

Механизм разрешения коллизий с поддержкой мини-слотов для базовых станций сетей 5G NR-U *

В.А. Логинов^{1,3}, А.Ю. Троегубов^{1,2}

loginov@wireless.iitp.ru, troegubov@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

³ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Аннотация Ежегодно возрастающие требования к сотовым сетям способствовали появлению и развитию ряда технологий сотовой связи, которые могут использовать ресурсы нелицензируемого спектра. Ключевой особенностью работы подобных технологий, наиболее актуальной из которых является NR-U, считается сосуществование с сетями Wi-Fi, работающими в той же частотной полосе. Хотя и Wi-Fi, и NR-U используют похожие методы доступа к каналу, основанные на CSMA/CA, производительность сетей Wi-Fi заметно ухудшается при совместном существовании в одном канале. Одной из причин является слотированная структура передач базовой станции сотовой сети в нелицензируемом спектре, подразумевающая использование резервирующего сигнала. В настоящей работе предложен механизм разрешения коллизий для базовых станций сети NR-U, учитывающий особенности сотовых сетей пятого поколения, такие как гибкая нумерология и передачи в мини-слотах. Эффективность предложенного решения по сравнению с базовым методом доступа к каналу в сетях NR-U продемонстрирована при помощи имитационного моделирования. Также предложен метод выбора квазиоптимальных параметров механизма разрешения коллизий, позволяющий максимизировать пропускную способность сети Wi-Fi или NR-U.

Ключевые слова: 5G, NR-U, Wi-Fi, разрешение коллизий, сосуществование, мини-слоты

1 Введение

Одним из наиболее перспективных решений для удовлетворения как никогда высоких требований к пропускной способности сотовых сетей явля-

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

ется использование ресурсов нелицензируемого спектра. Несколько лет назад консорциум 3GPP предложил технологию LTE-LAA (англ. LTE License-Assisted Access), позволяющую базовой станции сотовой сети работать в нелицензируемом спектре в полосе 5 ГГц. Однако на этих частотах уже работают широко распространенные сети Wi-Fi, что привело к проблеме совместного существования двух разнородных технологий в одной частотной полосе [1–4].

Кратко рассмотрим методы доступа к каналу в упомянутых технологиях. Работа сетей Wi-Fi определяется семейством стандартов IEEE 802.11. В частности, современные устройства Wi-Fi для доступа к каналу используют метод EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access), основанный на множественном доступе с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) [5].

В свою очередь, в LTE-LAA для доступа к каналу в нелицензируемом спектре используется метод LBT (англ. Listen Before Talk), который также основан на CSMA/CA. В отличие от станций Wi-Fi, станция LTE-LAA должна соблюдать слотированную структуру передач аналогично лицензируемому каналу в LTE. Хотя процедура отсрочки может завершиться в любой момент в пределах слота в лицензируемом канале, поведение базовой станции до следующей границы слота в спецификации не определено. Во многих исследованиях [6–11] предполагается, что базовая станция использует резервирующий сигнал, чтобы не позволить другим устройствам занять канал. Однако, это приводит к большим накладным расходам и значительно снижает производительность сетей Wi-Fi [8, 10, 12].

В недавно завершенной спецификации 3GPP Release 16 представлена технология New Radio Unlicensed (NR-U), которая является развитием LTE-LAA в сотовых сетях пятого поколения [13]. Базовые станции NR-U используют ту же схему доступа к нелицензируемому каналу, и, следовательно, возникают аналогичные проблемы сосуществования с сетями Wi-Fi [14–16]. Однако, в NR-U поддерживаются новые функции: гибкая нумерология (англ. flexible numerology) и передачи в мини-слотах (англ. mini-slot transmissions). Указанные нововведения полезны для работы в нелицензируемом спектре, так как позволяют существенно сократить длительность резервирующего сигнала, тем самым компенсируя его недостатки [11]. Тем не менее, в NR-U по-прежнему отсутствует механизм для борьбы с коллизиями между станциями NR-U и Wi-Fi, что критично для производительности сетей NR-U из-за высокой длительности передач.

Таким образом, сосуществование сетей Wi-Fi и NR-U в одном частотном канале является актуальной проблемой. В предыдущих работах [17, 18] был предложен метод разрешения коллизий (МРК) для базовых станций сети NR-U. Используя МРК, базовая станция случайным образом выбирает интервалы прослушивания канала и посылки резервирующего сигнала для обнаружения и разрешения коллизий. Однако, в [17, 18] предполагалось, что станция может начать передачу только на границе слотов в лицензируемом канале, а канал считался идеальным.

В данной работе предложен новый механизм разрешения коллизий. Вклад исследования состоит в следующем. Во-первых, предложенный механизм соединяет в себе преимущества как исходного МРК, так и современных особенностей работы сетей NR-U, что позволяет расширить область его применения. Во-вторых, рассмотрено влияние ошибок в канале на работу предложенного механизма. В-третьих, при помощи имитационного моделирования проведены численные эксперименты, позволяющие оценить эффективность нового МРК. Наконец, предложена аппроксимация зависимости параметра алгоритма от числа станций, с помощью которой можно максимизировать пропускную способность сети Wi-Fi или NR-U.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено описание методов доступа к каналу в сетях Wi-Fi и NR-U. Обзор литературы, посвященной анализу совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей в общем нелицензируемом канале, представлен в разделе 3. Раздел 4 содержит описание МРК [18] и предложенного в данной работе механизма разрешения коллизий. Описание сценария использования имитационной модели приведено в разделе 5. Результаты численного моделирования, показывающие эффективность предложенного механизма, представлены в разделе 6. Раздел 7 содержит заключение.

2 Сравнение методов доступа к каналу в полосе 5 ГГц

В данном разделе приведено описание методов доступа к каналу в нелицензируемом спектре для сетей Wi-Fi и NR-U.

2.1 Сети Wi-Fi: Enhanced Distributed Channel Access

Для доступа к каналу точки доступа Wi-Fi (APs) используют метод EDCA, основанный на CSMA/CA [5]. Перед попыткой передачи AP прослушивает канал и, если он свободен, начинает передачу данных. В противном случае AP ждет, пока канал освободится, и через интервал времени AIFS (англ. Arbitration InterFrame Space) начинает экспоненциальную процедуру отсрочки. Для этого AP инициализирует счетчик отсрочки случайным целым числом, равномерно распределенным на $[0, W - 1]$, где W — текущее значение конкурентного окна (англ. Contention Window). Счетчик отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда канал свободен в течение интервала $\sigma = 9$ мкс. Если AP обнаруживает, что канал занят, она замораживает счетчик отсрочки, и отсчет возобновляется после того, как канал будет свободен в течение AIFS.

Как только счетчик отсрочки достигает нуля, AP начинает передачу. Передача может содержать несколько блоков данных, называемых MPDU (англ. MAC Protocol Data Unit). Длительность обмена кадрами не должна превышать значение $TXOP_{\text{limit}}$, определенное в стандарте Wi-Fi. Для уменьшения накладных расходов современные сети Wi-Fi используют агрегацию (англ. Aggregation), т.е. объединение нескольких кадров при передаче в агрегированный MPDU (англ. Aggregated MPDU). Более того, кадры

в A-MPDU можно декодировать независимо, и каждый из агрегированных кадров содержит специальный бит, отвечающий за запрос кадра подтверждения (англ. Block Acknowledgement request). Таким образом, если получатель успешно декодирует преамбулу A-MPDU и хотя бы один из агрегированных кадров, он отправляет кадр подтверждения.

Начальное значение конкурентного окна равно W_{min} . Если AP не получает кадр подтверждения, она удваивает конкурентное окно и повторяет процедуру отсрочки. Если конкурентное окно достигает максимального значения $W_{max} = 2^m W_{min}$, где m — количество стадий отсрочки, то оно остается в этом состоянии. Если передача завершается успешно, т.е. AP получает кадр подтверждения, конкурентное окно выставляется в минимальное значение, W_{min} .

Для защиты длинных передач от коллизий устройства Wi-Fi могут использовать механизм RTS/CTS. В частности, после завершения процедуры отсрочки AP отправляет короткий кадр RTS (англ. Request To Send). Через интервал SIFS (англ. Short InterFrame Space) в случае успешного декодирования кадра RTS получатель отвечает кадром CTS (англ. Clear To Send). Через SIFS после получения кадра CTS AP начинает передачу данных. Кадры RTS и CTS имеют поле, в котором указана продолжительность последующей передачи данных, поэтому все устройства Wi-Fi, получившие кадр RTS/CTS, считают канал занятым в течение этого времени и не пытаются получить к нему доступ. Если коллизия все-таки происходит, то в нее попадают короткие кадры RTS/CTS, и ее можно быстро обнаружить.

2.2 Сети NR-U: Listen Before Talk

Работа технологий NR-U и LTE-LAA основана на механизме объединения несущих (англ. Carrier Aggregation). Так, для подключения к сети базовой станции LTE-LAA требуется несущая частота в лицензируемом канале. Как и станции LTE-LAA, базовые станции NR-U (gNBs) используют метод LBT (Listen Before Talk) для передач в нисходящем канале [19]. LBT имеет много общего с методом EDCA, используемым в сетях Wi-Fi. Например, он также основан на CSMA/CA с процедурой двоичной экспоненциальной отсрочки. Максимальная продолжительность непрерывной передачи ограничена и обозначена в спецификации как MCOT (англ. Maximum Channel Occupancy Time).

Изменение размера конкурентного окна основано на HARQ-подтверждении (англ. Hybrid Automatic Repeat Request Acknowledgement). Чтобы увеличивать конкурентное окно только после коллизий, во внимание принимаются только HARQ-подтверждения, относящиеся к первому слоту в передаче. В частности, gNB удваивает размер конкурентного окна, если доля отрицательных подтверждений HARQ превышает 80%, и сбрасывает его до W_{min} в противном случае.

Передача NR-U состоит из кадров длительностью 10 мс, каждый из которых содержит 10 равных подкадров длительностью 1 мс. В свою очередь,

Таблица 1: Гибкая нумерология в NR

Расстояние между поднесущими, КГц	Длительность OFDM-символа, мкс	Длительность слота θ , мкс
15	71,4	1000
30	35,6	500
60	17,9	250
120	8,92	125
240	4,46	62,5

подкадры делятся на слоты длительностью θ (слоты лицензируемого канала), каждый из которых содержит 14 OFDM-символов. Кроме того, NR поддерживает гибкую нумерологию (см. Таблицу 1), т.е. слоты различной длительности. В частности, для NR-U в полосе 5 ГГц доступны нумерологии с $\theta = 1000$ мс и $\theta = 500$ мс. Напротив, в LTE-LAA можно было использовать только слоты длительностью 500 мкс, каждый из которых содержал 7 OFDM-символов.

Базовые станции LTE-LAA могут начать передачу только на границах слотов в лицензируемом канале, однако поведение станции в интервале времени между окончанием процедуры отсрочки и следующей границей слота в лицензируемом канале не определено. Предполагается [6–11], что станция посылает резервирующий сигнал (РС) в указанный промежуток времени, не давая другим устройствам занять канал. РС повышает производительность сотовых сетей, но при этом имеет ряд существенных недостатков, подробно рассмотренных в [9, 17].

В NR-U появилась возможность использовать передачи в мини-слотах. Такая передача может начаться на границе любого OFDM-символа, а не только на границе слота в лицензируемом канале [13]. Следовательно, это позволяет начинать передачу данных почти мгновенно после окончания процедуры отсрочки.

3 Обзор литературы

Совместное существование технологий Wi-Fi и LTE-LAA/NR-U в нелицензируемых частотах обсуждается во многих работах [8, 10, 15, 20–22]. В исследовании [10] показано, что использование резервирующего сигнала значительно улучшает пропускную способность и задержку доступа в сетях LTE-LAA, но при этом производительность сети Wi-Fi ухудшается. В [15] представлен подробный обзор технологии NR-U, который сопровождается моделированием нескольких сценариев сосуществования. Продемонстрировано, что в таких сценариях в сети NR-U обычно выше пропускная способность и ниже задержки, чем в сети Wi-Fi. В отличие от аналитического и имитационного моделирования, в [22] авторы измеряют производительность сетей LTE-LAA и Wi-Fi, развернутых в городе Чикаго. Показано, что

средняя задержка в сетях Wi-Fi существенно увеличивается в сценариях сосуществования.

Исследования [8, 20, 21] показывают, что использование параметров доступа к каналу метода LBT (MCOT, W_{min} и т.д.), указанных по умолчанию в спецификации, приводит к нечестному распределению канальных ресурсов по отношению к сетям Wi-Fi. Как показано в [21], честность распределения ресурсов может быть улучшена за счет изменения некоторых параметров (AIFS и W_{min}). Более того, в [20] продемонстрировано, что за счет уменьшения продолжительности передачи LTE-LAA можно достичь пропорционально-честного распределения ресурсов между сетями.

В литературе предложено множество решений для повышения производительности сетей Wi-Fi и LTE-LAA/NR-U в сценариях совместного существования. Так, в работах [23–26] рассматриваются модификации LBT, в которых предложены отличные от классического механизмы изменение конкурентного окна. В [23] используются методы машинного обучения для предсказания оптимального размера конкурентного окна для базовых станций LTE-LAA на основе количества отрицательных подтверждений. В [24] предложено ввести вероятность коллизии, которая учитывает долю отрицательных HARQ-подтверждений и занятость канала, оцененную во время выполнения процедуры отсрочки. Вычисленная вероятность далее используется для выбора оптимального значения конкурентного окна для базовых станций сети LTE-LAA. Согласно полученным результатам, оба подхода [23, 24] улучшают честность распределения ресурсов в сценариях совместного существования. В [25, 26] авторы предлагают несколько алгоритмов настройки минимального и максимального значений конкурентного окна для LTE-LAA на основе оценки активности устройств Wi-Fi в реальном времени.

В работе [27] предлагается варьировать соотношение между $\text{TXOP}_{\text{limit}}$ и MCOT, чтобы добиться одинаковой пропускной способности в сетях Wi-Fi и LTE-LAA. Однако авторы не учитывают суммарную производительность системы, которая может ухудшиться из-за уменьшения длительности передач.

Несколько альтернатив классическому методу LBT представлено в исследованиях [28–30]. В [28] авторы предлагают p -настойчивую модификацию LBT, а также алгоритм адаптивного выбора вероятности p . В работе [29] предлагается использовать кадр CTS-to-self, определенный в стандарте Wi-Fi, вместо резервирующего сигнала для удержания канала. Для честного распределения канальных ресурсов в исследовании [30] авторы предлагают назначать разные вероятности передачи базовым станциям LTE-LAA, дополнительно учитывая канальные условия. Предлагаемая схема обеспечивает большой выигрыш в пропускной способности сети LTE-LAA и позволяет достичь пропорционально-честного распределения ресурсов между базовыми станциями.

В нашем предыдущем исследовании [18] было предложено улучшение механизма разрешения коллизий (МПК) [17] для базовых станций сети NR-U. Используя МПК, сотовая станция в случайные моменты времени приоста-

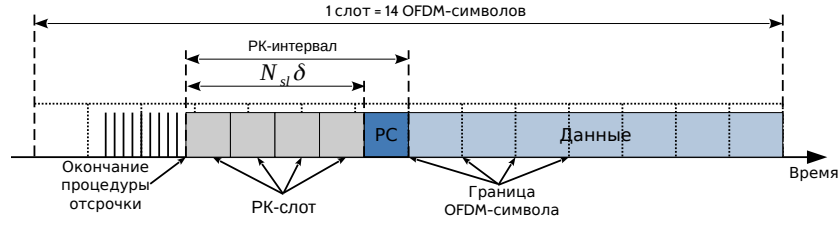


Рис. 2: Пример доступа к каналу при использовании МРК(N_{sl}) с $N_{sl} = 4$ и мини-слотов ($\lambda = \theta/14$)

длительностью $T_s = \delta - T_r$ gNB либо продолжает посылать резервирующий сигнал, либо прослушивает канал. Если при прослушивании в течение интервала T_s gNB обнаруживает, что канал занят, она детектирует коллизии, т.е. откладывает текущую передачу, удваивает конкурентное окно и повторяет процедуру отсрочки. В противном случае, если канал свободен или gNB посылает РС в течение T_s , она переходит к следующему РК-слоту, если они остались. Если после обработки всех РК-слотов (или если $K = 0$) gNB не отложила свою передачу, она посылает РС до следующей стартовой позиции, а затем передает данные. Интервал времени, содержащий РК-слоты и следующий за ними РС, далее называется интервалом разрешения коллизии (РК-интервалом).

В улучшенном МРК [18] в первом РК-слоте gNB посылает РС в течение T_s с вероятностью ϕ . В каждом из последующих РК-слотов gNB посылает РС в течение T_s с вероятностью ξ и прослушивает канал с вероятностью $(1 - \xi)$.

Описанный МРК позволяет существенно повысить производительность сетей Wi-Fi и NR-U, но, как будет показано в разделе 6, он неэффективен, если gNB использует конфигурацию с маленьким периодом стартовых позиций, например, в случае использования мини-слотов. Поэтому, в данной работе предлагается новый МРК (МРК(N_{sl})), при использовании которого gNB всегда выделяет фиксированное число $N_{sl} > 0$ РК-слотов после окончания процедуры отсрочки, см. рис 2. Затем, gNB посылает РС до следующей стартовой позиции и после этого начинает передачу данных. Структура РК-слотов остается такой же, как и в МРК [18], и описана выше.

Количество РК-слотов N_{sl} выбирается таким образом, чтобы их было достаточно для разрешения возможных коллизий, но в то же время не было лишних накладных расходов (выбор конкретного значения N_{sl} приведен в разделе 6). В результате МРК(N_{sl}) сочетает в себе преимущества как МРК [18], так и передач в мини-слотах.

5 Рассматриваемый сценарий

Для оценки эффективности предложенного механизма была разработана имитационная модель. В данном разделе приведено краткое описание сценария ее использования и принятые допущения.

Рассматривается сеть с N_l gNB и N_w AP, работающими в одном канале шириной 20 МГц и расположенными в зоне радиовидимости друг друга. Для простоты считается, что все передачи происходят только в нисходящем канале. Обе сети работают в режиме насыщения, и число попыток передачи одного пакета не ограничено. Кроме того, мы предполагаем, что границы слотов в лицензируемом канале всех gNB синхронизированы.

Передача gNB длится T_l , включая РК-интервал, и состоит из нескольких слотов NR-U. d_l обозначает номинальную скорость передачи данных NR-U, т.е. каждый NR-U слот содержит полезную нагрузку, равную $d_l\theta$.

Успешная передача Wi-Fi длится $T_{w,s} \leq T_l$ и содержит n_w агрегированных подкадров. Продолжительность коллизии Wi-Fi составляет $T_{w,c} \ll T_{w,s}$, если используется механизм RTS/CTS, и $T_{w,c} \approx T_{w,s}$ в противном случае. Каждый подкадр Wi-Fi содержит полезную нагрузку, равную $d_w \frac{T_{w,s}}{n_w}$, где d_w — номинальная скорость передачи данных Wi-Fi.

Учет ошибок в канале осуществляется в предположении фиксированной вероятности потери подкадра Wi-Fi/данных в слоте NR-U. В частности, q_w (q_l) обозначает вероятность того, что конкретный подкадр Wi-Fi (данные в слоте NR-U) не подвержен ошибкам канала, т.е. $q_w = q_l = 1$ соответствует идеальному каналу, рассмотренному в [18].

Если при коллизии передач ровно одной AP и хотя бы одной gNB доступно не менее одного РК-слота и при этом все попавшие в коллизию gNB прослушивают канал в первом РК-слоте, то станция Wi-Fi может декодировать преамбулу кадра Wi-Fi благодаря эффекту захвата с вероятностью η [31]. Таким образом, при использовании МРК за счет эффекта захвата станция Wi-Fi может успешно принять передачу.

6 Численные результаты

Рассмотрим сценарий с $N_w + N_l = 10$ станциями и варьируемой долей Wi-Fi APs в нумерологии с длительностью слота $\theta = 500$ мкс. При использовании передач в мини-слотах полагается, что $\lambda = \theta/14 \approx 36$ мкс, и $\lambda = 500$ мкс в противной случае.

На графиках используются следующие обозначения. Классический метод LBT с резервирующим сигналом обозначен как базовый подход (БП). Механизм разрешения коллизий из [18] обозначается как МРК с указанием параметра ϕ . Предложенный в данной работе механизм разрешения коллизий с выделенным числом РК-слотов обозначен как МРК(N_{sl}). Значения параметров, используемых по умолчанию в численных экспериментах, указаны в таблице 2 и взяты из соответствующих спецификаций/стандартов.

Таблица 2: Значения параметров имитационной модели по умолчанию

Параметр	Значение
T_l	8000 мкс
θ	500 мкс
λ	500 мкс для МРК, 36 мкс для МРК(N_{sl})
$T_{w,s}$	2500 мкс
$T_{w,c}$	44 мкс при использовании RTS/CTS, 2500 мкс в противном случае
n_w	15
σ	9 мкс
W_{min}	16
W_{max}	64
d_w, d_l	75 Мбит/с
η	0,5
δ	30 мкс
ϕ, ξ	0,5
q_l, q_w	0,9

Анализ эффективности МРК(N_{sl}) начнем с выбора подходящего значения числа РК-слотов N_{sl} . На рис. 3 показана суммарная пропускная способность обеих сетей при использовании передач в мини-слотах. Как и ожидалось, МРК(N_{sl}) плохо работает с небольшим количеством РК-слотов из-за низкой вероятности разрешения коллизии. С другой стороны, слишком большое количество РК-слотов приводит к лишним накладным расходам и также снижает пропускную способность. Поэтому, в качестве квазиоптимального значения, повышающего суммарную пропускную способность обеих сетей, возьмем $N_{sl} = 5$, которое будет использоваться в дальнейших экспериментах.

На рис. 4 и рис. 5 приведены пропускные способности сетей Wi-Fi и NR-U в нумерологии $\lambda = 500$ мкс при использовании механизма RTS/CTS и без него. Видно, что в обоих случаях МРК и МРК(5) одинаково влияют на пропускные способности сетей Wi-Fi и NR-U. Это объясняется тем, что, хотя при использовании МРК РК-интервал в среднем содержит больше РК-слотов, дополнительные РК-слоты почти не влияют на вероятность разрешения коллизии. Таким образом, МРК(N_{sl}) можно успешно применять, даже если gNB использует нумерологию с большим периодом стартовых позиций λ .

Перейдем к анализу эффективности МРК(N_{sl}) в случае, когда станции NR-U используют мини-слоты. На рис. 6 и рис. 7 представлены пропускные способности обеих сетей и суммарная пропускная способность в нумерологии $\lambda = 36$ мкс при использовании механизма RTS/CTS и без него. Как и следовало ожидать, при использовании передач в мини-слотах в обоих

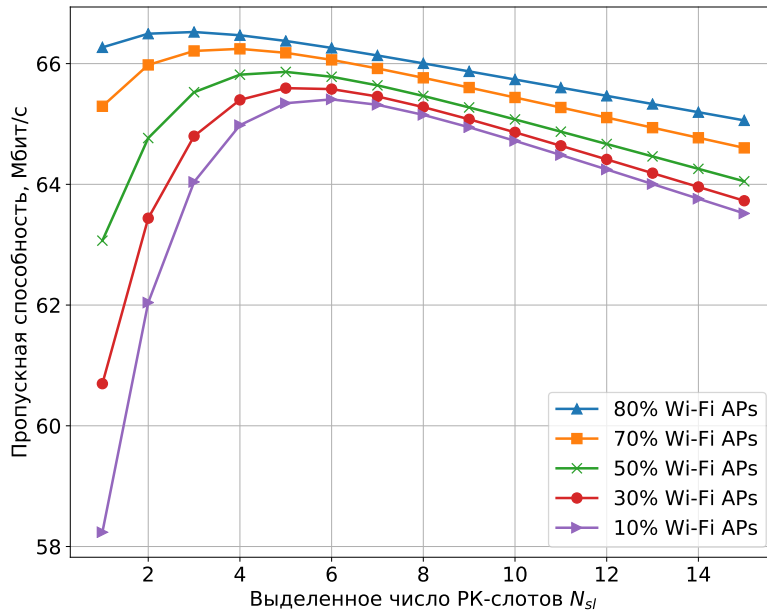


Рис. 3: Суммарная пропускная способность в нумерологии $\lambda = 36$ мкс при использовании МРК(N_{sl}), с RTS/CTS

случаях МРК не дает какого-либо выигрыша в пропускной способности относительно БП, так как РК-интервал содержит не более одного слота разрешения коллизии. Напротив, МРК(N_{sl}) специально разработан для конфигураций с маленьким периодом стартовых позиций λ . МРК(5) улучшает суммарную пропускную способность относительно БП вплоть до 90% AP при использовании устройствами Wi-Fi механизма RTS/CTS, и вплоть до 70% AP в противном случае. Поскольку пропускные способности сетей с использованием механизма RTS/CTS и без него качественно похожи, в дальнейших экспериментах для краткости рассматривается только случай с RTS/CTS.

Для дальнейшего анализа введем следующие вспомогательные характеристики. Пусть G_w (G_l) обозначает прирост пропускной способности S_w (S_l) сети Wi-Fi (NR-U), полученный при использовании МРК(N_{sl}), относительно базового подхода:

$$G_w = \frac{S_w - S_{w,base}}{S_{w,base}}, \quad (2)$$

$$G_l = \frac{S_l - S_{l,base}}{S_{l,base}}, \quad (3)$$

где $S_{w,base}$ и $S_{l,base}$ обозначают пропускные способности сетей Wi-Fi и NR-U соответственно при использовании БП.

Обозначим за $\phi_{opt,l}$ ($\phi_{opt,w}$) оптимальные значения параметра ϕ МРК(N_{sl}), при которых достигается максимальный прирост пропускной способности

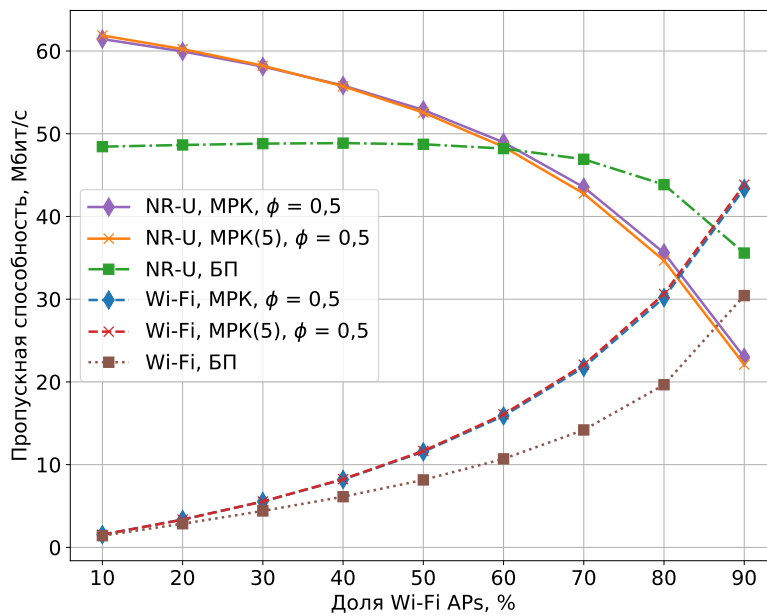


Рис. 4: Сравнение МРК и МРК(N_{sl}) в нумерологии $\lambda = 500$ мкс, с RTS/CTS

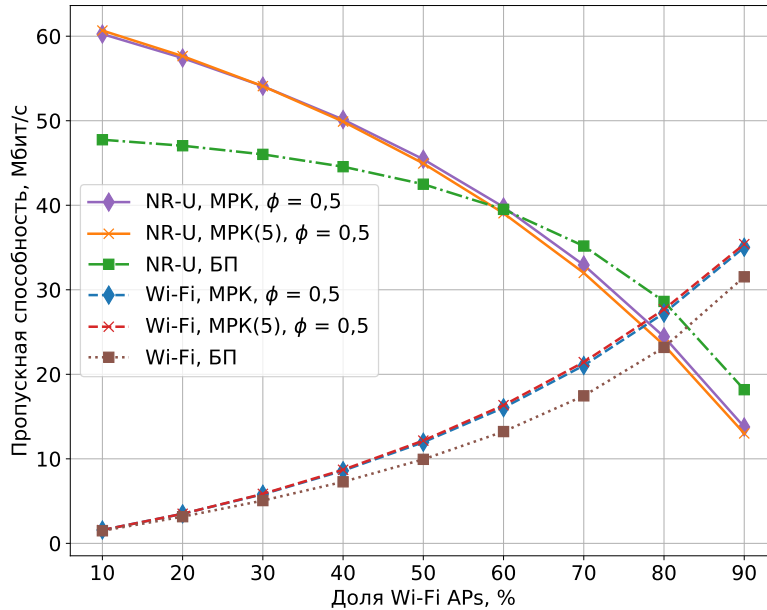


Рис. 5: Сравнение МРК и МРК(N_{sl}) в нумерологии $\lambda = 500$ мкс, без RTS/CTS

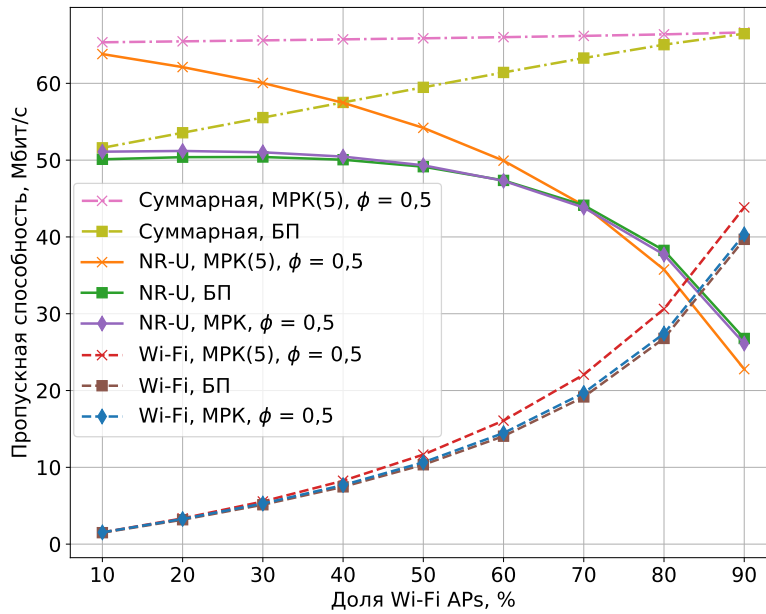


Рис. 6: Сравнение МРК и МРК(N_{st}) в нумерологии $\lambda = 36$ мкс, с RTS/CTS

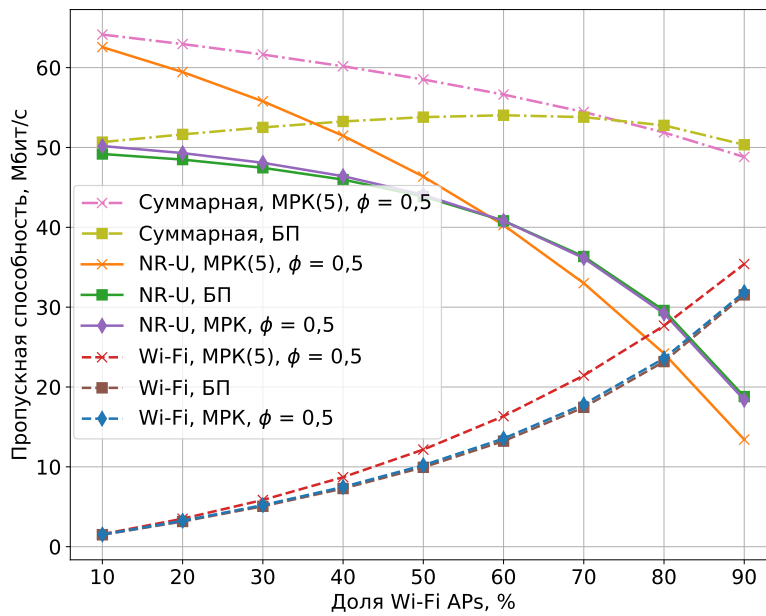


Рис. 7: Сравнение МРК и МРК(N_{st}) в нумерологии $\lambda = 36$ мкс, без RTS/CTS

сети NR-U (Wi-Fi) при условии $G_w \geq 0$ ($G_l \geq 0$). Для нахождения оптимальных значений ϕ используется полный перебор с шагом $\Delta\phi = 5 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне $[0, 1]$ при фиксированном $\xi = 0.5$ для каждой доли Wi-Fi APs.

На рис. 8 приведен прирост пропускных способностей сетей Wi-Fi и NR-U при $\phi = \phi_{opt,l}$ и $\phi = \phi_{opt,m}$. Зависимости $\phi_{opt,l}$ и $\phi_{opt,m}$ от доли AP представлены на рис. 9. Видно, что эти зависимости имеют простой вид и могут быть аппроксимированы кусочно-линейной функцией. Полученная аппроксимация приведена на рис. 9 и имеет следующий вид:

$$\phi_{opt,l}(x) = 0,44x + 0,48; \quad (4)$$

$$\phi_{opt,w}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,5; \\ 2,3x - 1,13, & x \geq 0,5, \end{cases} \quad (5)$$

где $x = N_w / (N_l + N_w)$.

Значения G_l и G_w , соответствующие значениям параметрам ϕ , полученным из аппроксимации, приведены на рис. 8. Видно, что использование приведенной аппроксимации (4) и (5) дает результаты, очень похожие на полученные полным перебором, следовательно, она может быть использована для выбора оптимального ϕ при условии, что gNB имеет оценку числа устройств. Таким образом, можно достичь прироста пропускной способности более 60% для сети Wi-Fi и более 25% для сети NR-U. Более того, за счет выбора ϕ в МРК(N_{sl}) можно расширить область, в которой достигается неотрицательный прирост пропускных способностей обеих сетей, вплоть до 90% AP (в МРК область $G_l > 0$ была ограничена 75% STA, см. [18]).

7 Заключение

В данной работе был предложен новый механизм разрешения коллизий для базовых станций NR-U, учитывающий особенности работы сотовых сетей 5G в нелицензируемом спектре. При его использовании сотовая станция всегда обрабатывает заранее определенное число РК-слотов в начале передачи, что позволяет успешно детектировать и разрешать коллизии между станциями даже при использовании мини-слотов. Анализ эффективности предложенного механизма при совместном существовании сетей NR-U и Wi-Fi в одном частотном канале был проведен при помощи имитационного моделирования. Численные результаты показали, что предложенное решение обеспечивает заметный прирост пропускной способности обеих сетей по сравнению с LBT с резервирующим сигналом при использовании мини-слотов и расширяет область, в которой возможно одновременно получить положительный прирост пропускных способностей обеих сетей. Также получена аппроксимация для зависимости оптимального значения параметра механизма от доли Wi-Fi APs. Она позволяет максимизировать пропускную способность сети Wi-Fi или NR-U по имеющейся оценке числа станций без использования полного перебора по параметру предложенного механизма.

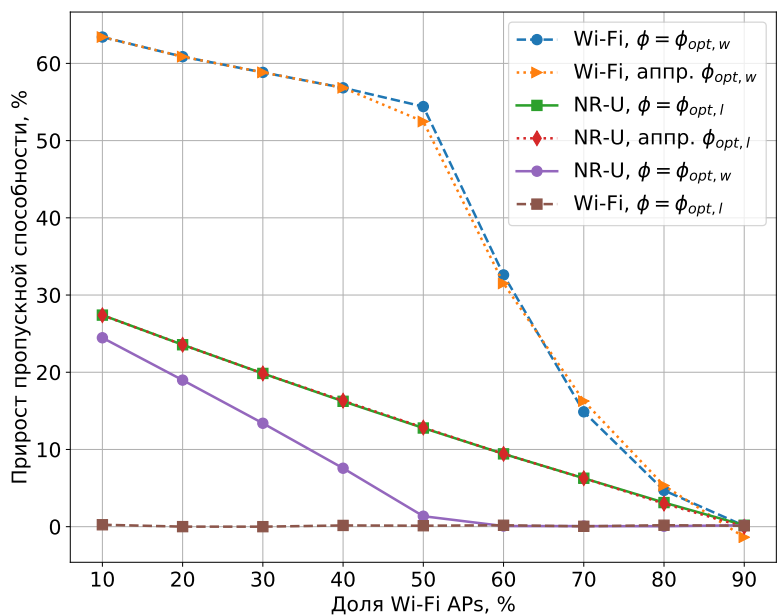


Рис. 8: Прирост пропускной способности при $\phi = \phi_{opt,l}$ и $\phi = \phi_{opt,m}$ в нумерологии $\lambda = 36$ мкс, с RTS/CTS

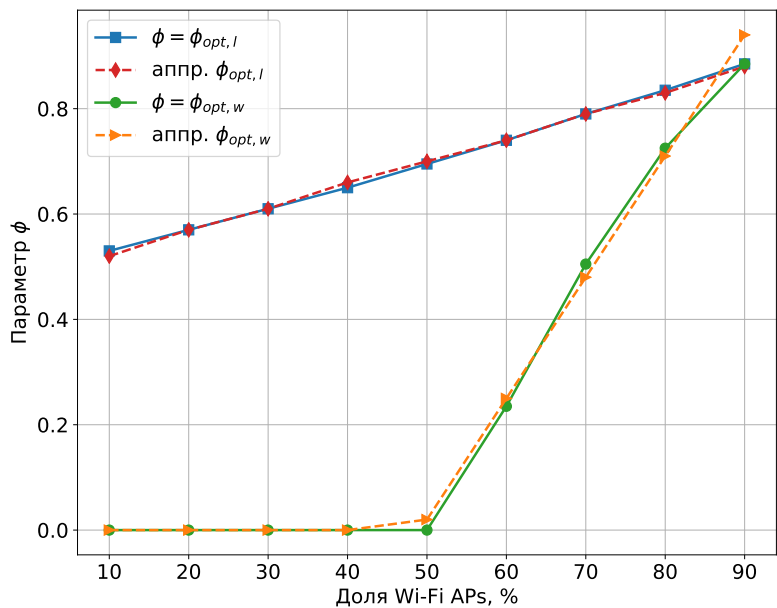


Рис. 9: Параметры $\phi_{opt,l}$ и $\phi_{opt,m}$ и их аппроксимация в нумерологии $\lambda = 36$ мкс, с RTS/CTS

Список литературы

1. Bolin Chen, Jiming Chen, Yuan Gao, and Jie Zhang. Coexistence of lte-laa and wi-fi on 5 ghz with corresponding deployment scenarios: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1):7–32, 2016.
2. Michal Cierny, Timo Nihtila, Toni Huovinen, Markku Kuusela, Fedor Chernogorov, Kari Hooli, and Antti Toskala. Fairness vs. performance in rel-13 lte licensed assisted access. *IEEE Communications Magazine*, 55(12):133–139, 2017.
3. Gaurang Naik, Jinshan Liu, and Jung-Min Jerry Park. Coexistence of wireless technologies in the 5 ghz bands: A survey of existing solutions and a roadmap for future research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3):1777–1798, 2018.
4. V.A. Loginov, A.I. Lyakhov, and E.M. Khorov. Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA Networks: Open Issues. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 63(12):1530–1537, 2018.
5. IEEE. *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2016.
6. Jaehong Yi, Weiping Sun, Seungkeun Park, and Sunghyun Choi. Performance analysis of lte-laa network. *IEEE Communications Letters*, 22(6):1236–1239, 2017.
7. Morteza Mehrnoush, Vanlin Sathya, Sumit Roy, and Monisha Ghosh. Analytical modeling of wi-fi and lte-laa coexistence: Throughput and impact of energy detection threshold. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 26(4):1990–2003, 2018.
8. Anand M Baswade, Luca Beltramelli, Franklin A Antony, Mikael Gidlund, Bheemarjuna Reddy Tamma, and Lakshmikanth Guntupalli. Modelling and analysis of wi-fi and laa coexistence with priority classes. In *2018 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–8. IEEE, 2018.
9. Polina Kutsevol, Vyacheslav Loginov, Evgeny Khorov, and Andrey Lyakhov. Analytical study of license-assisted access in 5g networks. In *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, pages 1–9. IEEE, 2019.
10. Jun Zheng, Jie Xiao, Qilei Ren, and Yuan Zhang. Performance modeling of an lte laa and wifi coexistence system using the laa category-4 lbt procedure and 802.11 e edca mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.
11. Katarzyna Kosek-Szott, Alice Lo Valvo, Szymon Szott, Pierluigi Gallo, and Ilenia Tinnirello. Downlink channel access performance of nr-u: Impact of numerology and mini-slots on coexistence with wi-fi in the 5 ghz band. *Computer Networks*, page 108188, 2021.
12. Polina Kutsevol, Vyacheslav Loginov, Evgeny Khorov, and Andrey Lyakhov. New collision detection method for fair lte-laa and wi-fi coexistence. In *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
13. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *5G NR: The next generation wireless access technology*. 2020.
14. Gaurang Naik, Jung-Min Park, Jonathan Ashdown, and William Lehr. Next generation wi-fi and 5g nr-u in the 6 ghz bands: Opportunities and challenges. *IEEE Access*, 8:153027–153056, 2020.

15. Mohammed Hirzallah, Marwan Krunz, Balkan Kecicioglu, and Belal Hamzeh. 5g new radio unlicensed: Challenges and evaluation. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020.
16. Vanlin Sathya, Srikant Manas Kala, Muhammad Iqbal Rochman, Monisha Ghosh, and Sumit Roy. Standardization advances for cellular and wi-fi coexistence in the unlicensed 5 and 6 ghz bands. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 24(1):5–15, 2020.
17. В. А. Логинов. Исследование методов случайного доступа к общему каналу беспроводных локальных и сотовых сетей.
18. Логинов В. А. и Троегубов А. Ю. Исследование механизма разрешения коллизий для базовых станций nг-u. In *Информационные Технологии и Системы ИТuС'20*, Москва, 2020. ИППИ РАН.
19. 3GPP. Physical layer procedures for shared spectrum channel access. Technical specification (TS) 37.213, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 1 2020. Version 16.0.0.
20. Morteza Mehrnoush, Sumit Roy, Vanlin Sathya, and Monisha Ghosh. On the fairness of wi-fi and lte-laa coexistence. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 4(4):735–748, 2018.
21. Mohammed Hirzallah, Marwan Krunz, and Yong Xiao. Harmonious cross-technology coexistence with heterogeneous traffic in unlicensed bands: Analysis and approximations. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(3):690–701, 2019.
22. Vanlin Sathya, Muhammad Iqbal Rochman, and Monisha Ghosh. Measurement-based coexistence studies of laa & wi-fi deployments in chicago. *IEEE Wireless Communications*, 2020.
23. Zoraze Ali, Lorenza Giupponi, Josep Mangués-Bafalluy, and Biljana Bojovic. Machine learning based scheme for contention window size adaptation in lte-laa. In *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–7. IEEE, 2017.
24. Rashid Ali, Nurullah Shahin, Arslan Musaddiq, Byung-Seo Kim, and Sung Won Kim. Fair and efficient channel observation-based listen-before talk (colbt) for laa-wifi coexistence in unlicensed lte. In *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 154–158. IEEE, 2018.
25. Moawiah Alhulayil and Miguel López-Benítez. Static contention window method for improved lte-laa/wi-fi coexistence in unlicensed bands. In *2019 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
26. Moawiah Alhulayil and Miguel Lopez-Benitez. Novel laa waiting and transmission time configuration methods for improved lte-laa/wi-fi coexistence over unlicensed bands. *IEEE Access*, 8:162373–162393, 2020.
27. Aliasghar Keyhanian, Aris Leivadreas, Ioannis Lambadaris, and Ioannis Marmokos. Analyzing the coexistence of wi-fi and laa-lte towards a proportional throughput fairness. In *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pages 95–101, 2018.
28. Zhenzhou Tang, Xuesheng Zhou, Qimei Chen, Guanding Yu, Xiaoqi Shi, and Qian Hu. Adaptive p -persistent lbt for unlicensed lte: Performance analysis and optimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(9):8744–8758, 2019.
29. Qimei Chen, Guanding Yu, and Zhi Ding. Enhanced laa for unlicensed lte deployment based on txop contention. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1):417–429, 2018.

30. Rabbia Saleem, Sheeraz A Alvi, and Salman Durrani. Performance-fairness trade-off for wi-fi and lte-laa coexistence. *IEEE Access*, 9:62446–62459, 2021.
31. Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, Ilya Levitsky, and Andrey Lyakhov. Testbed to study the capture effect: Can we rely on this effect in modern wi-fi networks. In *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pages 1–5. IEEE, 2018.