

Исследование механизма разрешения коллизий для базовых станций 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 Из-за стремительно возрастающего с каждым годом объема трафика в сотовых сетях повышение их пропускной способности становится все более актуальной задачей. Одним из возможных решений этой проблемы является использование нелицензируемых диапазонов частот, для чего консорциум 3GPP разработал ряд технологий, наиболее актуальной из которых является технология NR-U. В связи с тем, что в нелицензируемых диапазонах, используемых NR-U, уже работают другие беспроводные сети, например, сети Wi-Fi, для доступа к каналу базовая станция NR-U использует метод доступа Listen-before-Talk (LBT), основанный на CSMA/CA. Несмотря на то, что метод доступа в сетях Wi-Fi имеет много общего с LBT, при совместном существовании в одном канале пропускная способность Wi-Fi может значительно снижаться. Одним из решений данной проблемы может быть использование механизмов разрешения коллизий, которые неизбежно возникают при использовании CSMA/CA. В настоящей работе предлагается модификация метода LBT, позволяющая базовым станциям NR-U детектировать и разрешать коллизии. При помощи имитационного моделирования показана эффективность рассматриваемого метода по сравнению с LBT с резервирующим сигналом.

1 Введение

В связи с ежегодно возрастающим объемом данных, передаваемых в сотовых сетях, одним из требований к сетям пятого поколения является обеспечение как никогда высокой пропускной способности. Увеличение производительности сотовой сети за счет расширения имеющихся частотных полос и/или выделения новых в лицензируемом канале не представляется возможным. В свою очередь, в нелицензируемом диапазоне частот 5 ГГц доступны довольно широкие полосы частот. В связи с этим консорциум 3GPP

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01223 а

разработал технологию NR-U, позволяющие базовой станции сотовой сети использовать для передачи диапазон 5 ГГц [1]. Основной проблемой при использовании этих частот является взаимодействие NR-U с уже работающими в этой полосе частот технологиями, например, Wi-Fi.

В современных Wi-Fi сетях для доступа к каналу используется метод EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access), основанный на CSMA/CA (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). При его использовании для избегания коллизий станция Wi-Fi (STA) применяет процедуру отсрочки. Перед каждой передачей STA инициализирует счетчик отсрочки случайно выбранным целым числом из отрезка $[0, W - 1]$, где W — текущее значение конкурентного окна. Затем счетчик отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда канал свободен в течение интервала времени σ , называемого слотом отсрочки. Если станция Wi-Fi обнаруживает, что канал занят (занятость канала определяется согласно порогу детектирования занятости среды, указанному в стандарте Wi-Fi [2]), она замораживает счетчик отсрочки и возобновляет отсчет только после того, как канал будет свободен в течение времени AIFS (англ. Arbitration InterFrame Space). Когда счетчик достигает нуля, STA начинает передачу данных. Если при этом несколько Wi-Fi станций одновременно завершают процедуру отсрочки, то происходит коллизия. Изначально $W = W_{min}$, но после каждой неудачной передачи оно удваивается, пока не будет достигнуто W_{max} , а после успешной передачи значение конкурентного окна выставляется минимальным.

Для защиты длительных передач STA может использовать механизм RTS/CTS (англ. Request To Send/Clear To Send). Так, после получения доступа к каналу STA передает короткий RTS-кадр. В случае успешного получения принимающая STA через SIFS (англ. Short InterFrame Space) отправляет кадр CTS. Через интервал SIFS после получения кадра CTS первая STA начинает непосредственно передачу данных. Так как и RTS, и CTS содержат специальное поле duration, показывающее, в течение какого времени канал будет занят, то все ближайшие станции не будут пытаться получить к нему доступ. При этом в случае коллизии вместо данных в нее попадают только короткие кадры RTS/CTS, что дополнительно уменьшает время коллизии.

В свою очередь, станции NR-U (gNB) используют метод доступа к каналу LBT (англ. Listen Before Talk), который во многом похож на EDCA, но имеет существенные отличия:

- в LBT отсутствует механизм аналогичный RTS/CTS, позволяющий уменьшить длительность коллизий;
- у gNB выше максимальная длительность передачи;
- в сотовой сети в лицензируемом канале устройство начинает передачу данных строго на границе слотов, поэтому и в нелицензируемом полосе необходимо соблюдать данную структуру, то есть передача gNB возможна только на границе слота лицензируемого канала.

Для обеспечения честности распределения канальных ресурсов между сетями консорциум 3GPP предлагает руководствоваться следующий критерий:

рием: сотовая сеть влияет на беспроводную локальную сеть не сильнее, чем еще одна локальная сеть с тем же количеством станций.

Так как процедура отсрочки gNB может закончиться в любой момент в пределах слота в лицензируемом канале, то до следующей границы слота может остаться относительно большой промежуток времени. При этом поведение станции в этом интервале времени в спецификации 3GPP не описано. Чтобы не допустить захват канала другими устройствами (например, STA) в указанный промежуток времени, обычно предлагается gNB посылать резервирующий сигнал вплоть до следующей границы слота в лицензируемом канале [3–9]. Хотя такой подход заметно увеличивает пропускную способность сотовой сети по сравнению с LBT без резервирующего сигнала, он имеет несколько недостатков:

- резервирующий сигнал не содержит полезной информации (ни пользовательских, ни служебных данных);
- возможны асимметричные коллизии, если длительность резервирующего сигнала превышает длительность передачи Wi-Fi [10]. В таком случае gNB не заметит коллизию и на границе слота начнет передачу данных, в то время как STA задетектирует коллизию, отложит свою передачу и увеличит конкурентное окно.

В данной работе рассматривается модификация метода доступа LBT, позволяющая gNB детектировать и разрешать коллизии и повысить пропускную способность беспроводной локальной и сотовой сетей.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Раздел 2 содержит обзор литературы, посвященной анализу совместного существования беспроводных локальных и сотовых сетей в общем нелицензируемом канале. В разделе 3 приведены описание предложенного метода и краткое описание сценария использования имитационной модели. В разделе 4 представлены результаты численного моделирования, показывающие эффективность предложенного метода. Раздел 5 содержит заключение.

2 Обзор литературы

Вопросу совместного существования технологий Wi-Fi и NR-U (а также ее предшественницы, технологии LTE-LAA) в общем канале посвящено немало работ. В большинстве исследований рассматривается модификация LBT с резервирующим сигналом [3–9].

Так, в [4] разработана аналитическая модель на основе трехмерной цепи Маркова для оценки пропускных способностей обеих сетей для трафика с разным приоритетом. При этом авторы сравнили методы LBT с использованием резервирующего сигнала и без него. Согласно результатам, хотя использование резервирующего сигнала значительно повышает пропускную способность сотовой сети, эффективность сети Wi-Fi заметно снижается. Существенным недостатком в работе является то, что в ней не исследована честность распределения ресурсов между сетями.

Напротив, в работе [5] авторы акцентируют внимание на распределении канальных ресурсов между Wi-Fi и LTE-LAA для различных категорий трафика при использовании метода LBT с резервирующим сигналом. Показано, что справедливость распределения ресурсов, согласно определенному 3GPP критерию, выполняется для параметра $TXOP$ по умолчанию только для трафика с наивысшим приоритетом. Поэтому авторы также рассматривают альтернативные определения честности распределения ресурсов. В частности, взяв в качестве критерия proportional fairness и оптимизировав значение $TXOP$ для LTE-LAA, удалось достичь справедливого распределения ресурсов для обеих сетей для всех категорий трафика.

Для повышения пропускной способности и/или достижения честности распределения канальных ресурсов при использовании LBT с резервирующим сигналом в литературе предлагались различные решения.

Так, в работе [3] при помощи имитационного моделирования исследуется влияние порога детектирования занятости среды для LTE-LAA и Wi-Fi на число коллизий в нисходящем трафике сотовой сети. В частности, авторами предложен алгоритм выбора адаптивного значения порога детектирования занятости среды для LTE-LAA, который позволяет увеличить пропускную способность сотовой сети.

В работе [6] используются методы машинного обучения для выбора наилучшего значения (относительно честности распределения ресурсов) конкурентного окна для LTE-LAA. А, например, в [7] предлагается ввести эмпирическую вероятность коллизии для LTE-LAA и на ее основе менять значение конкурентного окна. Согласно полученным в работах результатам, оба подхода улучшают честность распределения ресурсов между сетями.

В [9] авторы предлагают менять параметры доступа к каналу не только для сотовой сети, но и для сети Wi-Fi. В частности, при помощи разработанного алгоритма адаптивного выбора согласованных размеров конкурентного окна для обеих сетей удается достичь не только прироста суммарной пропускной способности, но и обеспечить пропускную способность сети Wi-Fi не ниже заранее заданного значения. Недостатком в работе является сложность осуществления предложенного алгоритма на практике, так как уже выпущенные устройства Wi-Fi не будут его поддерживать.

В работе [8] предлагается достичь честного сосуществования Wi-Fi и LTE-LAA путем изменения длины пакета данных для каждой сети. В качестве критерия честности авторы выбирают либо совпадение пропускных способностей обеих сетей, либо совпадение пропускных способностей отдельных устройств. Но при этом в работе не рассматривается изменение суммарной пропускной способности обеих сетей, которая может сильно понизиться при уменьшении длины пакета.

В [11] авторы предлагают использовать кадр CTS-to-self из стандарта Wi-Fi вместо резервирующего сигнала для удержания канала и, в дополнении к этому, варьировать размер конкурентного окна. Это позволяет значительно повысить эффективность сети NR-U при небольшом снижении пропускной способности сети Wi-Fi. Недостатком такого подхода является то

что для его реализации необходимы большие изменения в спецификации NR-U.

В работе [12] предложена p -настойчивая модификация метода LBT, а также алгоритм адаптивного выбора вероятности p . После окончания процедуры отсрочки LTE-LAA передает данные с вероятностью p , а с вероятностью $1 - p$ заново повторяет процедуру отсрочки. Данная реализация повышает общую эффективность обеих сетей во многих сценариях. Однако стоит отметить, что честность распределения ресурсов проверяется по критерию, не совпадающему с критерием, определенным 3GPP.

В [13] разработан механизм разрешения коллизий для базовых станций NR-U. В частности, используется резервирующий сигнал для детектирования и разрешения коллизий между станциями NR-U и Wi-Fi. Было показано, что предложенный алгоритм позволяет значительно повысить пропускную способность сети Wi-Fi при практически неизменной пропускной способности сети NR-U. Тем не менее, используя предложенный метод, коллизию между gNB и STA можно разрешить только в пользу последней (подробнее см. в разделе 3).

Исходя из всего выше сказанного, поставим в данной работе следующие задачи:

- улучшить реализацию метода LBT, предложенную в [13], путем обобщения алгоритма разрешения коллизий;
- разработать имитационную модель для анализа эффективности модифицированного метода LBT и с ее помощью оценить пропускные способности сотовой сети и беспроводной локальной сети в различных сценариях;
- оценить область использования, в которой можно добиться одновременного увеличения пропускной способности сети NR-U и Wi-Fi сети по сравнению с методом LBT с резервирующим сигналом.

3 Описание метода

Как уже упоминалось в разделе 2, в данной работе предлагается улучшение метода разрешения коллизий, предложенного в [13]. При использовании указанного метода после окончания процедуры отсрочки gNB разделяет время t до следующей границы слота в лицензируемом канале на интервалы длительностью δ , которые называются слотами разрешения коллизии (или РК-слотами). Число РК-слотов определяется как

$$K = \left\lfloor \frac{t}{\delta} \right\rfloor, \quad (1)$$

где θ — длительность слота в нелицензируемом канале.

РК-слот устроен следующим образом. В начале gNB передает резервирующий сигнал длительностью T_r . После этого gNB в течение $T_s = \delta - T_r$ либо продолжает передавать резервирующий сигнал, либо прослушивает канал.

Если при прослушивании канала в течение T_s gNB обнаруживает, что он занят, она детектирует коллизию, откладывает текущую передачу, удваивает значение конкурентного окна и повторяет процедуру отсрочки. В противном случае (если базовая станция либо обнаруживает пустой канал, либо решает передавать резервирующий сигнал в течение T_s) gNB уменьшает число K на единицу и переходит к следующему РК-слоту (если они остались).

Если по окончании всех РК-слотов gNB не отложила свою передачу (или если изначально $K = 0$), она посылает резервирующий сигнал вплоть до следующей границы слота в лицензируемом канале, после чего передает данные.

Чтобы задетектировать коллизию с передачами STA, в первом РК-слоте все gNB всегда слушают канал. В последующих РК-слотах gNB передает резервирующий сигнал в течение T_s с вероятностью ξ и прослушивает канал с вероятностью $1 - \xi$.

Такой подход имеет несколько недостатков:

- коллизия только среди gNB не может быть разрешена, если доступно менее 2 РК-слотов;
- при коллизии нескольких gNB и одной STA коллизия при $K > 0$ разрешалась в пользу последней (с точностью до срабатывания эффекта захвата, см. [14]). В то же время gNB могла успешно передать хотя бы часть данных только при $K = 0$, что негативно сказывалось на пропускной способности сети NR-U.

Чтобы избавиться от указанных недостатков, в данной работе предлагается следующее улучшение: в первом РК-слоте gNB посылает резервирующий сигнал в течение T_s с вероятностью ϕ и слушает канал с вероятностью $1 - \phi$ (иными словами, в [13] всегда $\phi = 0$). Путем выбора отличного от нуля ϕ можно добиться того, что:

- коллизии только среди gNB могут быть разрешены при наличии хотя бы 1 РК-слота;
- при коллизии одной gNB и нескольких STA коллизия может быть успешно разрешена в пользу gNB (при $K > 0$).

4 Численные результаты

Для анализа эффективности указанного метода была разработана имитационная модель. Кратко опишем рассматриваемый сценарий ее использования.

Обе сети работают в режиме насыщения, то есть у каждой станции всегда есть данные для передачи, и число попыток передачи одного пакета не ограничено.

Длительность успешной передачи gNB с учетом всех РК-слотов и, быть может, интервала $t_0 < \delta$ (суммарной длительностью t) составляет T_l и соответствует значению $TXOP_{limit}$, определенному в спецификации [2]. А так

как каждый подкадр данных при передаче декодируется независимо, то можно считать, что незатронутая коллизией часть данных всегда успешно принимается. Так, обозначив за d_l объем данных, доставляемых gNB за время T_l , при отсутствии коллизий получим, что станция передаст $d_l(1 - t/T_l)$ Кбит.

В случае успешной передачи (ее длительность всегда равна $T_{w,s}$) STA передает d_w Кбит данных. Также будем считать, что в случае коллизии передача длится $T_{w,c} \ll T_{w,s}$ при использовании механизма RTS/CTS и $T_{w,c} \approx T_{w,s}$ в противном случае.

Если при коллизии ровно одной STA 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 эффект захвата срабатывает с вероятностью η .

Таблица 1: Значения параметров имитационной модели

Параметр	Значение
θ	500 мкс
δ	30 мкс
σ	9 мкс
$T_{w,s}$	2,5 мс
$T_{w,c}$	44 мкс при использовании механизма RTS/CTS; 2,5 мс в противном случае
T_l	8 мс
d_w	187,5 кбит
d_l	600 кбит
ξ	0,5
η	0,5
W_{min}	16
W_{max}	1024

Перейдем к результатам численного моделирования. Если не указано иное, в численных экспериментах используются значения параметров, указанные в таблице 1.

Для анализа эффективности предложенного метода рассмотрено два сценария. В сценарии 1 одинаковое число STA и gNB ($N_w = N_l$) и меняется суммарное число станций. В сценарии 2 суммарное число станций фиксировано ($N_l + N_w = 10$) и варьируется доля STA. В качестве базового подхода (БП) рассматривается метод LBT с резервирующим сигналом ($\phi = \xi = 1$). Остальные конфигурации модели обозначены как метод разрешения коллизий (МРК) с указанием параметра ϕ ($\phi = 0$ соответствует методу из [13]).

На рис. 1 и рис. 2 показаны пропускные способности обеих сетей в сценарии 1 с использованием механизма RTS/CTS и без него. Можно заметить, что независимо от параметров модели пропускная способность соговой се-

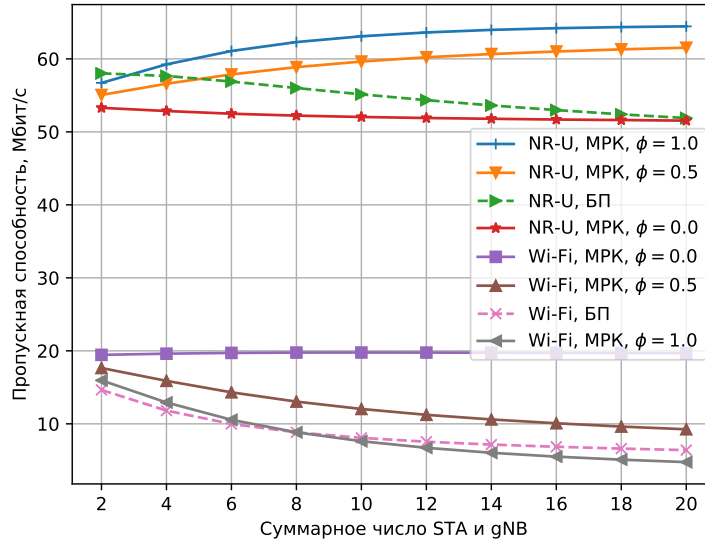


Рис. 1: Пропускная способность Wi-Fi сети и сети NR-U в сценарии 1 с RTS/CTS

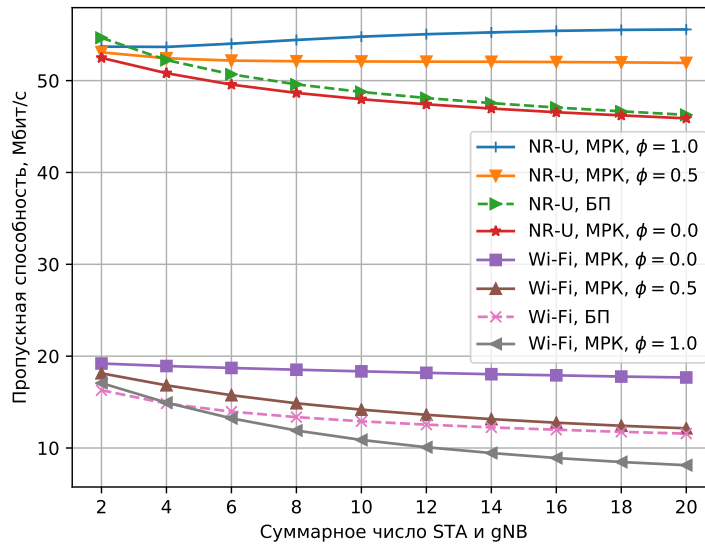


Рис. 2: Пропускная способность Wi-Fi сети и сети NR-U в сценарии 1 без RTS/CTS

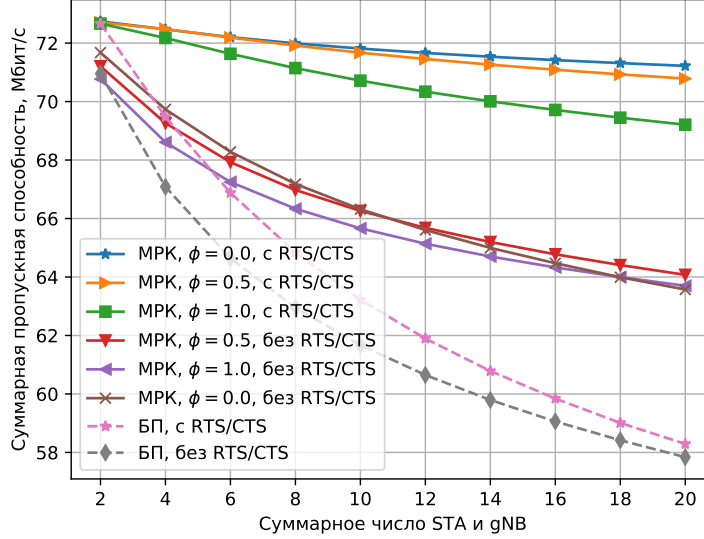


Рис. 3: Суммарная пропускная способность в сценарии 1

ти заметно больше пропускной способности беспроводной локальной сети. Более того, с ростом ϕ пропускная способность NR-U монотонно увеличивается, а Wi-Fi — монотонно уменьшается, так как при коллизии gNB реже детектирует передачи Wi-Fi. Интересно также отметить, что использование механизма RTS/CTS в МПК при $\phi > 0$ немного понижает пропускную способность сети Wi-Fi из-за асимметричных коллизий. Тем не менее, по суммарной пропускной способности (см. рис. 3) МПК превосходит БП для любого ϕ даже при небольшом числе станций.

Для анализа эффективности предложенного метода в сценарии 2 ($N_w + N_l = 10$) введем вспомогательные характеристики. Пусть G_w (G_l) — прирост пропускной способности S_w (S_l) сети Wi-Fi (NR-U), полученный при использовании МПК, 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 $S_{w,base}$ ($S_{l,base}$) — пропускная способность беспроводной локальной (отовой) сети при использовании БП.

Согласно полученным результатам, на эффективность МПК в сценарии 2 сильно влияет не только доля STA, но и параметр ϕ (см. рис. 4 и рис. 5).

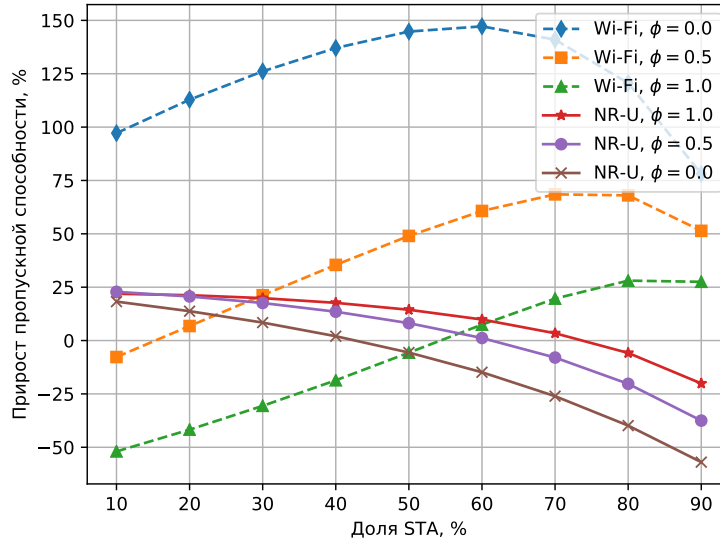


Рис. 4: Прирост пропускной способности при использовании МРК по отношению к БП в сценарии 2 с RTS/CTS

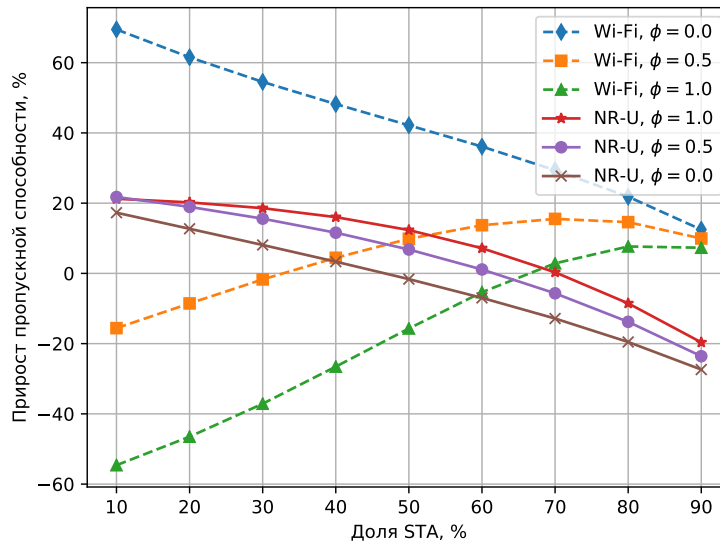


Рис. 5: Прирост пропускной способности при использовании МРК по отношению к БП в сценарии 2 без RTS/CTS

Например, для каждого значения ϕ есть области как положительного, так и отрицательно прироста G_l . Поэтому, в МРК можно добиться положительного прироста пропускной способности одновременно для обеих сетей по сравнению с БП уже при 30% gNB, в то время как при $\phi = 0$ для этого требовалось не менее 50% gNB от общего числа станций. Этого можно достичь за счет выбора оптимального значения $\phi = \phi_0$ по известному числу станций в каждой из сетей. Стоит отметить, что сделанные выводы справедливы независимо от использования механизма RTS/CTS устройствами Wi-Fi.

5 Заключение

В данной работе было предложено улучшение механизма разрешения коллизий для базовых станций NR-U, предложенного в [13]. В частности, теперь в первом РК-слоте gNB могут посылать резервирующий сигнал. Это позволяет чаще разрешать коллизии между gNB, а при коллизии STA и gNB — разрешить ее в пользу последней. Для анализа эффективности предложенного метода была разработана имитационная модель, с помощью которой была произведена оценка пропускной способности сетей NR-U и Wi-Fi при совместном существовании в одном частотном канале. Было показано, что предложенное улучшение метода разрешения коллизий позволяет значительно расширить область его применимости, в которой возможно одновременно повысить пропускную способность обеих сетей по сравнению с базовым подходом с резервирующим сигналом.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Li Li, James P Seymour, Leonard J Cimini, and Chien-Chung Shen. Coexistence of wi-fi and laa networks with adaptive energy detection. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(11):10384–10393, 2017.
4. 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 802.11e edca mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.
5. 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.
6. Zoraze Ali, Lorenza Giupponi, Josep Mangues-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.

7. 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.
8. 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.
9. Yuan Gao, Bolin Chen, Xiaoli Chu, and Jie Zhang. Resource allocation in lte-laa and wifi coexistence: A joint contention window optimization scheme. In *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6. IEEE, 2017.
10. 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.
11. 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.
12. Zhenzhou Tang, Xuesheng Zhou, Qimei Chen, Guanding Yu, Xiaoqiu 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.
13. В. А. Логинов. Исследование методов случайного доступа к общему каналу беспроводных локальных и сотовых сетей.
14. 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.