятность того, что передача данных повредит часть данных БССС, а с вероятностью $1 - T_{w,c}/\theta$ случится асимметричная коллизия и передача БССС не будет повреждена передачей СБЛС (резервирующий сигнал будет в этом случае занимать в среднем $(\theta + T_{w,c})/2$).

Перейдем к результатам численного моделирования. Рассмотрим сценарий, в котором число СБЛС равно числу БССС. Полученные при помощи аналитической и имитационной модели пропускные способности беспроводной локальной и сотовой сетей в таком сценарии показаны на рис. 2.

Как можно заметить, пропускная способность беспроводной локальной сети заметно ниже пропускной способности сотовой сети. Кроме того, использование механизма RTS/CTS в беспроводной локальной сети приводит не к увеличению,

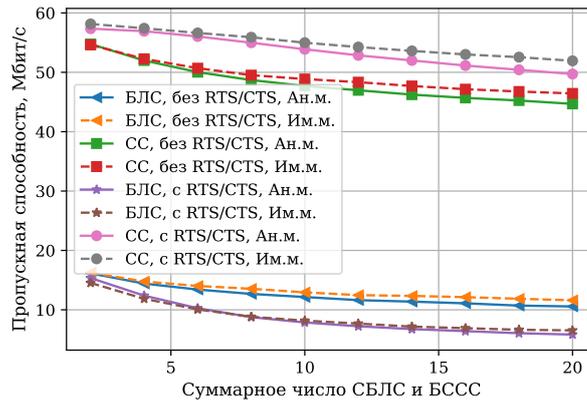


Рис. 2. Пропускная способность беспроводной локальной (БЛС) и сотовой (СС) сетей при равном числе СБЛС и БССС, полученная при помощи имитационной («Им.м.») и аналитической («Ан.м.») моделей

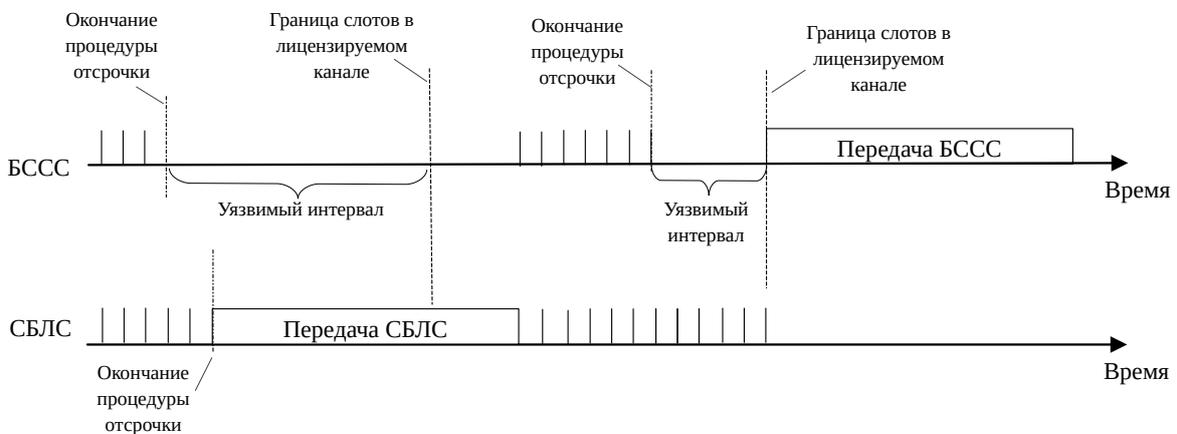


Рис. 3. Уязвимый интервал при использовании реализации метода доступа без резервирующего сигнала

а к уменьшению ее пропускной способности из-за асимметричных коллизий.

В третьей главе проведена оценка эффективности работы метода доступа БССС без резервирующего сигнала. Для этого построено две модели работы системы из 1 БССС и N СБЛС. В частности, первая модель работы системы написана в предположении использования идеального (мгновенного) механизма определения занятости среды, когда БССС/СБЛС мгновенно детектируют начало передачи другого устройства. Во второй модели проведено обобщение на случай, когда используемый механизм определения занятости канала неидеален.

Перейдем к более детальному рассмотрению аналитической модели с идеальным механизмом определения занятости канала.

После окончания процедуры отсрочки, БССС ожидает ближайшую границу слотов в лицензируемом канале, т.е. начинается уязвимый интервал, см. рис. 3. Согласно спецификации, если в конце уязвимого интервала БССС обнаруживает, что общий канал занят, она повторяет процедуру отсрочки. В связи с тем, что границы слотов отсрочки и слотов в лицензируемом канале не совпадают, а определение занятости канала происходит мгновенно, коллизиями СБЛС и БССС

будем пренебрегать, а, значит, БССС будет всегда использовать минимальное значение $W_{l,min}$ конкурентного окна.

Из-за того, что в течение уязвимого интервала БССС останавливает свой счетчик отсрочки, в то время как СБЛС продолжают отсчет времени отсрочки, используемый в главе 2 подход здесь не применим. Для того чтобы найти пропускную способность СБЛС (БССС), будем оценивать среднюю длительность интервала E_w (E_l) между двумя последовательными окончаниями успешных передач выбранной СБЛС (БССС). В таком случае пропускная способность S_w (S_l) беспроводной локальной (сотовой) сети определяется при помощи следующих формул:

$$S_w = N \cdot \frac{d_w}{E_w}, \quad S_l = \frac{d_l}{E_l}. \quad (2)$$

Переопределим значение термина *виртуальный слот*, который теперь будет обозначать интервал времени между двумя последовательными отсчетами счетчика отсрочки выбранной СБЛС (БССС).

Пусть $\rho_{l,c}$ — это вероятность неудачи доступа БССС, которая происходит, если БССС завершила процедуру отсрочки, но обнаружила в конце уязвимого интервала, что общий канал занят. Кроме того, введем $\rho_{w,c}$ — вероятность коллизии выбранной СБЛС при условии, что она выбрала текущий слот для передачи.

Пусть $a_{w,i}$ ($a_{l,i}$) — это средняя длительность попытки передачи номер i , совершаемой СБЛС (БССС). Попытка передачи СБЛС состоит из процедуры отсрочки и собственно передачи данных. В случае БССС попытка передачи также содержит в себе уязвимый интервал или его часть. Используя введенные обозначения, среднюю длительность интервала E_w (E_l) между двумя последовательными успешными передачами СБЛС (БССС) можно найти следующим образом:

$$E_w = a_{w,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{w,i} (\rho_{w,c})^{i-1}; \quad E_l = a_{l,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{l,i} (\rho_{l,c})^{i-1}. \quad (3)$$

Средняя длительность $a_{w,i}$ попытки передачи СБЛС номер i равна:

$$a_{w,i} = \frac{W_{w,i} - 1}{2} T_{w,slot} + (1 - \tau_w)^{N-1} T_{w,s} + (1 - (1 - \tau_w)^{N-1}) T_{w,c}, \quad (4)$$

где $T_{w,slot}$ — это средняя длительность виртуального слота СБЛС, $W_{w,i}$ — это значение конкурентного окна СБЛС при выполнении попытки передачи i .

Попытка передачи БССС номер i начинается с выполнения процедуры отсрочки. После нее с вероятностью $1 - \rho_{l,c}$ ни одна из СБЛС не начнет передачу, пересекающую ближайшую границу слотов в лицензируемом канале, и БССС начнет передачу данных в конце уязвимого интервала. В противном случае, с вероятностью $\rho_{l,c}$ случится неудача доступа БССС, происходящая в одном из следующих случаев: а) с вероятностью $\xi_{c,1}$ через промежуток времени со средней длительностью $V_{c,1}$ после начала уязвимого интервала ровно одна СБЛС начнет передачу, пересекающую границу уязвимого интервала, причем в течение этого

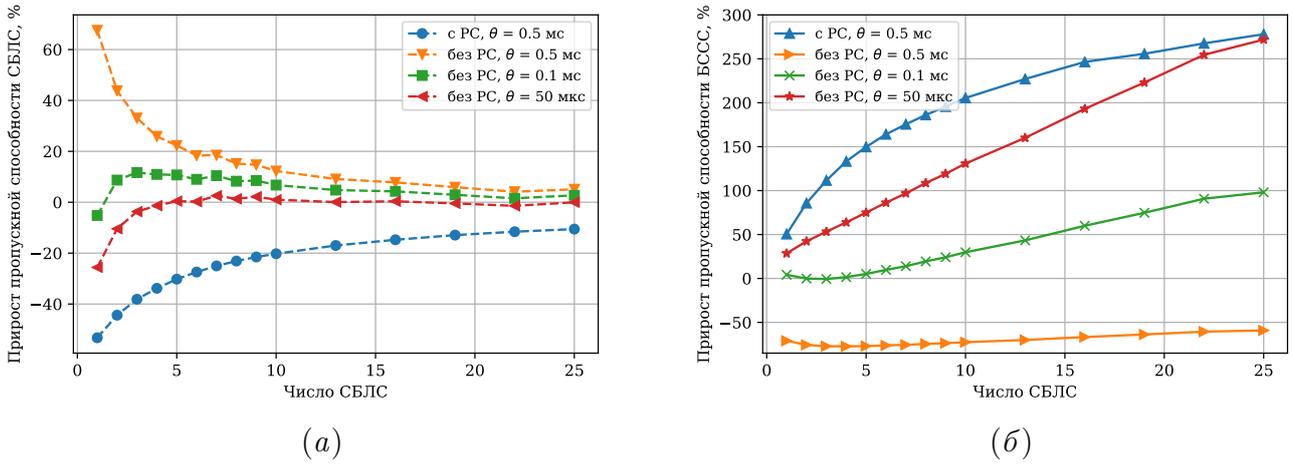


Рис. 4. Прирост пропускной способности СБЛС (а) и БССС (б) без механизма RTS/CTS

промежутка произойдет коллизия двух СБЛС; б) с вероятностью $\xi_{c,2}$ через промежуток времени со средней длительностью $V_{c,2}$ после начала уязвимого интервала ровно одна СБЛС начнет передачу, пересекающую границу уязвимого интервала, причем в течение этого промежутка ни одна СБЛС не начнет передачу; в) с вероятностью $\xi_{c,3}$ через промежуток времени со средней длительностью $V_{c,3}$ произойдет коллизия СБЛС, которая пересечет границу уязвимого интервала. Вероятностью остальных событий, приводящих к неудаче доступа БССС, пренебрегаем. Таким образом, средняя длительность $a_{l,i}$ попытки передачи БССС номер i равна:

$$a_{l,i} = \frac{W_{l,min} - 1}{2} T_{l,slot} + (1 - \rho_{l,c})(V_s + T_l) + \rho_{l,c} \left[\frac{\xi_{c,1}(V_{c,1} + T_{w,s}) + \xi_{c,2}(V_{c,2} + T_{w,s}) + \xi_{c,3}(V_{c,3} + T_{w,c})}{\xi_{c,1} + \xi_{c,2} + \xi_{c,3}} \right],$$

где $T_{l,slot}$ — это средняя длительность виртуального слота БССС, V_s — это средняя длительность уязвимого интервала при условии его успешного окончания.

Перейдем к численным результатам. Рассмотрим сценарий, в котором СБЛС не используют механизм RTS/CTS, см. рис. 4. В случае использования метода доступа без резервирующего сигнала пропускная способность СБЛС заметно увеличивается, и в большинстве случаев распределение ресурсов оказывается справедливым для всех θ . Что касается пропускной способности БССС, без использования резервирующего сигнала эффективная работа возможна, только если используется θ меньше 100 мкс.

Если СБЛС используют механизм RTS/CTS, результаты, в целом, схожи с предыдущим случаем за исключением того, что справедливое распределение ресурсов наблюдается, только если используется длительность θ слотов в лицензируемом канале более 100 мкс.

Построим модель для случая, когда используемый механизм определения занятости канала неидеален. Будем считать, что если передача СБЛС началась менее чем за σ до конца уязвимого интервала, то с вероятностью P БССС не успе-

ет задетектировать начало передачи СБЛС и тоже начнет передачу, что приведет к коллизии. Аналогично будем считать, что если БССС начинает передачу менее чем за σ до завершения последнего слота отсрочки СБЛС, то эта СБЛС также не успеет задетектировать начало передачи БССС с той же вероятностью P . Для упрощения изложения в данном разделе будем рассматривать только случай, когда в беспроводной локальной сети механизм RTS/CTS не используется, и, как следствие, $T_{w,c} = T_{w,s} = T_w$.

Для моделирования рассматриваемой системы, воспользуемся подходом, аналогичным использованному в первой модели данной главы. Согласно нему, пропускная способность S_w беспроводной локальной сети равна $S_w = N \frac{d_w}{E_w}$, а $E_w = a_{w,1} + \sum_{i=2}^{\infty} a_{w,i} (\rho_{w,c})^{i-1}$, где $a_{w,i}$ — это средняя длительность попытки передачи номер i СБЛС, а $\rho_{w,c}$ — это вероятность неуспешной передачи СБЛС при условии, что она начала передачу в данном слоте.

Отметим, что при использовании неидеального механизма определения занятости канала коллизия СБЛС и БССС может произойти в двух случаях: а) если СБЛС начнет свою передачу в начале слота, отстоящего менее чем σ от границы слотов в лицензируемом канале, на которой БССС запланировала начало своей передачи, а БССС, в свою очередь, не сможет детектировать начало этой передачи СБЛС (такой слот далее будем называть *коллизийным слотом первого типа*); б) если СБЛС выберет для передачи слот отсрочки, начало которого находится менее чем через σ после начала передачи БССС, и эта СБЛС не сможет задетектировать начало передачи БССС (такой слот далее будем называть *коллизийным слотом второго типа*).

Для нахождения E_w необходимо подсчитать, с какой вероятностью хотя бы одна СБЛС начнет передачу в течение уязвимого интервала, а также в коллизийных слотах первого и второго типов. Пусть $\rho_{l,1}$ — это вероятность того, что хотя бы одна СБЛС начнет передачу в течение уязвимого интервала; $\rho_{l,2}$ и $\rho_{l,3}$ — это вероятности того, что хотя бы одна СБЛС начнет передачу в коллизийном слоте первого и второго типов, соответственно.

Найдем среднюю длительность $a_{w,i}$ попытки передачи номер i выбранной СБЛС. По окончании процедуры отсрочки СБЛС начинает попытку передачи данных, которая закончится через T_l , если произойдет коллизия с БССС. Это происходит в двух случаях: а) если эта попытка передачи началась в коллизийном слоте первого типа (это происходит с вероятностью $\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2}))$) и БССС ее не задетектировала; б) если эта попытка передачи началась в коллизийном слоте второго типа (это происходит с вероятностью $\tau_l(1 - \rho_{l,1})$) и СБЛС не задетектировала начавшуюся перед этим передачу БССС. Во всех остальных случаях попытка передачи закончится через T_w . В итоге, средняя длительность $a_{w,i}$ попытки передачи номер i СБЛС равна:

$$a_{w,i} = \frac{W_{w,i} - 1}{2} T_{w,slot} + P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2}))T_l + P\tau_l(1 - \rho_{l,1})T_l + \\ + (1 - P\tau_l(1 - (\rho_{l,1} - \rho_{l,2})) - P\tau_l(1 - \rho_{l,1}))T_w.$$

Перейдем к нахождению пропускной способности S_l сотовой сети. Будем называть попытку передачи БССС успешной, только если передаваемые данные не повреждены коллизией с передачей СБЛС. Если БССС начала передачу данных, то они оказываются повреждены коллизией с СБЛС с вероятностью $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})$, а, значит, в среднем на одну успешную передачу БССС приходится $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3}) / (1 - P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3}))$ поврежденных. При этом нужно учесть, что в случае коллизии неповрежденная часть передачи БССС, имеющая длительность $T_l - T_w$, успешно декодируется приемником. Таким образом, пропускную способность S_l БССС можно найти следующим образом:

$$S_l = \frac{d_l}{E_l} \left(1 + \frac{P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})}{1 - P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})} \frac{T_l - T_w}{T_l} \right).$$

Если БССС окончила процедуру отсрочки, то неудача доступа произойдет с вероятностью $\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}$, если хотя бы одна СБЛС начнет передачу в течение уязвимого интервала и БССС сможет ее задетектировать. Напомним, что в случае неудачи доступа БССС отказывается от текущей попытки передачи и повторяет процедуру отсрочки, т.е. БССС по окончании уязвимого интервала в среднем только один раз из $1 / (1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))$ попыток начинает передачу данных.

Если БССС после удачного доступа к каналу начала передачу данных (это происходит с вероятностью $1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})$), то данные оказываются повреждены коллизией с вероятностью $P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})$. В итоге средняя длительность E_l интервала между окончаниями двух последовательных успешных передач БССС равна:

$$E_l = \left[a_{l,0} + \sum_{i=1}^{\infty} a_{l,i} \left(\frac{P(\rho_{l,2} + \rho_{l,3})}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})} \right)^i \right] \frac{1}{1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})}.$$

где $a_{l,i}$ — это средняя длительность попытки передачи БССС с текущим значением конкурентного окна равным $W_{l,i} = \min(2^i W_{l,min}, W_{l,max})$. Если в течение уязвимого интервала случается неудача доступа (в среднем через V_c после его начала), то попытка передачи заканчивается передачей СБЛС. В противном случае, через в среднем V_s после начала уязвимого интервала БССС начинают свою передачу длительностью T_l . В итоге, $a_{l,i}$ выражается следующим образом:

$$a_{l,i} = \frac{W_{l,i} - 1}{2} T_{l,slot} + (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2})(V_c + T_w) + (1 - (\rho_{l,1} - P\rho_{l,2}))(V_s + T_l).$$

Перейдем к численным результатам при $P = 0,5$. При значении минимального конкурентного окна БССС по умолчанию ($W_{l,min} = 16$) прирост производительности БССС отрицателен даже при $\theta = 50$ мкс, а, значит, эффективного распределения ресурсов не может быть достигнуто. Если уменьшить $W_{l,min}$ до четырех, то прирост пропускной способности БССС вырастет и станет положительным при $\theta < 100$ мкс из-за того, что БССС получает приоритет при доступе к каналу по сравнению с СБЛС.

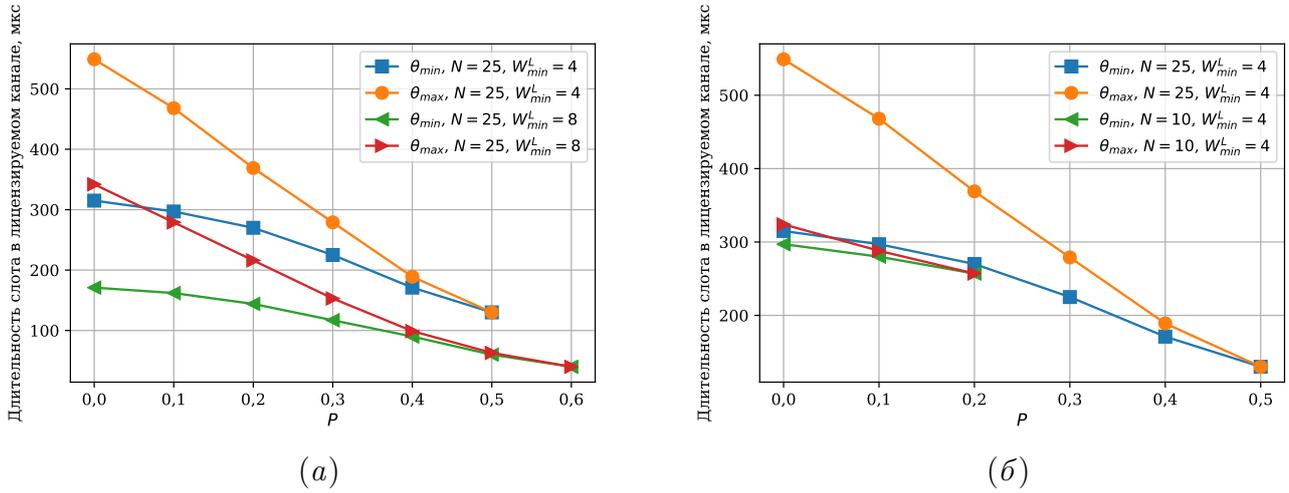


Рис. 5. Граничные значения длительности слота в лицензируемом канале, при которых обеспечивается справедливость распределения ресурсов при (а) $N = 25$ и (б) $W_{l,min} = 4$

Найдем область значений длительности θ слота в лицензируемом канале, в которой распределение канальных ресурсов является справедливым с точки зрения обеих сетей, для различных значений вероятности P . На рис. 5 приводятся минимальное (θ_{min}) и максимальное (θ_{max}) значения длительности θ слота в лицензируемом канале, для которых прирост пропускной способности положителен для обеих сетей. Очевидно, что при $\theta = \theta_{min}$ прирост пропускной способности БССС достигает максимума, а прирост пропускной способности СБЛС равен нулю, в то время как при $\theta = \theta_{max}$ — наоборот.

Как можно заметить, длина интервала $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ уменьшается с ростом P , так как уменьшается эффективность метода доступа к каналу.

На рис. 5а представлено сравнение области значений θ , обеспечивающих неотрицательный прирост пропускной способности и СБЛС, и БССС, для $W_{l,min} = 4$ и $W_{l,min} = 8$. Как можно заметить, длина интервала $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ снижается с ростом $W_{l,min}$, однако при $W_{l,min} = 8$ справедливое распределение ресурсов возможно при большем P . На рис. 5б приведено сравнение θ_{min} и θ_{max} для $N = 25$ и $N = 10$. Можно заметить, что для меньшего числа СБЛС справедливое и эффективное распределение канальных ресурсов может быть достигнуто в меньшем диапазоне значений θ . Поэтому при меньшем N справедливое и эффективное распределение канальных ресурсов возможно при меньшем диапазоне P .

В четвертой главе предложен и исследован метод разрешения коллизий (МРК) для БССС, основанный на использовании резервирующего сигнала, позволяющий устранить недостатки базового подхода (БП), рассмотренного в главе 2.

Предложенный метод разрешения коллизий работает следующим образом. Сразу после завершения процедуры отсрочки, БССС разделяет время до ближайшей границы слотов в лицензируемом канале на временные промежутки длительностью δ , называемые слотами разрешения коллизии (РК-слотами), число которых ограничено сверху значением K_{max} . Для того чтобы занять канал, в начале РК-слотов БССС передает короткий резервирующий сигнал. После этого она либо с вероятностью ξ передает резервирующий сигнал до конца РК-слота, либо с

вероятностью $1 - \xi$ пытается задетектировать передачу других СБЛС/БССС. Если БССС удается задетектировать чью-либо передачу в течение РК-слота, БССС откладывает текущую попытку передачи данных, удваивает текущее значение счетчика отсрочки и повторяет процедуру отсрочки. Для детектирования коллизии с передачей СБЛС в первом РК-слоте БССС всегда использует значение $\xi = 0$.

Оценим вероятность разрешения коллизии с участием передач только БССС. В диссертации доказана следующая теорема:

Теорема 1. Пусть n БССС одновременно окончили процедуру отсрочки, и для разрешения коллизии доступно k РК-слотов. Тогда вероятность $C(n, k)$ разрешения коллизии при помощи предложенного метода разрешения коллизий можно найти следующим образом:

$$C(n, k) = \begin{cases} 1, & \text{если } n = 1, \\ 0, & \text{если } n > 1, k < 2, \\ n\xi(1 - \xi)^{n-1}, & \text{если } n > 1, k = 2, \\ (1 - \xi)^n C(n, k - 1) + \\ + \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} \xi^i (1 - \xi)^{n-i} C(i, k - 1), & \text{если } n > 1, k > 2. \end{cases}$$

Построим аналитическую модель работы системы из N_w СБЛС и N_l БССС для случая, когда БССС используют предложенный метод разрешения коллизий.

Для моделирования будем использовать подход, аналогичный использованному в главе 2, но в отличие от описанной в ней аналитической модели, в данной главе учтен тот факт, что параметры метода разрешения коллизий подобраны таким образом, чтобы в случае коллизии с передачами СБЛС производить минимально возможное влияние на прием кадра СБЛС. Заметим, что при использовании разработанного метода разрешения коллизий СБЛС-получатель может принять пакет не только в случае, когда коллизия не произошла, но и при выполнении следующих условий:

- если произошла коллизия с участием передач одной СБЛС и хотя бы одной БССС, и
- если все БССС смогли задетектировать что СБЛС начала передачу (это происходит с вероятностью $1 - \delta/\theta$), и
- если СБЛС-получатель смог декодировать преамбулу (а вместе с ней и остальную часть кадра) благодаря эффекту захвата (будем считать, что это происходит с вероятностью η).

Таким образом, вероятность $\pi_{w,s}$ успешной передачи какой-либо СБЛС в виртуальном слоте равна:

$$\pi_{w,s} = N_w \tau_w (1 - \tau_w)^{N_w - 1} \left[(1 - \tau_l)^{N_l} + \eta \left(1 - \frac{\delta}{\theta}\right) (1 - (1 - \tau_l)^{N_l}) \right].$$

где вероятности τ_l (τ_w) определяются так же, как и в главе 2. Подставляя найденное значение $\pi_{w,s}$ в (1), найдем пропускную способность S_w беспроводной локальной сети.

Найдем пропускную способность S_l сотовой сети. Какая-либо БССС успешно передает данные (или хотя бы их часть) в текущем виртуальном слоте, если происходит одно из следующих событий:

- ни одна из остальных БССС и ни одна СБЛС не выбрали этот слот для передачи (это происходит с вероятностью $p_{l,1}$ найденной в главе 2);
- ни одна СБЛС не выбрала этот слот для передачи, но произошла коллизия передач БССС, которая была разрешена при помощи разработанного метода разрешения коллизий (это происходит с вероятностью $p_{l,3}$);
- ни одна из остальных БССС не выбрала этот слот, а хотя бы одна СБЛС выбрала этот слот для передачи (это происходит с вероятностью $p_{l,2}$ найденной в главе 2), но выбранная БССС не смогла задетектировать коллизию (это происходит с вероятностью δ/θ).

Посчитаем, какая часть передачи БССС в каждом из описанных случаев будет декодирована получателем. В первых двух случаях, т.е. с вероятностью $p_{l,1} + p_{l,3}$, БССС передаст резервирующий сигнал в среднем в течение $\theta/2$, а оставшаяся часть передачи, равная $(1 - \frac{\theta}{2T_l})$, будет занята данными, которые будут успешно декодированы получателем. В третьем случае часть передачи БССС, равная $1 - \frac{T_c^W}{T_l}$, не будет затронута коллизией с передачей СБЛС и успешно декодирована получателем. В итоге пропускная способность S_l сотовой сети равна:

$$S_l = \left((p_{l,1} + p_{l,3}) \left(1 - \frac{\theta}{2T_l}\right) + p_{l,2} \frac{\delta}{\theta} \left(1 - \frac{T_c^W}{T_l}\right) \right) \frac{d_l}{T_{slot}},$$

где $p_{l,3}$ определяется следующим выражением:

$$p_{l,3} = (1 - \tau_w)^{N_w} \left(\sum_{i=2}^{N_l} \binom{N_l}{i} \tau_l^i (1 - \tau_l)^{N_l-i} \gamma(i) \right).$$

Здесь $\gamma(i)$ — это вероятность того, что в случае коллизии i БССС эта коллизия будет разрешена, которую можно найти, усреднив вероятность $C(n, k)$ разрешения коллизии по доступному числу k РК-слотов. В итоге $\gamma(i)$ равна:

$$\gamma(i) = \sum_{k=2}^{\lfloor \theta/\delta \rfloor - 1} \frac{\delta}{\theta} C(i, \min(k, K_{max})) + \left(1 - \lfloor \frac{\theta}{\delta} \rfloor \frac{\delta}{\theta}\right) C(i, \min(\lfloor \theta/\delta \rfloor, K_{max})).$$

Проанализируем эффективность предложенного метода разрешения коллизий. В диссертации показано, как можно найти значение ξ , максимизирующее вероятность разрешения коллизии при заданном числе n БССС, участвующих в коллизии, и заданного числа k доступных РК-слотов. К сожалению, на практике обычно точное число n БССС, попавших в коллизию, неизвестно, поэтому необхо-

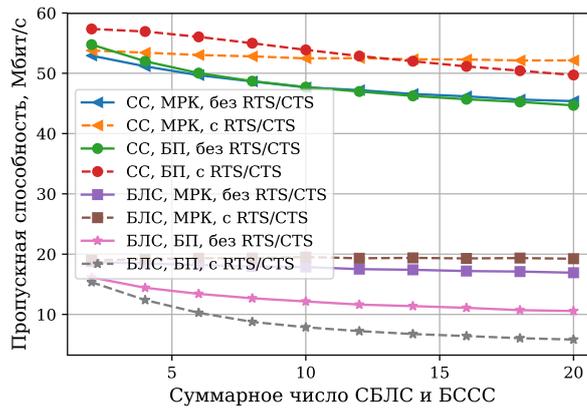


Рис. 6. Пропускная способность беспроводной локальной (БЛС) и сотовой (СС) сети при использовании предложенного метода разрешения коллизии

дим заранее выбрать квазиоптимальное универсальное значение ξ , не зависящее от n . В диссертации показано, что в качестве такого значения можно взять $\xi = 0,5$ (это оптимальное значение ξ при $n = 2$).

Проведем анализ эффективности МРК в сценарии, когда число СБЛС и БССС одинаково, см. рис. 6. Как показано в главе 2, в этом сценарии пропускная способность беспроводной локальной сети оказывается значительно меньше пропускной способности сотовой сети. Как можно заметить, предложенный МРК позволяет значительно повысить пропускную способность беспроводной локальной сети (до 3 раз, когда СБЛС использует механизм RTS/CTS, и до 1,7 раз без использования RTS/CTS) без заметного ухудшения пропускной способности сотовой сети. Кроме этого, в диссертации показано, что если число СБЛС в рассматриваемой системе меньше числа БССС, то МРК позволяет добиться одновременно повышения пропускной способности БССС на 25%, а СБЛС – до двух раз.

Основные результаты

В данной диссертации проведены исследования в области методов случайного доступа к общему нелицензируемому каналу в беспроводных локальных и сотовых сетях. В частности, получены следующие результаты:

1. Проведен сравнительный анализ методов случайного доступа в беспроводных локальных и сотовых сетях, а также обзор открытых проблем их совместного существования в общем нелицензируемом канале.
2. Разработана аналитическая модель работы в общем нелицензируемом канале системы из нескольких базовых станций сотовых сетей (БССС) и станций беспроводной локальной сети (СБЛС), учитывающая наличие асимметричных коллизий БССС и СБЛС и позволяющая оценить пропускную способность обеих сетей при условии, что БССС используют метод доступа к каналу с резервирующим сигналом.
3. Разработана аналитическая модель работы в общем нелицензируемом канале системы из нескольких БССС и СБЛС для случая, когда БССС используют метод доступа без резервирующего сигнала, позволяющая оценить

пропускную способность обеих сетей и определить область значений параметров метода доступа базовой станции сотовой сети, в которой достигается справедливое и эффективное разделение канальных ресурсов между устройствами различных технологий.

4. Разработан метод разрешения коллизий для базовых станций сотовых сетей, который позволяет обнаруживать и разрешать коллизии передач БССС и СБЛС, что приводит к увеличению пропускной способности сотовой сети до 25% по сравнению с методом доступа с резервирующим сигналом, а пропускной способности беспроводной локальной сети – до 2 раз, а также улучшить справедливость разделения канальных ресурсов между беспроводными локальными и сотовыми сетями.
5. Разработана аналитическая модель работы системы из СБЛС и БССС, использующих предложенный метод разрешения коллизий, позволяющая оценить вероятность разрешения коллизии, найти субоптимальные значения параметров предложенного метода, а также найти пропускные способности беспроводной локальной и сотовой сетей.

Список публикаций

1. Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA Networks: Open Issues // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. Vol. 63, no. 12. Pp. 1530–1537.
2. Kutsevol P.N., Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Mathematical Modeling of Joint Operation of Wireless Local Area Networks and Fifth Generation Cellular Networks // Automation and Remote Control. 2019. Vol. 80, no. 12. Pp. 2180–2194.
3. Kutsevol P., Loginov V., Khorov E., Lyakhov A. Analytical Study of License-Assisted Access in 5G Networks // 2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) / IEEE. 2019. Pp. 1–9.
4. Kutsevol P., Loginov V., Khorov E., Lyakhov A. New Collision Detection Method for Fair LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence // 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. 2019. Pp. 1–6.
5. Loginov V., Lyakhov A., Zhdanovskiy V. Performance Analysis of LBT with Limited Reservation Signal Duration for Fair LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence // 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSea-Com) / IEEE. 2019. Pp. 1–5.
6. Куцевол П.Н., Логинов В.А., Ляхов А.И. Аналитическая модель метода доступа к нелицензируемой полосе в сетях 5G // ИТиС 2018. 2018. С. 266–278.
7. Ждановский В.Д., Логинов В.А., Ляхов А.И. Анализ эффективности сетей LTE-LAA при использовании резервирующего сигнала ограниченной длительности // ИТиС 2018. 2018. С. 256–265.
8. Khorov E., Kutsevol P., Loginov V., Lyakhov A. Wireless Collision Detection for Fair LAA/Wi-Fi Coexistence // 2019 July IEEE 802.11 Coexistence Workshop / IEEE. 2019.