

Исследование метода разрешения коллизий в сетях NR-U при использовании многоканального доступа типа А

А.Ю. Троегубов^{*,**}, В.А. Логинов^{*}, А.И. Ляхов^{*}, Е.М. Хоров^{*}

^{*}Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

^{**}Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

Поступила в редколлегию 10.09.2022 г., Принята 13.12.2022 г.

Аннотация—Технология New Radio Unlicensed (NR-U), относящаяся к технологиям сотовой связи пятого поколения, позволяет базовым станциям использовать многоканальные передачи в нелицензируемой полосе частот, что представляет большой практический интерес. Однако одновременная работа нескольких операторов NR-U в одних и тех же частотных каналах приводит к увеличению числа коллизий в сети при получении доступа к нелицензируемому каналу. В работе исследуется эффективность метода разрешения коллизий, ранее предложенного для одноканальных передач, при использовании базовыми станциями многоканального метода доступа Type A, определенного в спецификации NR-U. Рассматриваются сценарии сосуществования двух операторов NR-U при различном выборе активных каналов. Проводится оценка нормированной пропускной способности сети и равномерности распределения канальных ресурсов между базовыми станциями операторов. Показано, что использование метода разрешения коллизий позволяет увеличить суммарную пропускную способность до 20% по сравнению со стандартным методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Многоканальный метод доступа, разрешение коллизий, Listen-Before-Talk, NR-U, Type A.

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_4_394

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология NR-U (англ.: New Radio Unlicensed) относится к технологиям сотовой связи пятого поколения и позволяет базовым станциям 5G (англ.: gNodeB, gNB), помимо лицензируемых каналов, использовать нелицензируемые частоты для передачи пользовательских данных [1, 2]. Хотя использование более широкой частотной полосы повышает пропускную способность сети, работа gNB в нелицензируемом диапазоне частот имеет ряд ограничений. Например, в странах Евросоюза в полосе 5 ГГц gNB для доступа к каналу должны использовать метод LBT (англ.: Listen-Before-Talk), основанный на механизме множественного доступа с прослушиванием несущей (CSMA, англ.: Carrier Sense Multiple Access) и процедурой двоичной экспоненциальной отсрочки [3]. Использование метода LBT приводит к коллизиям, что негативно сказывается на пропускной способности сети NR-U.

Одним из методов повышения производительности беспроводных сетей являются использование нескольких каналов [4]. Так, в спецификации NR-U [5] определены два многоканальных метода доступа в нелицензируемом диапазоне частот, Type A и Type B. Идея метода Type A состоит в том, что gNB независимо выполняет процедуру отсрочки в соответствии с методом LBT на каждом из доступных каналов. Напротив, при использовании метода Type B процедура отсрочки проводится только в одном канале, а для передачи gNB может использовать дополнительно те каналы, которые были свободны в течение короткого интервала времени непосредственно перед началом передачи.

В работе [6] было показано, что базовые станции предыдущего поколения при работе в нелицензируемом диапазоне частот обычно агрегируют три канала по 20 МГц. Более того, в техническом отчете 3GPP [7] рекомендуется при оценке эффективности работы сетей NR-U использовать сценарии с четырьмя нелицензируемыми каналами. Следовательно, рассмотрение сценариев с многоканальными передачами представляет практический интерес.

Кроме того, в [6] авторы указывают на то, что в одних и тех же частотных каналах могут работать разные операторы NR-U. Это приводит к увеличению числа коллизий в сети, что, как было показано в работе [8], может заметно снижать пропускную способность сетей NR-U и нивелировать эффект от использования более широкой частотной полосы.

В данной работе предлагается применить ранее разработанный метод разрешения коллизий gCR-LBT [9] для повышения эффективности сетей NR-U в многоканальном режиме. В частности, рассматриваются сценарии сосуществования двух операторов NR-U, в которых они используют метод Туре А в двух, трех или четырех частотных каналах. При помощи имитационного моделирования проводится оценка нормированной пропускной способности сетей обоих операторов и справедливости распределения канальных ресурсов между gNB операторов.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описываются методы доступа к каналу в сетях NR-U. Раздел 3 содержит обзор литературы. Краткое описание метода разрешения коллизий приведено в разделе 4. Рассматриваемые сценарии сосуществования описаны в разделе 5. В разделе 6 приведены параметры моделирования и используемые метрики. В разделе 7 описываются численные результаты. Раздел 8 содержит заключение.

2. МЕТОДЫ ДОСТУПА К КАНАЛУ В НЕЛИЦЕНЗИРУЕМОЙ ПОЛОСЕ В СЕТЯХ NR-U

Во многих странах одним из регуляторных требований для работы gNB в частотной полосе 5 ГГц является использование метода LBT [3], который устроен следующим образом. В начале gNB прослушивает канал в течение интервала времени T_d . Если канал свободен, то gNB переходит к процедуре отсрочки, а в противном случае ждет, пока канал будет непрерывно свободен в течение T_d . Затем gNB равновероятно выбирает целое число из отрезка $[0, W - 1]$ для инициализации счетчика отсрочки, где W — текущее значение конкурентного окна. Далее gNB уменьшает счетчик отсрочки на единицу каждый раз, когда канал свободен в течение интервала $\sigma = 9$ мкс. Если gNB обнаруживает, что канал занят, она замораживает счетчик отсрочки и возобновляет отсчет только после того, как канал снова будет свободен в течение интервала T_d .

Как только счетчик отсрочки достигает нуля, gNB может начать передачу. При этом максимальная длительность непрерывной передачи ограничена значением MCOT (англ.: Maximum Channel Occupancy Time). Аналогично лицензируемому каналу, передачи в нелицензируемой полосе частот разделяются на временные слоты, каждый из которых содержит по 14 OFDM-символов. Длительность временного слота определяется выбранной нумерологией [10].

Механизм HARQ-подтверждений позволяет динамически изменять значение конкурентного окна для уменьшения вероятности коллизий в сети [5]. Так, если доля отрицательных HARQ-подтверждений, относящихся к временным слотам в начале передачи, превышает определенный порог, то конкурентное окно удваивается вплоть до значения $W_{\max}$, а в противном случае передача считается успешной и конкурентное окно выставляется в минимальное значение, $W_{\min}$. Параметры метода LBT — T_d , $W_{\min}$, $W_{\max}$, MCOT — зависят от приоритета трафика (англ.: Priority Class, PC).

По умолчанию gNB может начать передачу данных только на границе временного слота, поэтому часто считается [10–12], что для удержания канала gNB посылает резервирующий сигнал (англ.: Reservation Signal, RS) до ближайшей границы временного слота. Однако в технологии NR-U, в отличие от технологии предыдущего поколения — LTE-LAA, есть возмож-

ность начинать передачу на границе OFDM-символов внутри временного слота. Первый слот в такой передаче называется мини-слотом и может содержать от 2 до 13 OFDM-символов. Использование передач в мини-слотах снижает накладные расходы на посылку резервирующего сигнала [10].

Для получения доступа к нескольким каналам gNB могут использовать один из двух методов, определенных в спецификации [5]. В данной работе исследуется метод Type A, устроенный следующим образом. gNB параллельно выполняет процедуры отсрочки согласно методу LBT в каждом из доступных каналов. Как только в одном из каналов завершается процедура отсрочки, gNB может сразу же начать в нем передачу. В зависимости от способа выбора начального значения счетчика отсрочки на разных каналах различают два подвида метода: Type A1 и Type A2. В первом случае для каждого канала счетчик отсрочки выбирается независимо, т.е. для i -го канала значение выбирается из отрезка $[0, W_i - 1]$, где W_i — значение конкурентного окна для i -го канала. Во втором случае все счетчики отсрочки инициализируются одним значением, случайно выбранным из отрезка $[0, W_M]$, где $W_M = \max_i W_i$, $i = \overline{0, c - 1}$, а c — число используемых каналов.

Из-за эффекта утечки мощности в соседние каналы gNB не может корректно определить занятость канала, если она передает в соседних с ним каналах [13, 14]. Поэтому, передача на нескольких каналах возможно только при условии, что либо процедуры отсрочки в них закончились одновременно, либо каналы сильно разнесены по частоте.

Одним из решений проблемы с утечкой мощности в соседние каналы является использование SD-интервала (англ.: Self-Deferral interval) [14]: после окончания процедуры отсрочки на одном из каналов gNB дополнительно откладывает передачу на этом канале на длительность SD-интервала, чтобы на других каналах также могли завершиться процедуры отсрочки. Затем, gNB может начать передачу на тех каналах, на которых счетчик отсрочки достиг нуля и которые были свободны в течение интервала T_{mc} непосредственно перед окончанием SD-интервала. Стоит отметить, что после SD-интервала число доступных для передачи каналов может как увеличиться, так и уменьшиться.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В последнее время технологии LTE-LAA и NR-U привлекают все больше внимания со стороны научного сообщества.

В работе [15] при помощи аналитического моделирования исследуется вопрос справедливости распределения канальных ресурсов согласно критерию 3GPP при сосуществовании сети NR-U и беспроводной локальной сети Wi-Fi. Вместо посылки резервирующего сигнала после окончания процедуры отсрочки gNB может просто ожидать границы временного слота и снова прослушать канал только непосредственно перед началом передачи. Данный подход при помощи аналитического и имитационного моделирования подробно изучается в работе [16]. В работе [17] предложен метод разрешения коллизий, который позволяет детектировать и разрешать коллизии как между gNB, так и между gNB и станциями Wi-Fi. В работе [9] данный метод был расширен на случай использования передач в мини-слотах. Стоит отметить, что во всех работах [9, 15–17] рассматривались сценарии сосуществования только одного оператора NR-U с сетями Wi-Fi только в одном канале.

Ряд исследований [18–20] посвящен математическому моделированию работы сотовых сетей в нескольких нелицензируемых каналах. В работе [18] разработана аналитическая модель для анализа производительности сети NR-U с учетом мощности передачи gNB и пользовательских устройств. Однако данная модель подходит только для сценариев с одной gNB, а более сложные случаи авторы рассматривают при помощи имитационного моделирования. В работе [19] разработана аналитическая модель для оценки пропускной способности сети NR-U

в сценариях сосуществования с сетями Wi-Fi на нескольких частотных каналах. При этом в обеих работах [18, 19] рассматривается только многоканальный метод Type B и только один оператор NR-U. В работе [20] предложена аналитическая модель для метода Type A, но в ней не учитывается эффект утечки мощности, и передачи в соседних каналах считаются независимыми.

В работе [13] авторы сравнивают пропускную способность сети NR-U при использовании различных многоканальных методов в зависимости от ширины полосы утечки мощности и числа доступных каналов. Показано, что использование SD-интервала при наличии в сети устройств других технологий, передающих насыщенный трафик, заметно уменьшает пропускную способность сетей NR-U. В работе [14] предлагаются различные методы выбора длительности SD-интервала для повышения производительности сотовых сетей.

Исследование [6] базовых станций предыдущего поколения, развернутых в городе Чикаго, показало, что для передачи данных базовые станции агрегируют не более трех нелицензируемых каналов, и в каждом канале могут работать базовые станции разных операторов. Таким образом, рассмотрение сценариев сосуществования операторов NR-U в нескольких частотных каналах в нелицензируемой полосе представляет практический интерес. В [8] были рассмотрены различные сценарии работы двух операторов NR-U в трех частотных каналах, когда каждый оператор использовал многоканальный метод Type B. Показано, что метод LBT с резервирующим сигналом приводит к коллизиям, которые снижают пропускную способность сети NR-U.

Определенный интерес представляют аналитические и имитационные исследования методов многоканальной передачи в сетях Wi-Fi 7 [21, 22] или транспортных сетях Wi-Fi [23]. Однако методы совместного использования нескольких каналов в сетях Wi-Fi существенно отличается от аналогичных методов сотовых сетей.

Исходя из выше сказанного, исследование эффективности метода разрешения коллизий gCR-LBT [9] при использовании многоканальных передач является актуальной задачей. В данной работе рассматриваются сценарии сосуществования двух операторов NR-U в четырех нелицензируемых каналах, когда каждый из операторов использует метод Type A1 в двух, трех или четырех каналах.

4. МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ

Метод gCR-LBT для одноканальных передач устроен следующим образом. После окончания процедуры отсрочки gNB всегда пытается разрешить потенциальную коллизию. Для этого gNB обрабатывает N_{sl} слотов разрешения коллизии (РК-слотов). В частности, в начале каждого РК-слота gNB посылает короткий резервирующий сигнал, а затем оставшуюся часть РК-слота она либо прослушивает канал, либо продолжает посылку резервирующего сигнала. Вероятность посылки резервирующего сигнала во второй части РК-слота равна ϕ для первого РК-слота и равна ξ для последующих РК-слотов. Если при прослушивании канала gNB обнаруживает, что он занят, она откладывает свою передачу и заново начинает процедуру отсрочки. Если gNB не отложила свою передачу после обработки всех РК-слотов, она может начать передачу данных на ближайшей границе временного слота (или OFDM-символа при использовании передач в мини-слотах). Подробнее метод gCR-LBT описан в [9].

При обобщении метода gCR-LBT на случай многоканальных передач необходимо учесть эффект утечки мощности в соседние каналы. Другими словами, gNB при обработке РК-слотов не может одновременно прослушивать среду на одном канале и передавать резервирующий сигнал на другом. Поэтому обобщим метод gCR-LBT следующим образом:

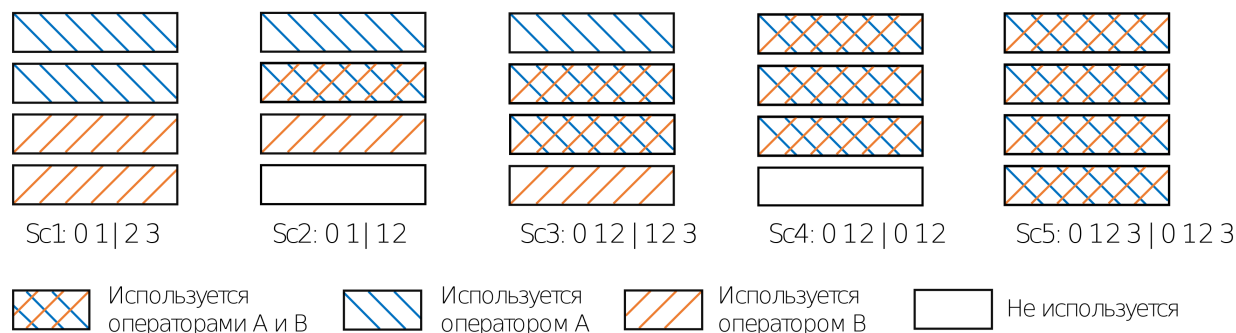


Рис. 1. Рассматриваемые сценарии сосуществования.

Таблица 1. Значения параметров методов LBT с PC и gCR-LBT, используемых при моделировании

Параметр	Значение
MCOT	8 мс
T_d	43 мкс
$W_{\min}$	16
$W_{\max}$	64
N_{st}	5
ϕ, ξ	0,5

- После окончания процедуры отсрочки вместо посылки резервирующего сигнала на каждом канале gNB применяет метод разрешения коллизий gCR-LBT;
- Решение gNB о том, передавать резервирующий сигнал или прослушивать канал во второй части текущего РК-слота, должно быть одинаковым для всех используемых каналов;
- Если при прослушивании gNB обнаруживает занятость канала, то она откладывает передачу только в этом канале. Кроме того, конкурентное окно изменяется, как если бы в данном канале произошла коллизия.

5. РАССМАТРИВАЕМЫЕ СЦЕНАРИИ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ

Рассматривается сосуществование двух сетей NR-U, принадлежащих разным операторам: в сети оператора А работают N_A gNB, а в сети оператора В — N_B gNB. Все gNB работают в режиме насыщения и находятся в зоне радиовидимости друг друга. Для передачи данных gNB может использовать несколько каналов шириной 20 МГц. Число используемых каналов и их взаимное расположение зависит от сценария сосуществования, см. рис.1. gNB обоих операторов используют многоканальный метод Type A1 без SD-интервала (так как gNB передают насыщенный трафик). Также будем считать, что, если gNB передает в одном из каналов, то она не может прослушивать другие каналы.

Для удобства сценарии сосуществования обозначаются как «Name: $A_1 \dots A_{C_A} | B_1 \dots B_{C_B}$ », где:

- Name — краткое название сценария сосуществования;
- C_A (C_B) — число каналов, используемых gNB оператора А (оператора В);
- $A_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ — номера каналов, используемых оператором А;
- $B_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ — номера каналов, используемых оператором В.

6. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТРИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ

Параметры методов LBT и gCR-LBT, используемые при моделировании, приведены в таблице 1. В численных экспериментах используется нумерология с длительностью временного слота 500 мкс с передачами в мини-слотах.

Эффективность работы сетей NR-U оценивается с помощью нескольких метрик. Измерения проводятся после достижения системой стационарного режима, а полученные результаты усредняются по 20 прогонам модели. Определим нормированную пропускную способность S_x сети оператора x ($x \in \{A, B\}$) как

$$S_x = \frac{\sum_{i=0}^{C_x-1} T_x^i}{T_{\text{sim}}}, \quad (1)$$

где T_x^i — суммарное время успешных передач данных всеми gNB оператора x в i -ом канале, T_{sim} — время проведения измерений. При использовании C_x каналов величина S_x лежит в интервале от 0 до C_x .

Прирост пропускной способности оператора x при использовании метода разрешения коллизий gCR-LBT относительно метода LBT с резервирующим сигналом (LBT с PC):

$$G_x = \frac{S_{x,gcr} - S_{x,rs}}{S_{x,rs}}, \quad (2)$$

и прирост суммарной пропускной способности обеих сетей:

$$G_{A,B} = \frac{S_{A,gcr} + S_{B,gcr} - S_{A,rs} - S_{B,rs}}{S_{A,rs} + S_{B,rs}}, \quad (3)$$

где $S_{x,rs}$ и $S_{x,gcr}$ — пропускная способность сети оператора x при использовании метода LBT с PC и gCR-LBT соответственно.

Распределение канальных ресурсов между операторами A и B назовем справедливым, если все gNB имеют одинаковую пропускную способность. Для оценки справедливости будем использовать метрику JFI (англ. Jain's fairness index, JFI) [24], посчитанную для gNB обоих операторов:

$$\text{JFI}_{A,B}(S_A^1, \dots, S_A^{N_A}, S_B^1, \dots, S_B^{N_B}) = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_A} S_A^i + \sum_{i=1}^{N_B} S_B^i \right)^2}{(N_A + N_B) \left(\sum_{i=1}^{N_A} (S_A^i)^2 + \sum_{i=1}^{N_B} (S_B^i)^2 \right)}, \quad (4)$$

где N_A (N_B) — число gNB в сети оператора A (оператора B), S_A^i (S_B^i) — нормированная пропускная способность i -ой gNB в сети оператора A (оператора B). Метрика JFI для k станций лежит в пределах от $1/k$ (худший случай) до 1 (лучший случай).

7. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перейдем к результатам имитационного моделирования. На рис. 2 приведена нормированная пропускная способность для сетей обоих операторов при $N_A = N_B = 5$ в различных сценариях. Сразу стоит отметить, что благодаря разрешению коллизий метод gCR-LBT обеспечивает прирост пропускной способности во всех сценариях сосуществования, который составляет до 20% для каждого оператора. Также видно, что пропускная способность в сценариях Sc2 и Sc4 заметно ниже, чем в сценариях Sc1, Sc3 и Sc5, так как в сценариях Sc3 и Sc4 операторы используют суммарно только три канала из четырех.

Более того, в сценариях Sc1, Sc3 и Sc5 при использовании метода LBT с PC наблюдается разная пропускная способность. Качественно это можно объяснить следующим образом. Пусть каждый канал одинаково используется всеми работающими в нем gNB, тогда во всех

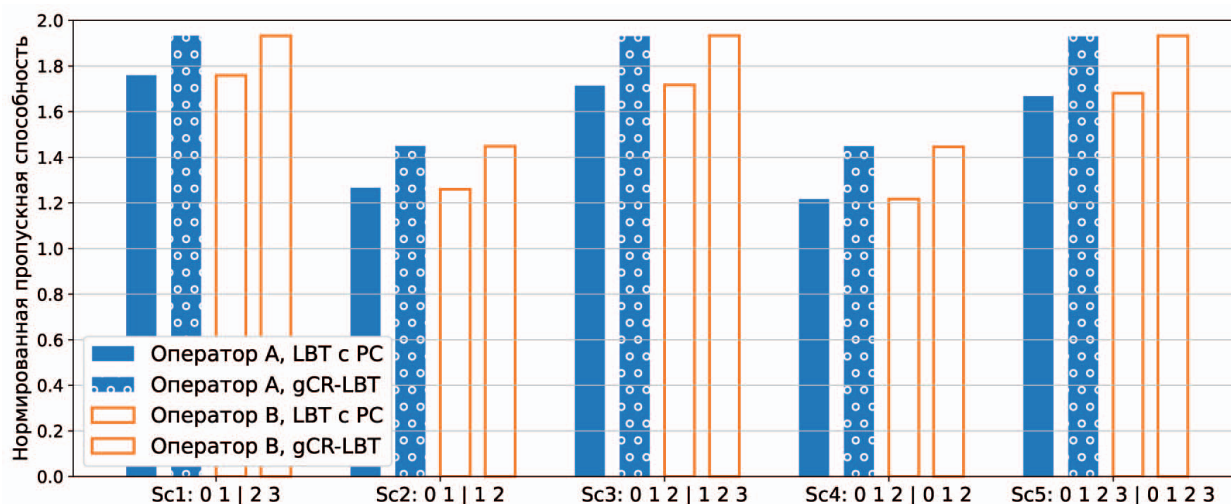


Рис. 2. Нормированная пропускная способность при использовании методов LBT с PC и gCR-LBT в различных сценариях сосуществования при равном количестве gNB у операторов ($N_A = N_B = 5$).

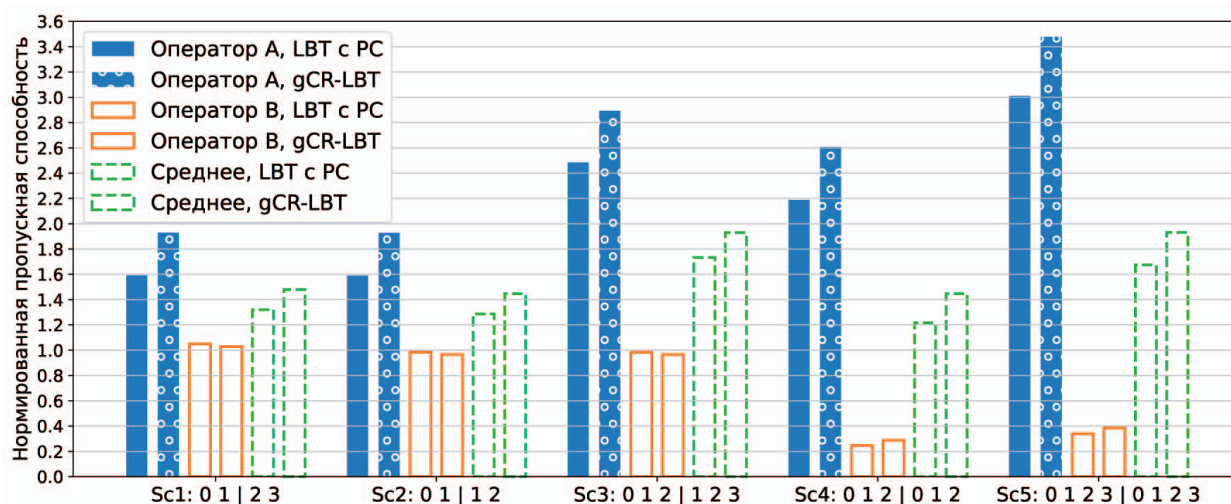


Рис. 3. Нормированная пропускная способность при использовании методов LBT с PC и gCR-LBT в различных сценариях сосуществования при разном количестве gNB у операторов ($N_A = 9$, $N_B = 1$).

трех сценариях на каждого оператора в среднем суммарно приходится одинаковое количество канального времени. Однако из-за наличия коллизий как между gNB одного оператора, так и между gNB разных операторов, пропускная способность снижается. В сценарии Sc5, где каналы обоих операторов полностью совпадают, происходит больше всего коллизий и поэтому там пропускная способность ниже, чем в сценариях Sc1 и Sc3. Аналогично, в сценарии Sc3 пропускная способность ниже, чем в сценарии Sc1. При этом за счет применения метода gCR-LBT можно успешно разрешать возникающие коллизии, что обеспечивает одинаково высокую пропускную способность в сценариях Sc1, Sc3 и Sc5.

Отметим, что из-за симметричного расположения каналов и одинакового числа gNB во всех сценариях у операторов наблюдается одинаковая пропускная способность, т.е. $JFI_{A,B} = 1,0$. Поэтому, для анализа справедливости распределения канальных ресурсов рассмотрим случай с разным числом станций у операторов.

Таблица 2. Прирост пропускной способности метода gCR-LBT относительно метода LBT с PC и значение метрики JFI в различных сценариях сосуществования ($N_A = 9$, $N_B = 1$)

Сценарий	G_A , %	G_B , %	$G_{A,B}$, %	JFI _{A,B} , LBT с PC	JFI _{A,B} , gCR-LBT
Sc1	21	-2,0	12	0,53	0,63
Sc2	21	-1,9	12	0,56	0,66
Sc3	17	-1,8	11	0,76	0,83
Sc4	19	17	19	1,00	1,00
Sc5	16	14	15	1,00	1,00

На рис. 3 приведена нормированная пропускная способность для сетей обоих операторов при $N_A = 9$ и $N_B = 1$ в различных сценариях, а в таблице 2 указаны значения прироста пропускной способности и метрики JFI. Сразу отметим, что метод gCR-LBT повышает пропускную способность сети оператора A во всех сценариях.

Однако при использовании метода gCR-LBT пропускная способность оператора B в сценариях Sc1, Sc2 и Sc3 уменьшается, что вызвано следующим. В сценарии Sc1 пропускная способность оператора B больше 1 благодаря многоканальным передачам и отсутствию коллизий. В таком случае использование метода gCR-LBT лишь увеличивает накладные расходы из-за наличия РК-слотов, что уменьшает пропускную способность по сравнению с методом LBT с PC. В сценариях Sc2 и Sc3 из-за сильно асимметричного числа gNB единственная gNB оператора B большую часть времени использует для передачи свободный от оператора A канал (канал 2 в сценарии Sc2 и канал 3 в сценарии Sc3). В этом канале также нет коллизий, поэтому аналогично сценарию Sc1 использование метода gCR-LBT только уменьшает пропускную способность. Также отметим, что при использовании метода gCR-LBT наблюдается более справедливое распределение канальных ресурсов в сценариях Sc1, Sc2 и Sc3 за счет повышения пропускной способности gNB оператора A.

Напротив, в сценариях Sc4 и Sc5 применение метода gCR-LBT приводит к повышению пропускной способности обеих сетей. В данных сценариях у оператора B нет отдельного канала, где бы его gNB могла передавать без коллизий, и прирост достигается за счет разрешения коллизий с gNB оператора A.

Хотя в сценариях Sc3 и Sc5 наблюдается наибольшая суммарная пропускная способность, распределение канальных ресурсов при неодинаковом числе gNB является справедливым только в сценариях Sc4 и Sc5, см. таблицу 2. Это связано с тем, что в данных сценариях у операторов все каналы общие.

Таким образом, наилучшим с точки зрения суммарной пропускной способности и справедливости распределения канальных ресурсов как при одинаковом числе gNB у операторов, так и при сильно отличающемся, является сценарий Sc5 при использовании метода gCR-LBT.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено несколько сценариев сосуществования двух операторов NR-U в четырех нелицензируемых каналах, когда все gNB используют многоканальный метод Type A1. При помощи имитационного моделирования проведено исследование эффективности стандартного метода LBT с резервирующим сигналом и метода разрешения коллизий gCR-LBT. Показано, что метод gCR-LBT обеспечивает прирост суммарной пропускной способности во всех рассмотренных сценариях, вплоть до 20%. Также на основании полученных результатов был определен наиболее оптимальный сценарий сосуществования двух операторов с точки зрения суммарной пропускной способности и справедливости распределения канальных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirzallah M., Krunz M., Kecioglu B., Hamzeh B. 5G new radio unlicensed: Challenges and evaluation. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 689–701.
2. Loginov V. A., Lyakhov A. I., Khorov E. M. Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA networks: Open issues. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 12, pp. 1530–1537.
3. Ho Q.D., Tweed D., Le-Ngoc T. Requirements and regulations in the 5 GHz unlicensed spectrum. *Long term evolution in unlicensed bands*, Springer, Cham, 2017, pp. 11–20.
4. Sathya V., Kala S. M., Rochman M.I., Ghosh M., Roy S. Standardization advances for cellular and Wi-Fi coexistence in the unlicensed 5 and 6 GHz bands. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 5–15.
5. Physical layer procedures for shared spectrum channel access. Document 3GPP, TS 37.213, version 16.7.0, 2021.
6. Sathya V., Rochman M.I., Ghosh M. Measurement-based coexistence studies of LAA & Wi-Fi deployments in Chicago. *IEEE Wireless Communications*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 136–143.
7. Study on NR-based access to unlicensed spectrum. Document 3GPP, TR 38.889, version 16.0.0, 2018.
8. Loginov V.A., Troegubov A.Yu., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Study of the multichannel access method in coexistence scenarios of two New Radio Unlicensed operators. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, vol. 67, no. 12, pp. 1521–1530.
9. Loginov V., Troegubov A., Lyakhov A., Khorov E. Enhanced Collision Resolution Methods With Mini-Slot Support for 5G NR-U. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 146137–146152.
10. Kosek-Szott K., Valvo A.L., Szott S., Gallo P., Tinnirello I. 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*, 2021, vol. 195, pp. 108188.
11. Loginov V., Lyakhov A., Zhdanovskiy V. Performance analysis of LBT with limited reservation signal duration for fair LTE-LAA/Wi-Fi coexistence. *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
12. Wszolek J., Ludyga S., Anzel W., Szott S. Revisiting LTE LAA: Channel Access, QoS, and Coexistence with WiFi. *IEEE Communications Magazine*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 91–97.
13. Zhdanovskiy V.D., Loginov V.A., Lyakhov A.I. A Study on the Impact of Out-of-Band Emissions on Performance of 5G New Radio-Unlicensed (NR-U) Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, vol. 66, no. 6, pp. 784–795.
14. Vu L.H., Yun J.H. Adaptive self-deferral for carrier aggregation of LTE-LAA with RF power leakage in unlicensed spectrum. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 89292–89305.
15. Kakkad Y., Patel D.K., Kavaia S., Sun S., Lopez-Benitez M. Optimal 3GPP Fairness Parameters in 5G NR Unlicensed (NR-U) and WiFi Coexistence. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022.
16. Szott S., Kosek-Szott K., Valvo A.L., Tinnirello I. Using self-deferral to achieve fairness between Wi-Fi and NR-U in downlink and uplink scenarios. *Computer Communications*, 2022, vol. 193, pp. 176–188.
17. Loginov V., Khorov E., Lyakhov A., Akyildiz I.F. CR-LBT: Listen-before-talk with collision resolution for 5G NR-U networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, vol. 21, no. 9, pp. 3138–3149.
18. Kushwaha H., Kotagi V.J., Murthy C.S.R. On the effects of transmit power control on multi carrier LAA-WiFi coexistence. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 656–667.
19. Ren Q., Zheng J., Wang B., Zhang Y. Performance Modeling of an NR-U and WiFi Coexistence System with NR-U Type B Multi-Channel Access Procedure. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022.
20. Tuladhar S., Cao L., Viswanathan R. Fair Coexistence of LAA and WiFi in Multi-Carrier LBT based on Joint Throughput and Airtime Fairness. *2021 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, IEEE, 2021, pp. 147–152.

21. Korolev N., Levitsky I., Startsev I., Bellalta B., Khorov E. Study of Multi-Link Channel Access Without Simultaneous Transmit and Receive in IEEE 802.11be Networks. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 126339–126351, 2022.
22. Korolev N., Levitsky I., Khorov E. Analytical Model of Multi-Link Operation in Saturated Heterogeneous Wi-Fi 7 Networks, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 12, pp. 2546–2549, Dec. 2022.
23. Torgunakov V., Loginov V., Khorov E. A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25514–25533, 2022.
24. Jain R.K., Chiu D.M.W., Hawe W.R. A quantitative measure of fairness and discrimination. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA, 1984, vol. 21.

Study of the Collision Resolution Method in New Radio Unlicensed Systems with the Multichannel Access of Type A

Troegubov A.Yu., Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M.

New Radio Unlicensed (NR-U), which belongs to 5G cellular technologies, allows base stations to use multichannel transmissions in an unlicensed frequency band, which is of practical interest. However, the simultaneous operation of several NR-U operators in the same frequency channels increases the number of collisions in the network when accessing an unlicensed channel. The paper studies the effectiveness of the collision resolution method, previously proposed for a single channel case, when base stations use the multichannel access method Type A defined in the NR-U specification. Coexistence scenarios of two NR-U operators with different combinations of operational channels are considered. An estimation of the normalized throughput and the uniformity of the distribution of channel resources between the base stations of operators is performed. The use of the collision resolution method increases the total throughput by up to 20% compared to the standard method.

KEYWORDS: Multichannel access method, collision resolution, Listen-Before-Talk, NR-U, Type A.