

© 2019 г. П.Н. КУЦЕВОЛ (kutsevol.pn@phystech.edu),
В.А. ЛОГИНОВ (loginov@iitp.ru),

А.И. ЛЯХОВ, д-р техн. наук (lyakhov@iitp.ru),

Е.М. ХОРОВ, канд. техн. наук (khorov@iitp.ru)

(Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ И СОТОВЫХ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ¹

Для повышения производительности сотовых сетей LTE, работающих в лицензируемом спектре частот, в настоящее время разработана новая технология LTE-LAA, позволяющая устройствам LTE вести передачу данных и в нелицензируемых частотах, уже используемых устройствами Wi-Fi. Метод доступа к каналу в сетях LTE-LAA, как и в сетях Wi-Fi, основан на механизме прослушивания несущей с избеганием коллизий, однако передача LTE-LAA может начаться только на границе лицензированных слотов. Данная статья посвящена разработке математической модели совместной работы сетей LTE-LAA и Wi-Fi, позволяющей оценить справедливость распределения канальных ресурсов между станциями LTE-LAA и станциями Wi-Fi в зависимости от длительности лицензированного слота, регулирование которой станет возможным в рамках технологии New Radio сотовых сетей пятого поколения.

Ключевые слова: беспроводные сети, сотовые сети, Wi-Fi, LTE, математическая модель, оценка производительности, оптимизация.

DOI: 10.1134/S0005231019120079

1. Введение

Одним из наиболее перспективных путей удовлетворения растущих требований к пропускной способности сотовых сетей является увеличение их производительности за счет расширения частотного спектра, в котором сотовые устройства могут передавать данные, нелицензированными частотами. Самыми привлекательными для поставщиков оборудования и мобильных операторов оказались хорошо изученные частоты нелицензированного спектра 5 ГГц. В 2016 г. консорциумом 3GPP была представлена технология License-Assisted Access (LTE-LAA), которая позволяет устройствам LTE передавать данные в нелицензированном спектре [1, 2].

Поскольку эти частоты активно используются другими технологиями, самой распространенной из которых является Wi-Fi, станции LTE-LAA вынуждены делить радиочастотные ресурсы с другими устройствами, причем присутствие станций LTE-LAA не должно приводить к уменьшению производительности других типов устройств. Для справедливого и эффективного

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Правительства Российской Федерации (Договор No. 14.W03.31.0019).

совместного использования канала в LTE-LAA используется несколько методов сосуществования с другими технологиями [2]: динамический выбор частоты (Dynamic Frequency Selection, DFS), управление мощностью передачи (Transmit Power Control, TPC), прослушивание канала перед передачей (Listen-Before-Talk, LBT) и т.д.

Так как устройства Wi-Fi, работающие согласно стандарту IEEE 802.11, — самые распространенные пользователи нелицензируемого спектра 5 ГГц и, следовательно, главные конкуренты станций LTE-LAA в данной полосе, то кратко опишем алгоритм доступа к каналу станций Wi-Fi. Станции Wi-Fi используют метод Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), основанный на механизме прослушивания несущей с избеганием коллизий (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). В частности, перед каждой попыткой передачи станция Wi-Fi инициализирует счетчик отсрочки случайным целым числом из интервала $[0, W - 1]$, где W — текущее конкурентное окно. Станция уменьшает свой счетчик отсрочки каждый раз, когда канал остается свободным в течение слота σ . Если канал занят, то счетчик “замораживается” до тех пор, пока канал опять не будет оставаться свободным в течение интервала $AIFS$. Когда счетчик достигает нуля, станция Wi-Fi начинает передачу. Если передача успешная, т.е. если станция получает кадр подтверждения, конкурентное окно выставляется равным минимальному значению W_{\min} . Иначе станция повторяет процедуру отсрочки с удвоенным значением конкурентного окна, но не большим W_{\max} . Стандарт определяет четыре категории трафика, для каждой из которых определено свое значение W_{\min} , W_{\max} и $AIFS$.

Метод доступа станций LTE-LAA, называемый Listen-Before-Talk, имеет много общего с методом доступа станций Wi-Fi. В частности, согласно спецификации 3GPP [1] станция LTE-LAA также реализует механизм CSMA/CA и выполняет процедуру бинарной экспоненциальной отсрочки с теми же значениями σ и $AIFS$ и с аналогичными четырьмя категориями трафика.

Однако есть важное различие. Станция Wi-Fi готова начать прием кадров почти в любой момент, так как каждый кадр Wi-Fi начинается с преамбулы, которая позволяет принимающей станции задетектировать начало кадра Wi-Fi и синхронизироваться на передатчик. В сотовых сетях LTE временная ось разделена на подкадры по 1 мс, каждый из которых состоит из двух слотов длительности 500 мкс. Чтобы отличать эти слоты от слотов отсрочки, будем называть их лицензированными слотами. Из-за синхронизации, необходимой для агрегации несущих в лицензированном и нелицензированном спектрах, передача данных LTE-LAA в нелицензируемой полосе может начинаться только на границе лицензированных слотов, т.е. строго периодически с периодом 500 мкс. Так как в LTE преамбула не используется, пользователь LTE-LAA пытается задетектировать передающиеся кадры только на границах лицензированных слотов.

Нетрудно заметить, что из-за случайной природы процедуры отсрочки, она может закончиться между границами лицензированных слотов. Спецификация LTE-LAA не определяет поведение станций в такой ситуации, хотя их поведение оказывает заметное влияние на производительность и станций LTE-LAA, и станций Wi-Fi.

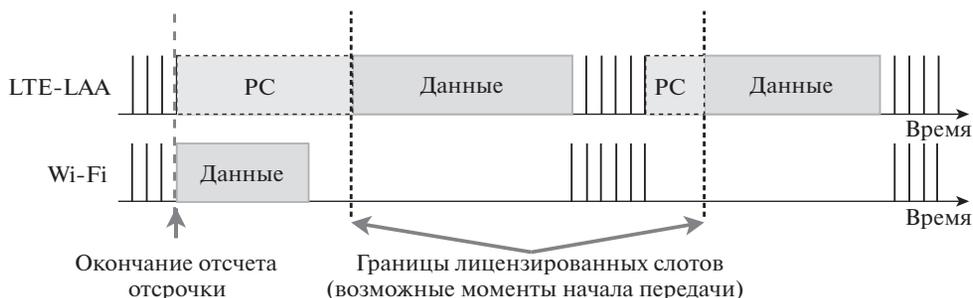


Рис. 1. Реализация LTE-LAA с резервирующим сигналом (PC).

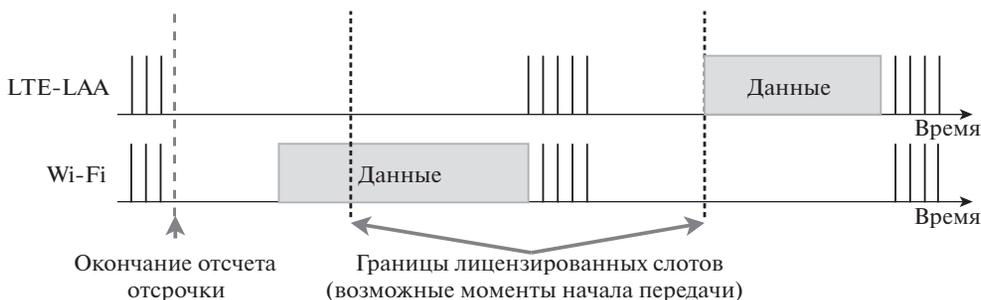


Рис. 2. Реализация LTE-LAA без резервирующего сигнала.

Рассмотрим возможные способы реализации LTE-LAA в отношении поведения станций в течение интервала между окончанием процедуры отсрочки и ближайшей границей лицензированных слотов. Назовем такой интервал уязвимым.

Первая возможная реализация, рассматриваемая в большинстве публикаций [3–6], подразумевает передачу блокирующей энергии (резервирующего сигнала) в течение уязвимого интервала, чтобы не дать станциям Wi-Fi занять канал, см. рис. 1. Хотя этот подход является самым очевидным и простым и значительно увеличивает производительность станций LTE-LAA, как показано в [7], он приводит к появлению следующих отрицательных эффектов. Во-первых, в течение длительного времени канал занят передачей сигнала, который не несет ни служебной информации, ни полезных данных. Во-вторых, согласно спецификации [1] длительности передачи станций LTE-LAA значительно превышают длительности передачи станций Wi-Fi, поэтому доля канального времени, приходящаяся на станции Wi-Fi, может быть значительно ограничена, что приводит к падению производительности сети Wi-Fi.

Другой вариант реализации заключается в том, чтобы станция LTE-LAA не начинала никаких передач в течение уязвимого интервала, см. рис. 2. При такой реализации если канал свободен в течение интервала *AIFS* и более непосредственно перед границей лицензированного слота, то станция LTE-LAA начинает передачу на этой границе. Иначе, если канал оказывается занят, станция LTE-LAA вынуждена повторить процедуру отсчета отсрочки с тем же значением конкурентного окна. Естественно, что так как любая стан-

ция Wi-Fi может начать передачу в течение уязвимого интервала, то такое поведение может привести к низкой производительности LTE-LAA, особенно если число активных станций Wi-Fi велико.

В настоящей статье исследуется вариант реализации поведения станции LTE-LAA без резервирующего сигнала, проводится аналитическое моделирование совместного поведения станций LTE-LAA и Wi-Fi и оценивается справедливость распределения канальных ресурсов между этими станциями.

Аналогично публикациям [5, 8, 9] справедливость определяется как свойство устройств LTE-LAA не влиять на производительность устройств Wi-Fi больше, чем дополнительная станция Wi-Fi, работающая в том же канале.

В данной статье с помощью математической модели анализируется зависимость производительности совместно работающих станций LTE-LAA и Wi-Fi от размера лицензированного слота T , т.е. от периода моментов, когда станция LTE-LAA может начать передачу кадров с данными. Как упомянуто выше, в текущей спецификации LTE-LAA $T = 500$ мкс. Однако технология New Radio сотовых сетей пятого поколения сделает возможным регулирование длительности лицензированного слота (см. [10]).

В разделе 2 приведен обзор публикаций. Раздел 3 содержит описание разрабатываемой аналитической модели. В разделе 4 проводится анализ численных результатов и, в частности, справедливости распределения канальных ресурсов в зависимости от размера слота лицензированного спектра. Выводы содержатся в разделе 5.

2. Анализ публикаций

Ряд публикаций, например, [9, 11] используют аналитическое моделирование для оптимизации совместного использования беспроводного канала сетями LTE-LAA и Wi-Fi в нереалистичном предположении, что базовая станция LTE-LAA имеет возможность полностью контролировать распределение канального ресурса.

В большинстве публикаций, учитывающих особенности реализации методов случайного доступа к каналу в сетях LTE-LAA и Wi-Fi, анализируется реализация с использованием резервирующего сигнала.

В [3] авторы сравнивают производительность только сети LTE-LAA в случае использования резервирующего сигнала и в случае, когда нет ограничений на начало передачи данных станциями LTE-LAA, т.е. когда передача может начаться в любой момент времени. С помощью имитационной модели было показано, что пропускные способности во втором случае до 40 % выше, чем в первом. Кроме того, авторы предлагают схему повторного использования частот для передачи и показывают, что эта схема значительно увеличивает производительность LTE-LAA.

В [4, 12] авторы применяют аналитические модели на основе марковских цепей для изучения взаимодействия сети LTE-LAA со станциями Wi-Fi при использовании резервирующего сигнала. В частности, в [12] исследуется работа системы при разных параметрах конкурентного окна (размер минимального окна, число стадий отсрочки) и при разных вариантах отсчета отсрочки

(экспоненциальная, линейная отсрочка или постоянное окно). Однако в [4, 12] издержки на резервирующий сигнал не учитываются, а реализация без резервирующего сигнала не рассмотрена.

В [5, 6] для изучения взаимодействия сетей LTE-LAA и Wi-Fi используется имитационное моделирование. В частности, в [5] авторы разработали модуль LTE-LAA в среде имитационного моделирования ns-3 и изучили работу взаимодействующих устройств LTE-LAA и Wi-Fi с ненасыщенным трафиком. Было показано, что распределение канальных ресурсов в таком сценарии крайне несправедливо по отношению к станциям Wi-Fi. Для решения данной проблемы авторы [6] рассмотрели реализации с резервирующим сигналом и без него. Авторы показали, что лучшим в терминах обеспечения справедливости оказался подход, который заключается в ограничении длительности резервирующего сигнала.

В [13] в дополнение к реализации с резервирующим сигналом авторы рассматривают смешанный подход, который заключается в том, что во время отсчета отсрочки станцией LTE-LAA каждый слот лицензированного спектра начинается с периода “сна” для станции LTE-LAA. Таким образом уменьшаются издержки на резервирующий сигнал.

В большинстве рассмотренных публикаций исследуется реализация с резервирующим сигналом, в то время как реализация без резервирующего сигнала недостаточно изучена. В [14] представлена математическая модель для реализации с резервирующим сигналом и без него, на основе которой приводится анализ справедливости распределения канальных ресурсов. Одним из важных допущений в [14] является предположение об идеальном прослушивании канала, заключающееся в следующем. Слоты станций Wi-Fi не синхронизированы с лицензированными слотами, на границах которых может начать передачу станция LTE-LAA. Следовательно, совпадение начала передачи станции LTE-LAA с началом передачи станции Wi-Fi маловероятно. Считая, что чужая передача детектируется мгновенно, авторы [14] пренебрегают вероятностью коллизии станции LTE-LAA и станций Wi-Fi. Однако в действительности станция Wi-Fi может не задетектировать только что начавшуюся передачу станции LTE-LAA, так как ей требуется время на детектирование и переключение между прослушиванием и передачей, и может тоже начать передачу, что приводит к коллизии.

В настоящей статье впервые разрабатывается аналитическая модель совместной работы сетей LTE-LAA (с реализацией без резервирующего сигнала) и Wi-Fi, позволяющая оценить пропускные способности этих сетей с учетом неидеальности прослушивания канала, и проводится анализ справедливости распределения канальных ресурсов между станциями LTE-LAA и Wi-Fi в зависимости от размера лицензированного слота.

3. Аналитическая модель

Рассмотрим сценарий, в котором в одной частотной полосе работают N станций Wi-Fi и одна базовая станция LTE-LAA, передающие данные пользователям. Все станции находятся в зоне радиослышимости друг друга и работают в насыщении, т.е. у них всегда есть пакеты на передачу. Также в

данном сценарии все передачи станций Wi-Fi (в том числе и в случае коллизий) имеют одинаковую максимальную разрешенную стандартом длительность $T^W > T$. Передачи ведутся с фиксированной скоростью и за время T^W передается d_W данных. Длительность передачи станции LTE-LAA также максимальна и равна $T^L > T^W$, причем за время T^L передается d_L данных. Отметим, что так как передачи станции LTE-LAA состоят из нескольких кадров, которые декодируются отдельно, и так как $T^L > T^W$, то в случае коллизии станции LTE-LAA и станции Wi-Fi часть кадров данных станции LTE-LAA могут быть не затронуты коллизией и успешно декодированы принимающей станцией LTE-LAA. Далее примем, что W_{\min}^W и W_i^W — минимальное и текущее значения конкурентного окна станции Wi-Fi (W_{\min}^L и W_i^L для станции LTE-LAA).

Будем считать, что количество попыток передачи одних и тех же данных не ограничено. Кроме того, в аналитической модели примем, что окончание отсчета отсрочки станцией LTE-LAA происходит равновероятно в пределах лицензированного слота, т.е. длительность уязвимого интервала \tilde{T} равномерно распределена на интервале $[0, T)$.

Также будем считать, что если передача станции Wi-Fi началась менее чем за σ до начала передачи станции LTE-LAA, то с вероятностью P станция LTE-LAA не задетектирует передачу станции Wi-Fi и тоже начнет передачу, что приведет к коллизии. Предположим, что P не зависит от момента начала передачи станции Wi-Fi внутри слота σ . Также будем считать, что если станция LTE-LAA начинает передачу менее чем за σ до начала передачи станции Wi-Fi, то станция Wi-Fi не задетектирует передачу станции LTE-LAA с той же вероятностью P .

Кроме того, будем предполагать, что передача станции LTE-LAA состоит из нескольких кадров длительности T . Тогда в случае коллизии со станциями Wi-Fi не повреждаются $\lfloor \frac{T^L - T^W}{T} \rfloor$ кадров данных станции LTE-LAA.

После окончания процедуры отсрочки станция LTE-LAA ожидает ближайшей границы слота лицензируемого спектра, т.е. начинается уязвимый для этой станции интервал, см. рис. 2. Пусть ρ_1^L — вероятность неудачи доступа станции LTE-LAA к каналу, которая происходит, если канал оказывается занятым в конце уязвимого интервала. Заметим, что в этом случае станция LTE-LAA откладывает передачу (происходит неудача доступа) и повторяет процедуру отсчета отсрочки с тем же значением конкурентного окна W_L^{\min} , так как не происходит фактической передачи.

Пусть ρ_2^L — вероятность того, что никакая станция Wi-Fi не начнет передачу данных в течение $\tilde{T} - \sigma$ от начала уязвимого интервала, но хотя бы одна из них начнет передачу менее чем за σ до начала передачи станции LTE-LAA.

Пусть ρ_3^L — вероятность того, что никакая станция Wi-Fi не начнет передачу в течение уязвимого интервала, но отсчет последнего слота отсрочки хотя бы одной станции Wi-Fi происходит спустя менее σ после начала передачи станции LTE-LAA.

Тогда передача станции LTE-LAA окажется неудачной из-за коллизии с вероятностью $P(\rho_2^L + \rho_3^L)$. Аналогично [15] определим виртуальный слот как время между двумя последовательными отсчетами счетчика отсрочки данной

станции Wi-Fi (LTE-LAA). При этом τ_W и τ_L — вероятности выбора данного виртуального слота для передачи станцией Wi-Fi и LTE-LAA соответственно.

Утверждение 1. Пропускная способность S^W станции Wi-Fi определяется как

$$(1) \quad S^W = \frac{d_W}{E_W},$$

где

$$(2) \quad E_W = a_0^W + \sum_{i=1}^{\infty} a_i^W (\rho_c^W)^i$$

— средняя длительность интервала между окончаниями двух последовательных передач станции Wi-Fi;

$$(3) \quad a_i^W = \frac{W_i^W - 1}{2} t_{\text{slot}}^W + P\tau_L (1 - (\rho_1^L - \rho_2^L)) T^L + P\tau_L (1 - \rho_1^L) T^L + \\ + (1 - P\tau_L (1 - (\rho_1^L - \rho_2^L)) - P\tau_L (1 - \rho_1^L)) T^W$$

— средняя длительность попытки передачи станции Wi-Fi номер $i + 1$;

$$(4) \quad \rho_c^W = 1 - (1 - \tau_W)^{N-1} + \tau_L (1 - (\rho_1^L - \rho_2^L)) P + \tau_L (1 - \rho_1^L) P$$

— вероятность коллизии станции Wi-Fi при условии, что эта станция выбрала данный виртуальный слот для передачи;

$$(5) \quad t_{\text{slot}}^W = (1 - \tau_W)^{N-1} (1 - \tau_L (1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L))) \sigma + \\ + \tau_L (1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)) T^L + (1 - \tau_L (1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L))) (1 - (1 - \tau_W)^{N-1}) T^W$$

— средняя длительность виртуального слота станции Wi-Fi.

Доказательство утверждения 1. Формулы (1) и (2) достаточно очевидны и доказаны в [15].

Попытка передачи станции Wi-Fi состоит из длительности процедуры отсрочки (первое слагаемое в (3)) и длительности самой передачи. Если данная станция Wi-Fi выбрала текущий слот для передачи, то коллизия со станцией LTE-LAA произойдет, если станция LTE-LAA закончила процедуру отсрочки (с вероятностью τ_L), никакая станция Wi-Fi не начала передачу в течение первых $\tilde{T} - \sigma$ уязвимого интервала (с вероятностью $1 - (\rho_1^L - \rho_2^L)$, где $\rho_1^L - \rho_2^L$ — вероятность того, что какая-то станция Wi-Fi начнет передачу внутри уязвимого интервала, но не в последний слот уязвимого интервала), и станция LTE-LAA не задетектировала передачу данной станции Wi-Fi (с вероятностью P). Этой коллизии соответствует второе слагаемое в (3). Также коллизия произойдет, если станция LTE-LAA закончила процедуру отсрочки, никакая из станций Wi-Fi не начала передачу в течение уязвимого интервала (с вероятностью $1 - \rho_1^L$) и если данная станция Wi-Fi не задетектировала передачу станции LTE-LAA (с вероятностью P), происходящую менее чем за σ

перед передачей данной станции Wi-Fi. Такой коллизии соответствует третье слагаемое в (3). Заметим, что описанные события, соответствующие неудачной передаче станции Wi-Fi из-за коллизии со станцией LTE-LAA, несовместны. Четвертое слагаемое в (3) соответствует случаю отсутствия коллизии со станцией LTE-LAA. Поэтому a_i^W определяется выражением (3).

Передача данной станции Wi-Fi окажется неудачной из-за коллизии, если одновременно с этой станцией совершает передачу либо другая станция Wi-Fi с вероятностью $1 - (1 - \tau_W)^{N-1}$ (первое слагаемое в (4)), либо станция LTE-LAA (второе слагаемое в (4)). Вероятность коллизии со станцией LTE-LAA определяется аналогично (3). Таким образом, вероятность коллизии станции Wi-Fi определяется формулой (4).

Виртуальный слот станции Wi-Fi может быть пустым (первое слагаемое в (5)), занятым передачей или коллизией других станций Wi-Fi длительности T^W (третье слагаемое в (5)) и занятым передачей станции LTE-LAA или ее коллизией со станциями Wi-Fi длительности T^L (второе слагаемое в (5)). В данном слоте станции Wi-Fi происходит передача станции LTE-LAA, если последняя выбрала некоторый слот для передачи и ее попытка доступа была успешной (с вероятностью $\tau_L(1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L))$). Тогда средняя длительность t_{slot}^W виртуального слота станции Wi-Fi определяется формулой (5). Утверждение 1 доказано.

Утверждение 2. Пропускную способность S^L станции LTE-LAA можно найти в виде

$$(6) \quad S^L = \frac{d_L \left(1 + \frac{P(\rho_2^L + \rho_3^L)}{1 - P(\rho_2^L + \rho_3^L)} \lfloor \frac{T^L - T^W}{T^L} \rfloor T \right)}{E_L},$$

где

$$(7) \quad E_L = \left[a_0^L + \sum_{i=1}^{\infty} a_i^L \left(\frac{P(\rho_2^L + \rho_3^L)}{1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)} \right)^i \right] \frac{1}{1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)}$$

– средняя длительность интервала между окончаниями двух последовательных передач станции LTE-LAA;

$$(8) \quad a_i^L = \frac{W_i^L - 1}{2} t_{\text{slot}}^L + (\rho_1^L - P\rho_2^L) (V_c + T^W) + (1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)) (V_s + T^L)$$

– средняя длительность попытки передачи станции LTE-LAA номер $i + 1$;

$$(9) \quad t_{\text{slot}}^L = (1 - \tau_W)^N \sigma + (1 - (1 - \tau_W)^N) T^W$$

– средняя длительность виртуального слота станции LTE-LAA; V_c – средняя длительность части уязвимого интервала, оканчивающегося передачей станции Wi-Fi, которая делает попытку передачи станции LTE-LAA неудачной; V_s – средняя длительность уязвимого интервала в случае успешного доступа станции LTE-LAA.

Доказательство утверждения 2. Аналогично утверждению 1, используя схожий с [15] подход, можно оценить пропускную способность станции LTE-LAA формулой (6), которая учитывает, что в течение интервала E_L станция LTE-LAA совершает ровно одну успешную передачу и в среднем $\frac{P(\rho_2^L + \rho_3^L)}{1 - P(\rho_2^L + \rho_3^L)}$ неудачных передач. При этом в случае коллизии со станциями Wi-Fi не повреждаются $\lfloor \frac{T^L - T^W}{T} \rfloor$ кадров данных станции LTE-LAA.

Попытка передачи станции LTE-LAA состоит из длительности процедуры отсрочки (первое слагаемое в (8)), длительности самой передачи и уязвимого интервала. Если попытка доступа станции LTE-LAA удачна (с вероятностью $1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)$), то данная попытка окончится передачей станции LTE-LAA (успешной передачей или коллизией длительностью T^L). Передача станции LTE-LAA соответствует третьему слагаемому в (8). Если попытка доступа станции LTE-LAA неудачна, данная попытка окончится передачей станции Wi-Fi (второе слагаемое в (8)). Следовательно, длительность a_i^L попытки передачи станции LTE-LAA, выполняемой с конкурентным окном W_i^L , определяется формулой (8).

Виртуальный слот станции LTE-LAA может быть пустым (первое слагаемое в (9)) или занятым передачей станций Wi-Fi (второе слагаемое в (9)), поэтому справедливо выражение (9).

Оценим среднюю длительность E_L между двумя последовательными успешными передачами станции LTE-LAA.

Попытка доступа станции LTE-LAA является неудачной с вероятностью $\rho_1^L - P\rho_2^L$. Для нахождения вероятности выполнения станцией LTE-LAA попытки передачи номер i заметим, что коллизия станции LTE-LAA со станциями Wi-Fi происходит при условии успешного доступа станции LTE-LAA, т.е. с вероятностью $\frac{P(\rho_2^L + \rho_3^L)}{1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)}$. Кроме того, на каждую попытку передачи приходится $\frac{1}{1 - (\rho_1^L - P\rho_2^L)}$ попыток доступа. Таким образом, E_L выражается формулой (7). Утверждение 2 доказано.

Оценим дополнительные величины, необходимые для подсчета пропускных способностей S^W и S^L согласно утверждениям 1 и 2.

Чтобы найти вероятность ρ_1^L , используем стационарное распределение вероятностей значений счетчика отсрочки станций Wi-Fi, найденное в [16]. В частности, стационарные вероятности $b_{i,k}$ нахождения в состоянии с $W = 2^i W_{\min}^W$ и текущим значением счетчика отсрочки k могут быть найдены так:

$$(10) \quad b_{i,k} = b_{0,0} \frac{W_{\min}^W 2^i - k}{W_{\min}^W 2^i} (\rho_c^W)^i, \quad k < W_{\min}^W 2^i, \quad i \leq m = \log_2 \left(\frac{W_{\max}^W}{W_{\min}^W} \right)$$

и $b_{i,k} = 0$ при $k \geq W_{\min}^W 2^i$, где

$$(11) \quad b_{0,0} = \frac{2(1 - 2\rho_c^W)(1 - \rho_c^W)}{(1 - 2\rho_c^W)(W_{\min}^W + 1) + pW_{\min}^W(1 - (2\rho_c^W)^m)}.$$

Тогда вероятность s_f того, что счетчик отсрочки данной станции меньше f , может быть выражена как:

$$s_f = \begin{cases} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{f-1} b_{i,k}, & \text{если } f > 0, \\ 0, & \text{если } f = 0. \end{cases}$$

Базовая станция LTE-LAA начинает передачу в конце уязвимого интервала при условии, что ни одна из станций Wi-Fi не начала передачу в течение уязвимого интервала, т.е. значение счетчика отсрочки всех станций Wi-Fi в начале уязвимого интервала \tilde{T} больше, чем f , где f – целое число слотов σ , содержащихся в \tilde{T} . Это условие выполняется с вероятностью $(1 - s_{f+1})^N$. Учитывая равномерное распределение \tilde{T} по интервалу $[0, T)$ и тот факт, что $T \gg \sigma$, можно считать, что f равновероятно выбирается из набора целых чисел $\{0, \dots, M\}$, где $M = \lfloor \frac{T}{\sigma} \rfloor$. В результате получаем что

$$\rho_1^L = 1 - \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M (1 - s_{f+1})^N.$$

Вероятность ρ_2^L можно найти как усредненную вероятность того, что счетчик отсрочки хотя бы одной станции Wi-Fi равен f , а остальных станций больше f , где f – целое число слотов σ в уязвимом интервале \tilde{T} :

$$\rho_2^L = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M [(1 - s_f)^N - (1 - s_{f+1})^N].$$

Аналогично можно найти вероятность ρ_3^L :

$$\rho_3^L = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M [(1 - s_{f+1})^N - (1 - s_{f+2})^N].$$

Теперь оценим среднюю длительность V_s уязвимого интервала в случае успешного доступа станции LTE-LAA.

Поскольку станции Wi-Fi не начинают передачу в течение уязвимого интервала, содержащего f целых слотов σ , если в начале этого интервала значение отсрочки каждой из них больше f , то:

$$V_s = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M \left(f + \frac{1}{2} \right) \sigma (1 - s_{f+1})^N.$$

Оценим среднюю длительность V_c части уязвимого интервала, оканчивающейся передачей станции Wi-Fi, которая делает попытку передачи станции

LTE-LAA неудачной. Станции Wi-Fi могут начать передачу в течение уязвимого интервала, содержащего f целых слотов σ , если счетчик отсрочки хотя бы одной из них меньше или равен f . Тогда V_c можно выразить так:

$$V_c = \frac{1}{M+1} \sum_{f=0}^M \sum_{j=0}^f \frac{j\sigma[(1-s_j)^N - (1-s_{j+1})^N]}{\rho_1^L}.$$

Найдем вероятности τ_L и τ_W передачи в данном виртуальном слоте. Так как конкурентное окно станции LTE-LAA увеличивается, только если происходит коллизия, то τ_L можно найти как отношение среднего числа попыток передачи одного пакета к общему количеству виртуальных слотов станции, приходящихся на одну успешную передачу:

$$(12) \quad \tau_L = \frac{\frac{1}{1-(\rho_1^L + P\rho_3^L)}}{\frac{1}{1-(\rho_1^L + P\rho_3^L)} + \frac{1}{1-(\rho_1^L - P\rho_2^L)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{W_i^i - 1}{2} \left(\frac{P(\rho_2^L + \rho_3^L)}{1-(\rho_1^L - P\rho_2^L)} \right)^i}.$$

Здесь учтено, что любая попытка передачи станции LTE-LAA является неудачной (из-за неудачного доступа или коллизии) с вероятностью $(\rho_1^L + P\rho_3^L)$, поэтому среднее число попыток на одну успешную передачу составит $\frac{1}{1-(\rho_1^L + P\rho_3^L)}$. Среднее число виртуальных слотов станции LTE-LAA, приходящееся на одну успешную передачу и содержащееся в знаменателе (12), находится аналогично (7).

Вероятность τ_W того, что станция Wi-Fi выберет данный слот для передачи, может быть найдена как:

$$(13) \quad \tau_W = \frac{\frac{1}{1-\rho_c^W}}{\frac{1}{1-\rho_c^W} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{W_i^W - 1}{2} (\rho_c^W)^i}.$$

Решая систему (4) и (13), найдем ρ_c^W и τ_W .

Таким образом, определены все дополнительные величины, необходимые для нахождения пропускных способностей согласно утверждениям 1 и 2.

4. Численные результаты

Для анализа справедливости и эффективности распределения канальных ресурсов наряду с основным сценарием с одной станцией LTE-LAA и N станциями Wi-Fi, описанным в разделе 3, будем рассматривать дополнительный сценарий, в котором в одной частотной полосе работают $N+1$ станций Wi-Fi, т.е. основной сценарий может быть получен из дополнительного заменой одной станции Wi-Fi на станцию LTE-LAA. При этом будем считать распределение ресурсов справедливым, если производительность системы из N станций Wi-Fi не уменьшится при такой замене, а эффективным, если производительность станции LTE-LAA превышает производительность станции Wi-Fi,

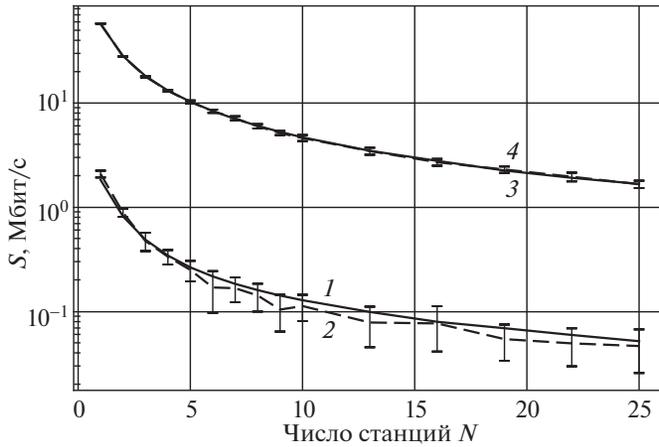


Рис. 3. Сравнение результатов аналитической и имитационной модели при $T = 1000$ мкс, $P = 0,5$: 1 — пропускная способность станции LTE-LAA, полученная с помощью аналитической модели (сплошная линия); 2 — пропускная способность станции LTE-LAA, полученная с помощью имитационной модели (пунктирная линия с доверительными интервалами); 3 — пропускная способность станции Wi-Fi, полученная с помощью аналитической модели (сплошная линия); 4 — пропускная способность станции Wi-Fi, полученная с помощью имитационной модели (пунктирная линия с доверительными интервалами).

которую станция LTE-LAA заменила. Иначе говоря, если S_W^1 — пропускная способность станции Wi-Fi в дополнительном сценарии, S_W^2 и S_L^2 — пропускные способности станции Wi-Fi и LTE-LAA в основном сценарии, то приращения пропускных способностей $G_W = \frac{S_W^2 - S_W^1}{S_W^1}$ и $G_L = \frac{S_L^2 - S_W^1}{S_W^1}$ должны быть положительными.

Сравним пропускные способности станций LTE-LAA и Wi-Fi при различных значениях N количества станций Wi-Fi и при различных размерах лицензированного слота T . Как уже было упомянуто в разделе 3, длительности передачи (в том числе коллизийной) устанавливаются максимально возможными согласно ограничениям стандарта Wi-Fi и спецификации LTE-LAA, а именно $T^W = 2,5$ мс, $T^L = 8$ мс.

Также, если не указано иное, используются стандартные параметры конкурентных окон: $W_{\min}^W = W_{\min}^L = 16$, $W_{\max}^W = W_{\max}^L = 1024$. Кроме того, все станции делят один и тот же канал в диапазоне 5 ГГц с шириной полосы 20 МГц и используют сигнально-кодированную конструкцию с максимальной битовой скоростью (64-QAM, кодовая скорость $\frac{5}{6}$ для станций Wi-Fi и 0,9258 для станций LTE-LAA). Таким образом, с учетом контрольной информации за время передачи T^L станция LTE-LAA передает $d_L = 500$ Кбит данных, а станция Wi-Fi за время T^W передает $d_W = 155$ Кбит данных.

Для оценки точности полученной аналитической модели проводится сравнение с имитационной моделью, в которой не использовался ряд допущений аналитической модели, в том числе предположение о равномерной распределенности \tilde{T} по интервалу $[0, T)$ (см. рис. 3). Заметим, что для нагляд-

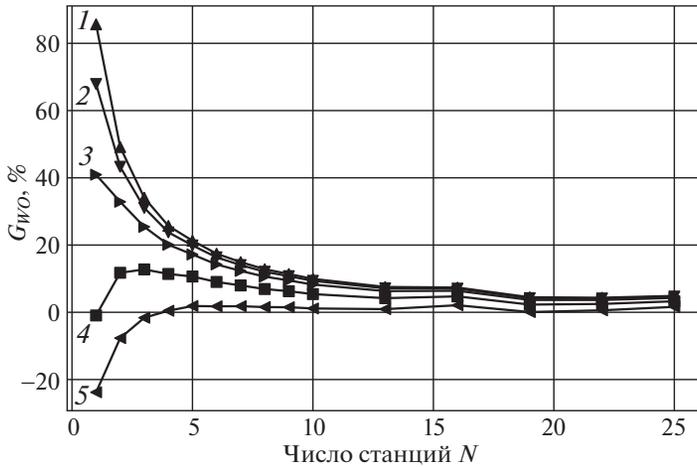


Рис. 4. Приращение пропускной способности станции Wi-Fi при стандартном значении минимального конкурентного окна и $P = 0,5$ для различного периода T лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

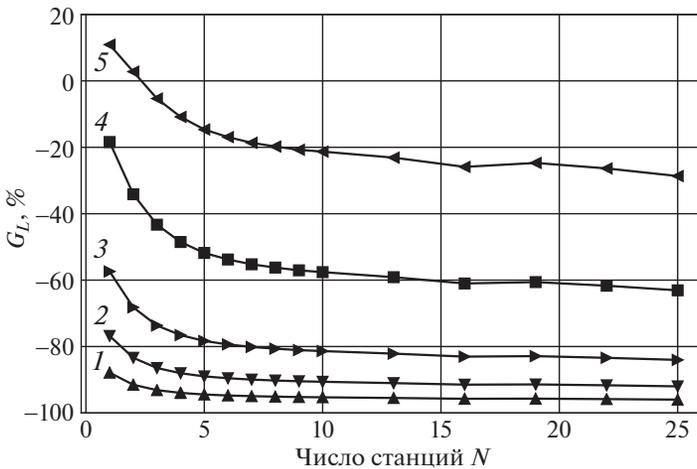


Рис. 5. Приращение пропускной способности станции LTE-LAA при стандартном значении минимального конкурентного окна и $P = 0,5$ для различного периода T лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

ности пропускные способности на рис. 3 представлены в логарифмическом масштабе, а результаты имитационной модели представлены в виде среднеквадратичных отклонений значений пропускной способности, полученных в имитационной модели. Относительная погрешность аналитической модели не превышает 5 %.

Рисунки 4 и 5 показывают приращения пропускных способностей станций Wi-Fi и LTE-LAA при стандартных значениях параметров конкурентного окна и вероятности недетектирования передачи $P = 0,5$ и при различных T .

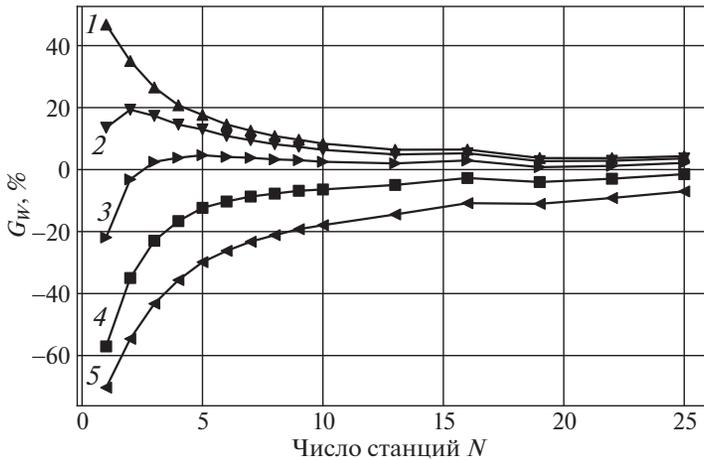


Рис. 6. Приращение пропускной способности станции Wi-Fi при $W_{\min}^L = 4$ и $P = 0,5$ для различного периода T лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

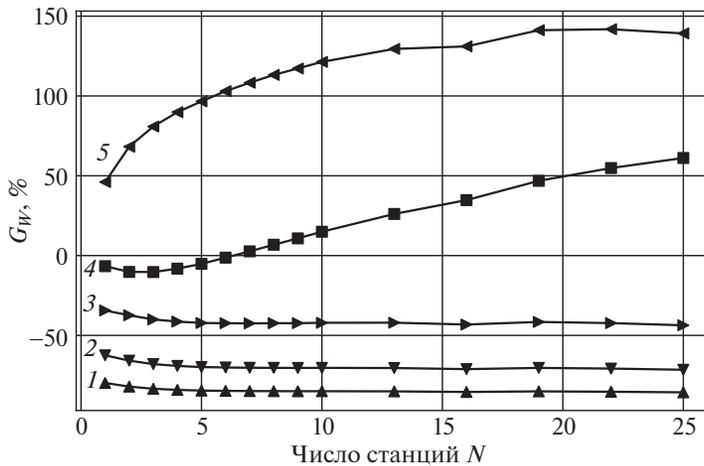


Рис. 7. Приращение пропускной способности станции LTE-LAA при $W_{\min}^L = 4$ и $P = 0,5$ для различного периода T лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

Как можно заметить, если станция LTE-LAA не получает преимуществ в доступе к каналу (т.е. $W_{\min}^W = W_{\min}^L$), то ее производительность значительно ухудшается по сравнению со станциями Wi-Fi из-за высокой вероятности неудачи доступа станции LTE-LAA из-за передач станций Wi-Fi в течение уязвимого интервала. Стоит заметить, что с ростом N G_L уменьшается, так как на производительность станции LTE-LAA отрицательно влияют коллизии со станциями Wi-Fi, которых становится больше с ростом числа станций Wi-Fi. В то же время G_W стремится к нулю с ростом N , так как влияние станции LTE-LAA становится все менее ощутимо.

При уменьшении T пропускная способность станции LTE-LAA растет, так как уменьшается вероятность ошибки доступа станции LTE-LAA из-за передач станций Wi-Fi в течение уязвимого интервала. Однако при $W_{\min}^L = 16$ прирост производительности станции LTE-LAA отрицателен даже при $T = 50$ мкс и справедливое распределение ресурсов по отношению к станции LTE-LAA не может быть достигнуто. Кроме того, уменьшение T приводит к ограничению пропускной способности станций Wi-Fi и к $G_W < 0$ (например, при $T = 50$ мкс на рис. 4).

Однако при уменьшении W_{\min}^L до четырех, как на рис. 6 и 7, преимущество в доступе станции LTE-LAA приводит к тому, что $G_L > 0$ при $T < 100$ мкс. Кроме того, при $W_{\min}^L = 4$ и $T < 100$ мкс с ростом N влияние коллизий и передач станций Wi-Fi внутри уязвимого интервала на производительность станции LTE-LAA оказывается менее негативным, чем влияние коллизий станций Wi-Fi на производительность станций Wi-Fi. Поэтому с ростом N и при $T < 100$ мкс G_L растет.

Для анализа параметров, при которых распределение ресурсов можно назвать справедливым, на рис. 8 и 9 приводятся минимальное T_{\min} и максимальное T_{\max} значения T , для которых одновременно $G_L > 0$ и $G_W > 0$, при фиксированном N в зависимости от вероятности P того, что станция одного типа не задетектирует только что начавшуюся передачу станции другого типа. Очевидно, что при $T = T_{\min}$ G_L достигает максимума, а $G_W = 0$, а при $T = T_{\max}$ – наоборот.

Можно заметить, что так как с ростом P уменьшается пропускная способность станции LTE-LAA (так как при коллизии станция LTE-LAA повышает конкурентное окно, и вероятность доступа станций LTE-LAA к каналу при этом резко падает), то улучшение работы LTE-LAA может быть достигнуто только за счет уменьшения числа попыток передачи станции LTE-LAA, заканчивающихся неудачами доступа или, иначе говоря, за счет уменьшения T , что приводит к уменьшению T_{\max} на рис. 8 и 9. Отметим, что кривая T_{\min} соответствует критическим значениям $G_W = 0$, а падение T_{\min} с ростом P означает, что производительность станций Wi-Fi растет с увеличением P при постоянном T , поэтому справедливого распределения ресурсов можно достигнуть при меньших T_{\min} при увеличении P . Данный рост пропускной способности станций Wi-Fi объясняется тем, что влияние станции LTE-LAA на работу станций Wi-Fi сильно уменьшается с ростом P .

На рис. 8 представлено сравнение области значений T , обеспечивающих справедливое и эффективное распределение канальных ресурсов для $W_{\min}^L = 4$ и $W_{\min}^L = 8$. Как можно заметить, ширина области “справедливых” значений T снижается с ростом W_{\min}^L , однако при $W_{\min}^L = 8$ справедливое распределение ресурсов возможно при большем P .

На рис. 9 приведено сравнение T_{\min} и T_{\max} для $N = 25$ и $N = 10$. Рисунок 9 показывает, что для меньшего числа станций Wi-Fi справедливое и эффективное распределение канальных ресурсов может быть достигнуто в меньшем диапазоне значений T . Поэтому при меньшем N справедливое и эффективное распределение канальных ресурсов возможно при меньшем P .

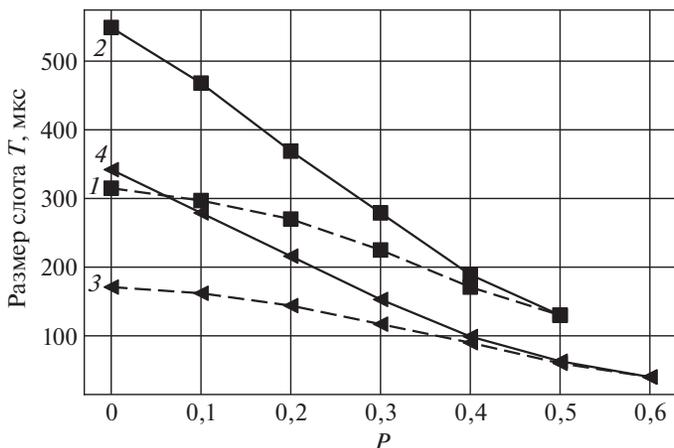


Рис. 8. Граничные значения длительности лицензированного слота, при которых обеспечивается справедливость распределения ресурсов при $N = 25$: 1 – значение T_{\min} при $W_{\min}^L = 4$; 2 – значение T_{\max} при $W_{\min}^L = 4$; 3 – значение T_{\min} при $W_{\min}^L = 8$; 4 – значение T_{\max} при $W_{\min}^L = 8$.

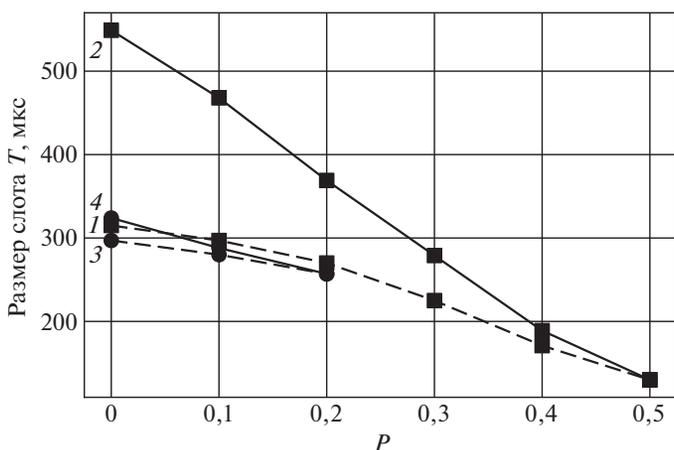


Рис. 9. Граничные значения длительности лицензированного слота, при которых обеспечивается справедливость распределения ресурсов при $W_{\min}^L = 4$: 1 – значение T_{\min} при $N = 25$; 2 – значение T_{\max} при $N = 25$; 3 – значение T_{\min} при $N = 10$; 4 – значение T_{\max} при $N = 10$.

На рис. 10 показаны значения G_L при $T = T_{\min}$, т.е. максимальный прирост производительности станции LTE-LAA при данных W_{\min}^L , P и N . В силу того, что при увеличении W_{\min}^L T_{\min} падает, G_L растет. Кроме того, G_L становится больше при увеличении N . Таким образом, наибольшего выигрыша для станции LTE-LAA среди изучаемых значений можно достигнуть при $N = 25$ и $W_{\min}^L = 8$. Отметим, что несмотря на уменьшение T_{\min} с ростом P (и соответствующее уменьшение вероятности неудачи доступа станции LTE-LAA)

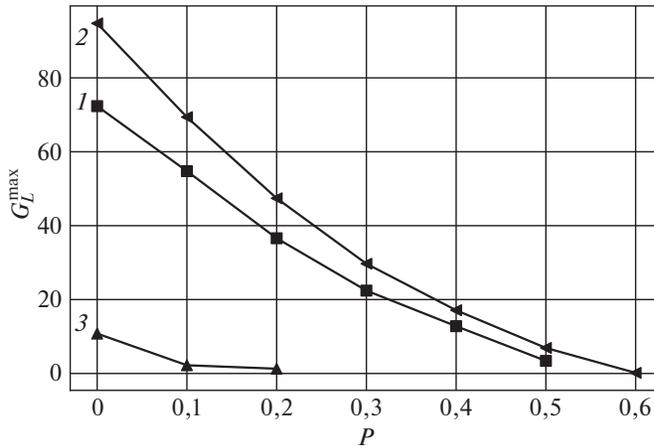


Рис. 10. Максимальный прирост производительности станции LTE-LAA: 1 — при $N = 25$ и $W_{\min}^L = 8$; 2 — при $N = 25$ и $W_{\min}^L = 4$; 3 — при $N = 10$ и $W_{\min}^L = 4$.

влияние коллизий оказывается сильным для станции LTE-LAA и максимальный прирост производительности станции LTE-LAA падает с ростом P .

5. Заключение

В данной статье разработана аналитическая модель совместной работы станций LTE-LAA и Wi-Fi в одном частотном канале, позволяющая найти пропускные способности рассматриваемых сетей. Данная модель учитывает неидеальность прослушивания среды, приводящую к появлению коллизий между станциями LTE-LAA и Wi-Fi. В зависимости от вероятности таких коллизий, от размера лицензированного слота, возможность уменьшения которого предполагается в сотовых сетях пятого поколения, и от параметров конкурентного окна станции LTE-LAA проводится анализ справедливости распределения канальных ресурсов. Результаты анализа показывают, что при уменьшении размера лицензированного слота и при изменении параметров доступа станции LTE-LAA к каналу можно добиться эффективного и справедливого распределения канальных ресурсов между сетями LTE-LAA и Wi-Fi, даже если велика вероятность коллизии станций разных типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3GPP TS 36.213 V13.1.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures; Channel access procedures for LAA. March 2019.
2. Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA Networks: Open Issues // J. Communicat. Technol. Electron. 2018. V. 63. No. 12. P. 1530–1537.
3. Wang H., et al. Enabling Frequency Reuse for Licensed-Assisted Access with Listen-before-Talk in Unlicensed Bands // Proc. 83rd IEEE Vehicular Technol. Conf. (VTC Spring). IEEE. 2016. P. 1–5.

4. *Song Y., Sung K.W., Han Y.* Coexistence of Wi-Fi and Cellular with Listen-before-Talk in Unlicensed Spectrum // *IEEE Commun. Lett.* 2016. V. 20. No. 1. P. 161–164.
5. *Giupponi L., et al.* Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with NS-3 // *arXiv preprint arXiv:1604.06826.* 2016.
6. *Cierny M., et al.* Fairness vs. Performance in Rel-13 LTE Licensed Assisted Access // *IEEE Commun. Mag.* 2017. V. 55. No. 12. P. 133–139.
7. *Xiao J., et al.* Performance Modeling of LAA LBT with Random Backoff and a Variable Contention Window // *Proc. 10th IEEE Int. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP).* IEEE. 2018. P. 1–7.
8. Feasibility study on licensed-assisted access to unlicensed spectrum (Release 13) / Document 3GPP TR 36.889, 2016.
9. *Maule M., et al.* Delivering Fairness and QoS Guarantees for LTE/WiFi Coexistence Under LAA Operation // *IEEE Access.* 2018. V. 6. P. 7359–7373.
10. *Lagen S., et al.* New Radio Beam-Based Access to Unlicensed Spectrum: Design Challenges and Solutions // *arXiv preprint arXiv:1809.10443.* 2018.
11. *Markova E., et al.* Performance Assessment of QoS-Aware LTE Sessions Offloading Onto LAA/WiFi Systems // *IEEE Access.* 2019. V. 7. P. 36300–36311.
12. *Pei E., Jiang J.* Performance Analysis of Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13 // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019. V. 68. No. 2. P. 1446–1458.
13. *Khairy S., et al.* A Hybrid-LBT MAC with Adaptive Sleep for LTE-LAA Coexisting with Wi-Fi over Unlicensed Band // *Proc. IEEE Global Communicat. Conf.* 2017. P. 1–6.
14. *Kutsevol P., Loginov V., Khorov E., Lyakhov A.* Analytical Study of License-Assisted Access in 5G Networks // *Proc. IFIP Networking Conf.* 2019.
15. *Пустогаров И.А., Ляхов А.И., Гудилов А.С.* Проблема неравномерного распределения пропускной способности канала в сетях IEEE 802.11 // *Информационные процессы.* 2008. Т. 8. № 3. С. 149–167.
Lyakhov A., Pustogarov I., Gudilov A. Direct Links in IEEE 802.11: Analytical Study of Unfairness Problem // *Autom. Remote Control.* 2008. V. 69. No. 9. P. 1630–1645.
16. *Bianchi G.* Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // *IEEE J. Selected Areas Communicat.* 2000. V. 18. No. 3. P. 535–547.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.М. Миллером.

Поступила в редакцию 29.04.2019

После доработки 09.07.2019

Принята к публикации 18.07.2019