

© 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 ПОКОЛЕНИЯ<sup>1</sup>

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

---

<sup>1</sup> 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  $\sigma$ . 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  $\sigma$  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.

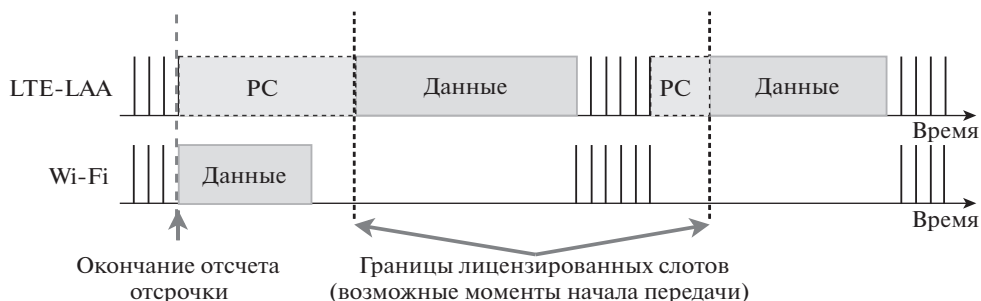


Рис. 1. Реализация LTE-LAA с резервирующим сигналом (PC).

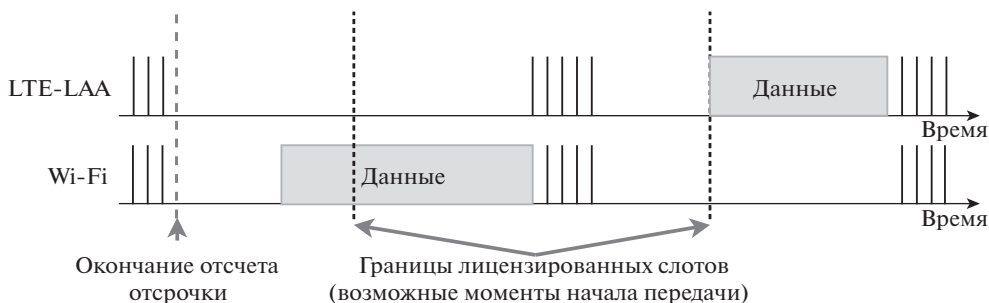


Рис. 2. Реализация LTE-LAA без резервирующего сигнала.

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 равномерно 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  $\sigma$  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  $\sigma$ . Также будем считать, что если станция LTE-LAA начинает передачу менее чем за  $\sigma$  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  $\rho_1^L$  — 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  $\rho_2^L$  — 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  $\sigma$  до начала передачи станции LTE-LAA.

Пусть  $\rho_3^L$  — 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  $\sigma$  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  $\tau_W$  и  $\tau_L$  — 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  $\tau_L$ ), 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  $\sigma$



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  $t_{\text{slot}}^W$  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  $\rho_1^L$ , 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  $\sigma$ , 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  $\rho_2^L$  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  $\sigma$  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  $\rho_3^L$ :

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

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  $\sigma$ , 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  $\sigma$ , 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  $\tau_L$  и  $\tau_W$  передачи в данном виртуальном слоте. Так как конкурентное окно станции LTE-LAA увеличивается, только если происходит коллизия, то  $\tau_L$  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  $\tau_W$  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  $\rho_c^W$  и  $\tau_W$ .

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,

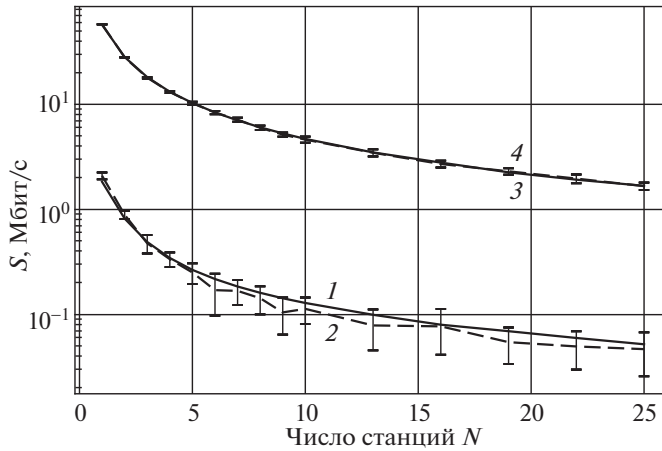


Рис. 3. Сравнение результатов аналитической и имитационной модели при  $T = 1000$  мкс,  $P = 0,5$ : 1 — пропускная способность станции LTE-LAA, полученная с помощью аналитической модели (сплошная линия); 2 — пропускная способность станции LTE-LAA, полученная с помощью имитационной модели (пунктирная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

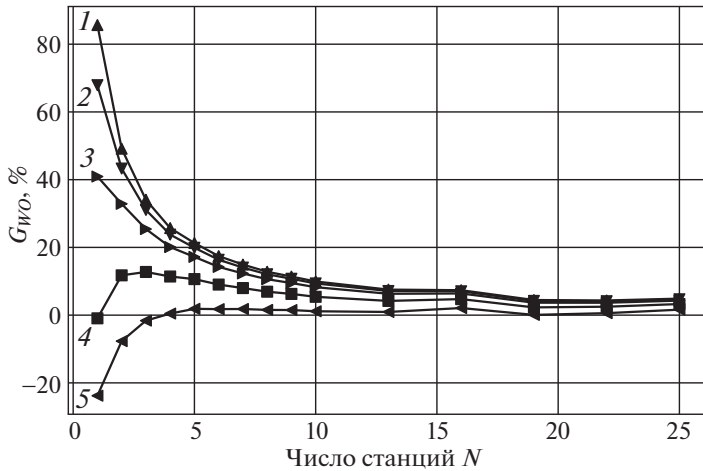


Рис. 4. Приращение пропускной способности станции Wi-Fi при стандартном значении минимального конкурентного окна и  $P = 0,5$  для различного периода  $T$  лицензированных слотов: 1 — 1000; 2 — 500; 3 — 250; 4 — 100; 5 — 50 мкс.

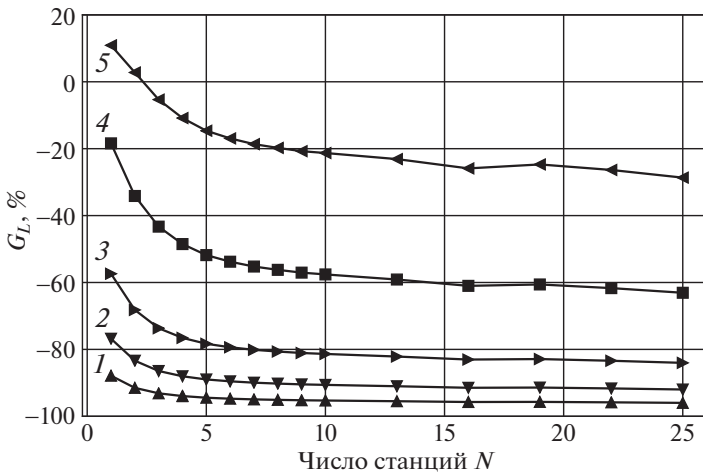


Рис. 5. Приращение пропускной способности станции LTE-LAA при стандартном значении минимального конкурентного окна и  $P = 0,5$  для различного периода  $T$  лицензированных слотов: 1 — 1000; 2 — 500; 3 — 250; 4 — 100; 5 — 50 мкс.

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  $T$ .

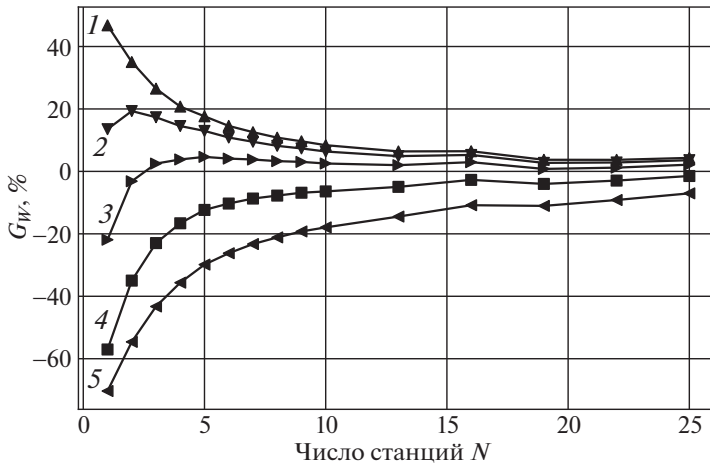


Рис. 6. Приращение пропускной способности станции Wi-Fi при  $W_{\min}^L = 4$  и  $P = 0,5$  для различного периода  $T$  лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

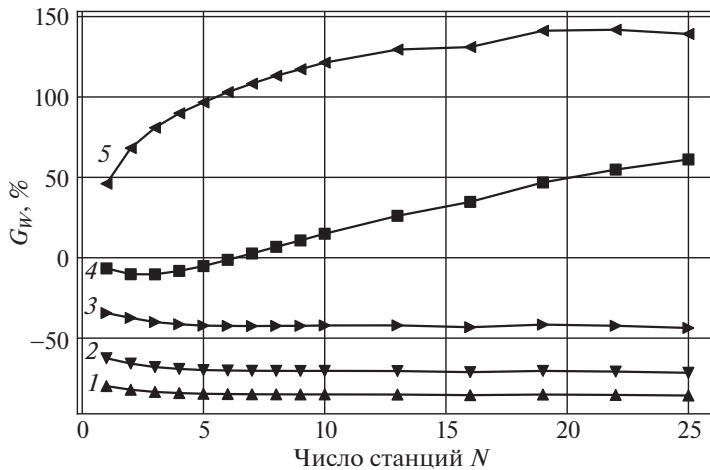


Рис. 7. Приращение пропускной способности станции LTE-LAA при  $W_{\min}^L = 4$  и  $P = 0,5$  для различного периода  $T$  лицензированных слотов: 1 – 1000; 2 – 500; 3 – 250; 4 – 100; 5 – 50 мкс.

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  $P$ .



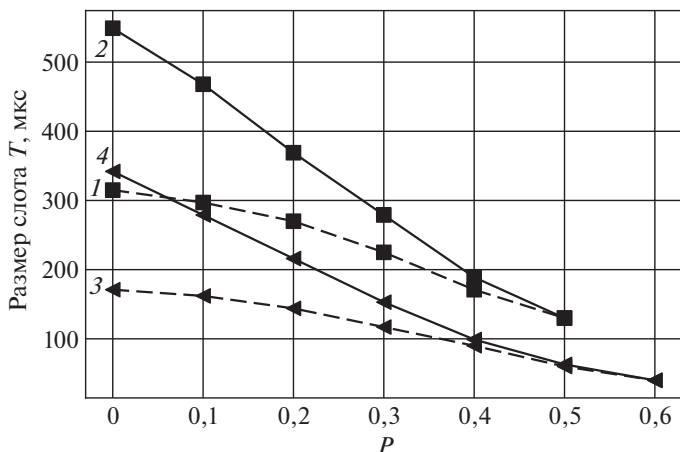


Рис. 8. Граничные значения длительности лицензированного слота, при которых обеспечивается справедливость распределения ресурсов при  $N = 25$ : 1 — значение  $T_{\min}$  при  $W_{\min}^L = 4$ ; 2 — значение  $T_{\max}$  при  $W_{\min}^L = 4$ ; 3 — значение  $T_{\min}$  при  $W_{\min}^L = 8$ ; 4 — значение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

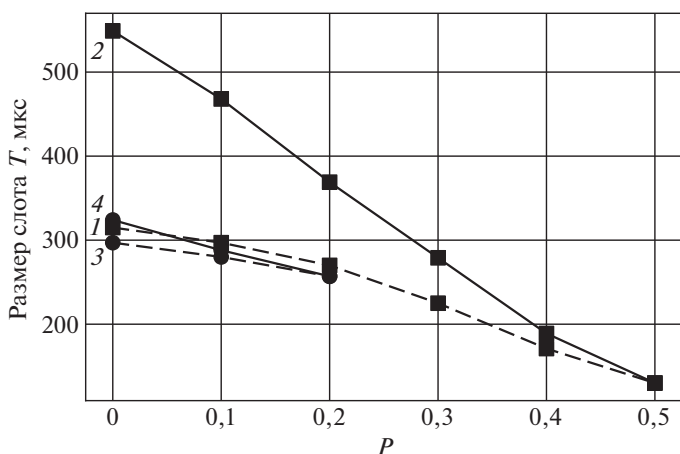


Рис. 9. Граничные значения длительности лицензированного слота, при которых обеспечивается справедливость распределения ресурсов при  $W_{\min}^L = 4$ : 1 — значение  $T_{\min}$  при  $N = 25$ ; 2 — значение  $T_{\max}$  при  $N = 25$ ; 3 — значение  $T_{\min}$  при  $N = 10$ ; 4 — значение  $T_{\max}$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

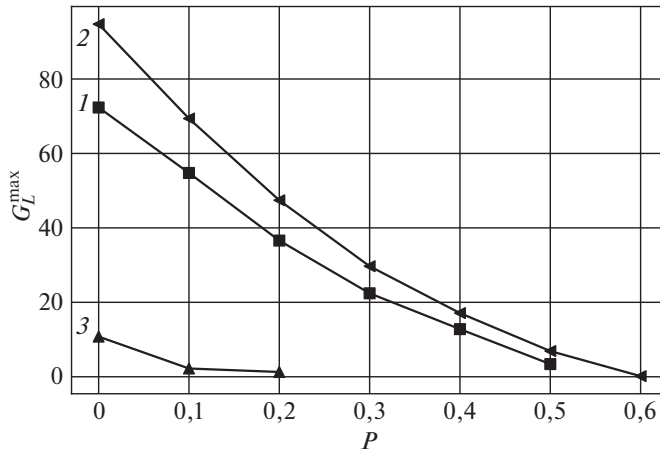


Рис. 10. Максимальный прирост производительности станции LTE-LAA: 1 — при  $N = 25$  и  $W_{\min}^L = 8$ ; 2 — при  $N = 25$  и  $W_{\min}^L = 4$ ; 3 — при  $N = 10$  и  $W_{\min}^L = 4$ .

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