

Исследование многоканального метода доступа в сетях NR-U в сценариях совместного существования двух операторов

В.А. Логинов*, А.Ю. Троегубов*,**, 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 05.04.2022 г., Принята 22.05.2022 г.

Аннотация—Использование многоканальных передач позволяет существенно повысить производительность сетей NR-U. В спецификации NR-U описан метод доступа к множеству каналов, при использовании которого базовая станция выполняет процедуру отсрочки только в одном канале, называемом основным. Остальные каналы, называемые вторичными, прослушиваются непосредственно перед началом передачи данных. При сосуществовании разных операторов NR-U в одном частотном диапазоне это может приводить к неравномерному распределению канальных ресурсов между ними. В настоящей работе при помощи имитационного моделирования исследуются разные сценарии выбора основных и вторичных каналов двух операторов. Проводится оценка нормированной пропускной способности и равномерности распределения канальных ресурсов. Исходя из полученных результатов, предлагается улучшение многоканального метода, обеспечивающее равномерное распределение канальных ресурсов между операторами и высокую суммарную пропускную способность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Многоканальные методы доступа, имитационное моделирование, Listen Before Talk, NR-U.

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_141

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей для сотовых сетей пятого поколения (англ. Fifth Generation, 5G) является повышение пропускной способности. В качестве возможного решения рассматривается использование дополнительных частотных ресурсов, однако в силу ряда причин выделение новых частот в лицензируемой полосе затруднительно [1]. Поэтому консорциум 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project), разрабатывающий спецификации для технологий сотовой связи, предложил ряд решений, позволяющих сотовым сетям дополнительно использовать нелицензируемые частоты для передачи данных. Наиболее актуальной является технология NR-U (англ. New Radio Unlicensed), входящая в спецификации сотовых сетей пятого поколения.

Базовые станции NR-U (англ. Next Generation NodeB, gNB) могут работать в различных нелицензируемых диапазонах, в том числе в полосе 5 ГГц. Для данного диапазона во многих странах, например, в странах Евросоюза, установлен ряд регуляторных ограничений [2]. В частности, для доступа к каналу необходимо использовать метод Listen Before Talk (LBT), основанный на множественном доступе с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA).

Для кратного повышения пропускной способности в технологии NR-U можно одновременно использовать несколько каналов для передачи данных [3]. В спецификации определено два

многоканальных метода случайного доступа: Type A и Type B, у каждого из которых есть еще по две разновидности. При использовании метода Type A gNB независимо выполняет процедуру отсрочки, являющуюся частью метода LBT, в каждом из используемых при передаче данных каналов. Напротив, при использовании метода Type B процедура отсрочки выполняется только в одном канале, а остальные каналы прослушиваются непосредственно перед началом передачи.

В нескольких городах США операторы сотовой связи развернули сети, использующие технологию LTE-LAA, предшественницу NR-U для сетей 4G. Согласно проведенным исследованиям [4, 5] базовые станции LTE-LAA почти всегда используют несколько нелицензируемых каналов для передачи данных, а множества частотных каналов различных операторов могут пересекаться.

В большинстве работ [6–8], посвященных многоканальным передачам в LTE-LAA и NR-U, исследуются сценарии с одним оператором и большим количеством доступных каналов. Однако совместному существованию gNB различных операторов в условиях небольшого числа доступных каналов уделяется мало внимания, хотя такие сценарии значительно более реалистичны.

В настоящей работе исследуется совместное существование двух операторов NR-U при полном или частичном пересечении их частотных каналов при использовании многоканального метода доступа Type B, а именно — его разновидности Type B1, описанной в разделе 2.2. При помощи имитационного моделирования проводится оценка пропускной способности обеих сетей и равномерности распределения канальных ресурсов более чем в десяти различных сценариях. Показано, что в отдельных сценариях наблюдается проблема неравномерного распределения канальных ресурсов между операторами. Для ее решения в работе предлагается модификация метода Type B1, обеспечивающая равномерное распределения пропускной способности.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведены подробные описания одноканального метода LBT и многоканальных методов доступа. Обзор литературы представлен в разделе 3. Рассматриваемые сценарии детально описаны в разделе 4. Описание имитационной модели и используемых метрик приведено в разделе 5. Численные результаты обсуждаются в разделе 6. Раздел 7 содержит заключение.

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

В серии спецификаций 3GPP Release 16 в технологию New Radio была добавлена возможность работы gNB в нелицензируемых частотах в дополнение к уже используемым в настоящее время лицензируемым частотам. В этом случае канал в лицензируемой полосе используется для подключения устройства к сети и отправки различных служебных сообщений, а каналы в нелицензируемой полосе используются для передачи данных.

Далее в разделе 2.1 приводится описание метода доступа LBT при использовании одного канала, а в разделе 2.2 описаны многоканальные методы доступа.

2.1. Method Listen Before Talk

Базовые станции NR-U для доступа к каналу в нелицензируемой полосе частот используют метод Listen Before Talk, основанный на CSMA/CA. Перед передачей данных gNB прослушивает канал в течение $T_d = 16 + m\sigma$ мкс, где $\sigma = 9$ мкс — длительность слота отсрочки, а m — число слотов отсрочки, зависящее от приоритета трафика (англ. Priority Class, PC), см. Таблицу 1. Если канал свободен в течение интервала T_d , gNB переходит к процедуре отсрочки, иначе gNB ждет, пока канал освободится. В начале процедуры отсрочки gNB случайным об-

Таблица 1. Параметры метода доступа к каналу для разных приоритетов трафика в нисходящем канале

Приоритет	m	$W_{\min}$	$W_{\max}$	MCOT, мс
1	2	4	8	2
2	2	8	16	3
3	3	16	64	8
4	7	16	1024	8

Таблица 2. Гибкая нумерология в New Radio

Расстояние между поднесущими, кГц	Длительность θ одного слота, мкс
15	1000
30	500
60	250
120	125
240	62,5

разом выбирает значение счетчика отсрочки из отрезка $[0, W - 1]$, где W — текущее значение конкурентного окна. Минимальное и максимальное значения конкурентного окна зависят от класса трафика и обозначаются $W_{\min}$ и $W_{\max}$ соответственно. Далее gNB продолжает прослушивать канал и уменьшает счетчик отсрочки каждый раз, когда канал свободен в течение времени σ . Если gNB обнаруживает занятость канала, она замораживает счетчик отсрочки и возобновляет отсчет только после того, как канал будет снова свободен в течение интервала T_d .

Когда счетчик отсрочки достигает нуля, gNB может начать передачу. Она состоит из подкадров длительностью 1 мс, каждый подкадр разбит на временные слоты длительностью θ , содержащие по 14 OFDM-символов. Длительность временного слота определяется параметром, называемым нумерологией (англ. numerology) и задающим расстояние между поднесущими в OFDM-символе, см. Таблицу 2. В полосе 5 ГГц доступны нумерологии $\theta = 500$ мкс и $\theta = 1000$ мкс. Продолжительность непрерывного обмена данными между gNB и пользовательским устройством ограничена значением MCOT (англ. Maximum Channel Occupancy Time), зависящим от класса трафика, см. Таблицу 1.

Начальное значение конкурентного окна равно $W_{\min}$, и дальнейшее его изменение основано на механизме HARQ-подтверждений (англ. Hybrid Automatic Repeat Request Acknowledgement). Так, если при получении отрицательного HARQ-подтверждения конкурентное окно меньше максимального, то оно удваивается. После успешной передачи данных конкурентное окно становится равным $W_{\min}$.

В целях синхронизации с передачами в лицензируемой полосе при работе в нелицензируемом канале gNB должна соблюдать слотированную структуру передач, т.е. она может начать передачу только на границе временного слота. При этом в спецификации не регламентируется поведение gNB в интервале времени между окончанием процедуры отсрочки и следующей границей временного слота. Базовая станция может просто ожидать начала временного слота и снова прослушать канал непосредственно перед началом передачи. Данный метод может привести к нечестному распределению канальных ресурсов между gNB, если они отсчитывают временные слоты асинхронно, а также к занятию канала другими устройствами [9, 10]. В связи с этим обычно в литературе предполагают, что gNB посылает резервирующий сигнал от момента окончания процедуры отсрочки до ближайшей границы временного слота [6, 7, 11, 12].

Также в технологии NR-U, в отличие от технологии LTE-LAA, есть возможность начинать передачу данных на границе OFDM-символов внутри временного слота [11, 13]. Первый слот в такой передаче, называемый мини-слотом (англ. mini-slot), будет неполным и может содержать от 2 до 13 OFDM-символов. Передачи в мини-слотах снижают накладные расходы на

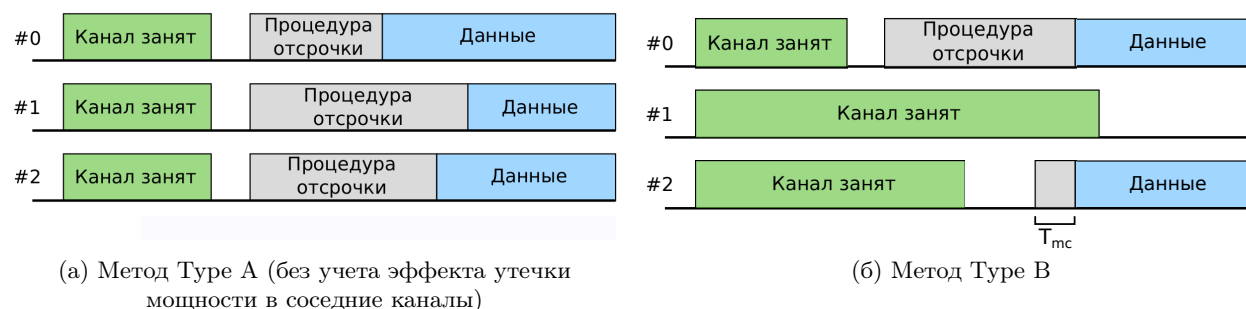


Рис. 1. Пример работы многоканальных методов доступа в NR-U

резервирующий сигнал, так как позволяют передавать данные почти сразу после окончания процедуры отсрочки [11].

2.2. Многоканальные методы доступа

В спецификации NR-U определено два метода случайного доступа к среде для многоканальных передач: Type A и Type B [14].

При использовании метода Type A gNB параллельно выполняет процедуру отсрочки во всех каналах, в которых она планирует передавать данные, см. рис. 1а. По способу выбора значения счетчика отсрочки различают две разновидности метода: Type A1 и Type A2. В методе Type A1 значения счетчиков отсрочки для всех каналов выбираются независимо. В методе Type A2 gNB устанавливает всем счетчикам отсрочки одинаковое значение, случайно выбранное из отрезка $[0, W_A]$, $W_A = \max_i W_i$, где W_i — значение конкурентного окна для i -го канала, $i = \overline{0, n-1}$, n — число используемых каналов. В обоих случаях после завершения передачи хотя бы в одном канале необходимо заново выбрать значения для всех счетчиков отсрочки.

Базовая станция может начать передачу в канале сразу после окончания в нем процедуры отсрочки. При этом одновременная передача в соседних каналах возможна только в случае, если соответствующие процедуры отсрочки завершились одновременно. Это происходит из-за эффекта утечки мощности в соседние каналы [7, 15–17]: при передаче данных в одном канале gNB не может правильно определить занятость соседних с ним каналов. Для решения данной проблемы в литературе было предложено ввести дополнительный интервал отсрочки (SD-интервал, англ. Self-deferral Interval) [17]. В частности, вместо того, чтобы начинать передачу данных в канале сразу после окончания процедуры отсрочки, gNB ожидает в течение SD-интервала окончания процедуры отсрочки на других каналах. По окончании SD-интервала для передачи данных gNB может использовать те каналы, на которых закончилась процедура отсрочки и которые были свободны в течение T_{mc} перед началом передачи. При правильном выборе длины SD-интервала эффективность метода Type A заметно повышается [16].

При использовании метода Type B gNB проводит процедуру отсрочки только в одном канале, называемом основным каналом (англ. primary channel). Остальные каналы называются вторичными (англ. secondary channel). Основной канал выбирается из каналов, в которых gNB планирует передавать данные, либо равновероятно перед каждой попыткой передачи данных, либо любым другим способом, например, основной канал может быть зафиксирован. В последнем случае менять основной канал разрешено не чаще одного раза в секунду [14].

Базовая станция передает данные в основном канале сразу после окончания процедуры отсрочки. Дополнительно можно использовать все вторичные каналы, которые были свободны

в течение как минимум интервала $T_{mc} = 25$ мкс непосредственно перед окончанием процедуры отсрочки в основном канале, см. рис. 16.

Аналогично методу Туре А для метода Туре В описано два варианта: Туре В1 и Туре В2. В методе Туре В1 gNB использует для всех каналов одно значение конкурентного окна, и его изменение основано на HARQ-подтверждениях (см. раздел 2.1), относящихся к передачам во всех каналах. В методе Туре В2 конкурентные окна поддерживаются для каждого канала, и их значения изменяются независимо.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В последнее время технологиям LTE-LAA и NR-U уделяется немало внимания. В работах [18–21] для оценки эффективности сетей LTE-LAA/NR-U применяется аналитическое моделирование. Так, в [18, 19] предложены аналитические модели для оценки пропускной способности станций LTE-LAA. Однако в обеих работах рассмотрен только сценарий с двумя каналами, а также не учитывается слотированная структура передач базовых станций. В [20] предложена аналитическая модель, учитывающая при оценке пропускной способности мощность передачи отдельных базовых станций и пользовательских устройств. Однако данная модель используется в сценарии с одной базовой станцией, а более сложные сценарии исследуются уже при помощи имитационного моделирования в сценарии с одним оператором. Аналитическая модель для произвольного числа используемых каналов в методе Туре А предложена в [21]. При этом авторы не учитывают эффект утечки мощности в соседние каналы, считая процедуры отсрочки во всех каналах полностью независимыми.

Ряд работ [6–8, 16, 22] посвящен имитационному моделированию работы сетей LTE-LAA и NR-U. В [16] предлагается несколько алгоритмов выбора длины SD-интервала для повышения пропускной способности сотовых сетей при условии, что все станции работают на одних и тех же частотных каналах. В [6, 7] авторы сравнивают эффективность различных вариантов методов Туре А и Туре В в зависимости от числа доступных каналов с учетом эффекта утечки мощности в соседние каналы и без него. Однако, в данных работах считается, что все станции работают в одних и тех же частотных каналах и могут агрегировать любое их количество (вплоть до 32). В [22] исследуется влияние случайной интерференции в канале на задержки в сети NR-U при использовании метода Туре А в двух частотных каналах. В работе [8] рассматривается гибридный метод доступа к нескольким каналам. При его использовании gNB разделяет множество доступных каналов на группы, между которыми отсутствует интерференция, и далее в каждой группе применяет метод Туре В. При этом оценка эффективности предложенного метода проводится в сценариях с как минимум 8 частотными каналами. Тем не менее, на практике базовые станции используют не более трех соседних каналов [4], а предложенный метод неэффективен для небольшого числа каналов. Во всех работах [6–8, 16, 22] рассматривается сценарий работы только одного оператора NR-U.

В работах [4, 5] проводилось исследование сетей LTE-LAA, развернутых мобильными операторами в городе Чикаго. Показано, что для передачи данных на нелицензируемых частотах базовые станции почти всегда используют три соседних частотных канала. Более того, частотные каналы различных операторов могут пересекаться, так как все три оператора работают в тех частях полосы 5 ГГц, на которые накладывается меньше регуляторных ограничений. Таким образом, на практике актуальность представляют сценарии совместной работы нескольких операторов NR-U при небольшом количестве доступных частотных каналов.

Из вышесказанного видно, что метод Туре А хорошо исследован в литературе [6, 7, 16, 21, 22]. Более того, его производительность сильно зависит от выбранных параметров (например, длительности SD-интервала). Поэтому, далее рассматривается только метод доступа Туре В, а именно — его разновидность Туре В1.

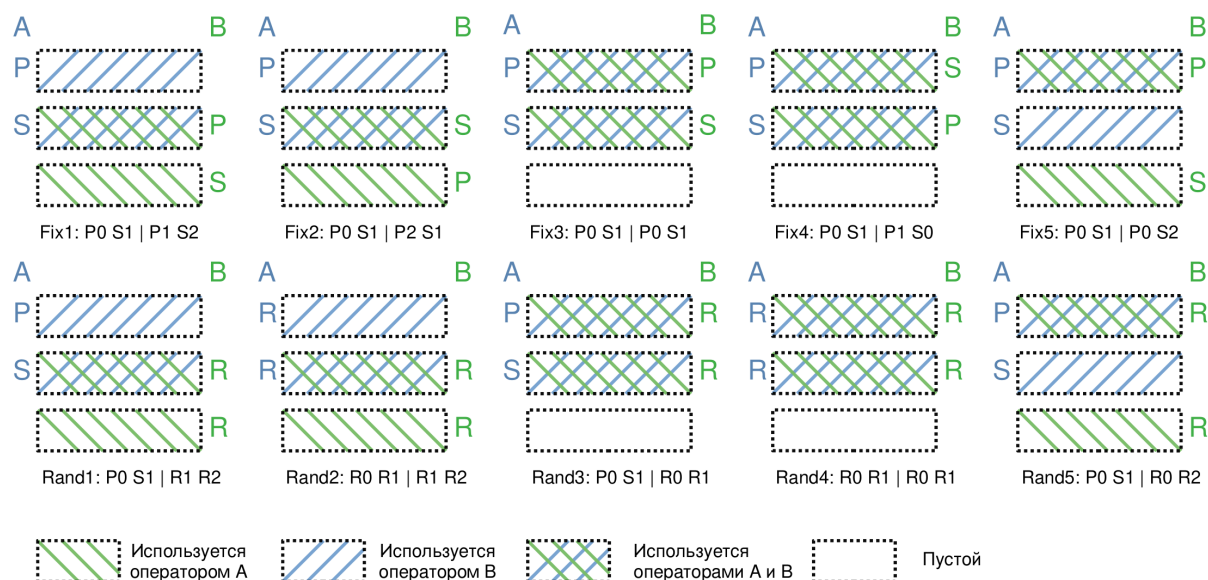


Рис. 2. Рассматриваемые сценарии работы операторов

Будем называть сценарием работы оператора NR-U множество используемых им каналов и метод выбора основного канала (см. раздел 4). В данной работе рассматриваются все возможные сценарии работы двух операторов NR-U в трех нелицензируемых каналах при условии, что каждая базовая станция может использовать только два канала из трех. В частности, при помощи имитационного моделирования исследовано влияние выбора основного канала в методе Type B1 каждым из операторов на производительность обеих сетей (см. раздел 4). На основании полученных результатов предложено простое, но эффективное улучшения метода Type B1 для повышения производительности сети NR-U.

4. ИССЛЕДУЕМЫЕ СЦЕНАРИИ

Рассматриваются две сети NR-U, принадлежащие разным операторам и включающие N_A gNB в сети оператора A и N_B gNB в сети оператора B. Все gNB находятся в зоне радиовидимости друг друга, и для работы им доступно $n = 3$ канала шириной 20 МГц. Базовые станции каждого оператора используют для передачи в режиме насыщения два канала из трех. Таким образом, множества каналов, на которых работают gNB разных операторов, либо совпадают, либо пересекаются по одному каналу. Для простоты рассматриваются передачи только в нисходящем канале.

Как уже было сказано, в данной работе рассматривается только метод Type B1. Для него исследуются два способа выбора основного канала: фиксированный и случайный. В первом случае основной канал для gNB задается один раз и далее не изменяется, а во втором случае он выбирается равновероятно перед каждой попыткой передачи. Метод выбора основного канала совпадает для всех gNB одного оператора, но может отличаться у разных операторов. Итого за счет способа выбора основного канала для операторов A и B получается 10 различных сценариев, см. рис. 2.

Для сценариев приняты обозначения «name : $XN \ XN \mid XN \ XN$ », где:

- name — краткое название сценария;
- $N \in \{0, 1, 2\}$ — номер канала;

— $X \in \{P, S, R\}$ означает, что данный канал: зафиксирован как основной (P), зафиксирован как вторичный (S) или входит в множество каналов, из которого перед каждой попыткой передачи случайным образом выбирается основной канал (R).

Сначала указываются каналы, используемые оператором А, а после черты «|» — оператором В.

Для наглядности также рассмотрим сценарии FixAll: $P0\ S1\ S2\ |\ P0\ S1\ S2$ (оба оператора используют все три канала¹) и Single: $P0\ |\ P1$ (каждый оператор работает отдельно в своем канале).

5. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И МЕТРИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ

Исследование выполняется при помощи имитационного моделирования. Имитационная модель основана на библиотеке для дискретно-событийного моделирования SimPy [23]. В численных экспериментах используются параметры метода LBT для приоритета трафика РСЗ (см. Таблицу 1) в нумерологии с длительностью временного слота $\theta = 500$ мкс с передачами в мини-слотах.

Для оценки производительности сетей используются следующие метрики. Нормированная пропускная способность S_x сети оператора x ($x \in \{A, B\}$):

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

где T_x^i — суммарное время успешной передачи данных gNB оператора x в i -ом канале, T_{sim} — время моделирования. Отметим, что при использовании n каналов $0 \leq S_x \leq n$.

Будем считать распределение канальных ресурсов между gNB справедливым, если все gNB имеют одинаковую пропускную способность. Справедливое распределение канальных ресурсов между gNB необходимо для эффективного сосуществования двух операторов. Для отслеживания равномерности распределения ресурсов будем использовать показатель справедливости (англ. Jain's fairness index, JFI) [24], посчитанный для станций обоих операторов:

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

где N_x — число gNB в сети оператора $x \in \{A, B\}$, S_x^i — нормированная пропускная способность gNB i в сети оператора x . Отметим, что показатель справедливости для k станций лежит в пределах от $1/k$ (худший случай, все ресурсы получила одна станция) до 1 (лучший случай, все станции получили одинаковое количество ресурсов).

Также отметим, что в рассматриваемых сценариях gNB одного оператора используют один и тот же способ выбора основного канала. Поэтому распределение ресурсов между ними будет заведомо равномерным, и считать метрику JFI отдельно для станций одного оператора не имеет смысла.

6. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перейдем к рассмотрению сценариев, указанных в разделе 4. Если не указано иное, в численных экспериментах используется время моделирования $T_{\text{sim}} = 100$ с, и результаты усред-

¹ В данном сценарии при отсутствии скрытых станций, совпадении параметров метода LBT и полном пересечении используемых каналов нет разницы, какой канал выбрать основным, так как передачи всех станций во всех каналах будут синхронизированы

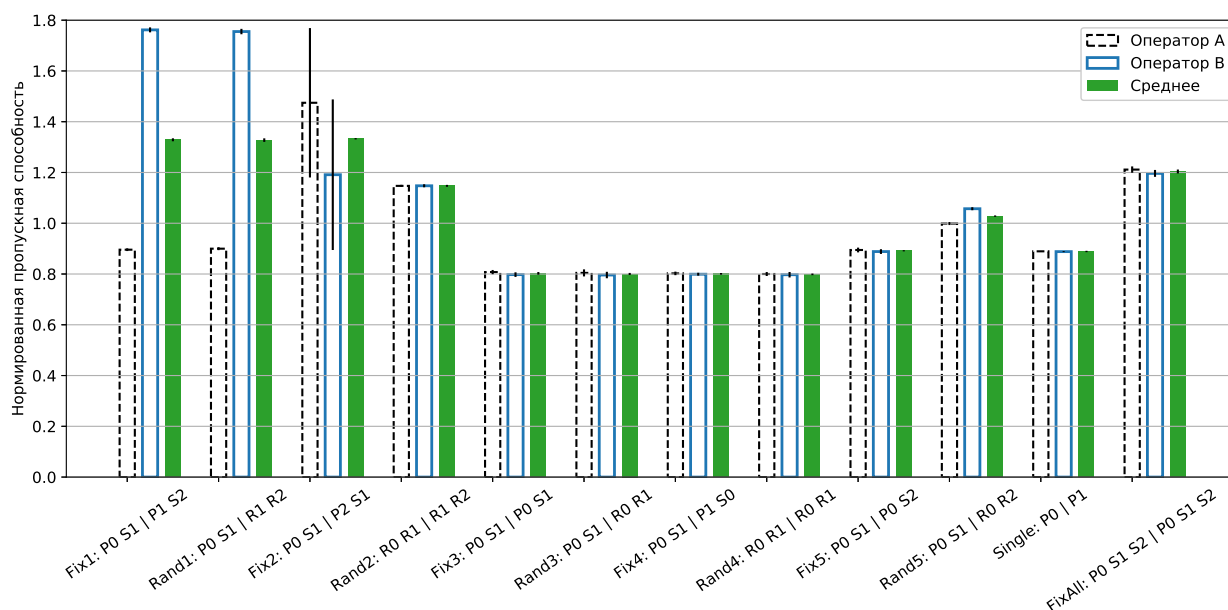


Рис. 3. Нормированная пропускная способность для сетей операторов А и В в различных сценариях, $N_A = N_B = 3$

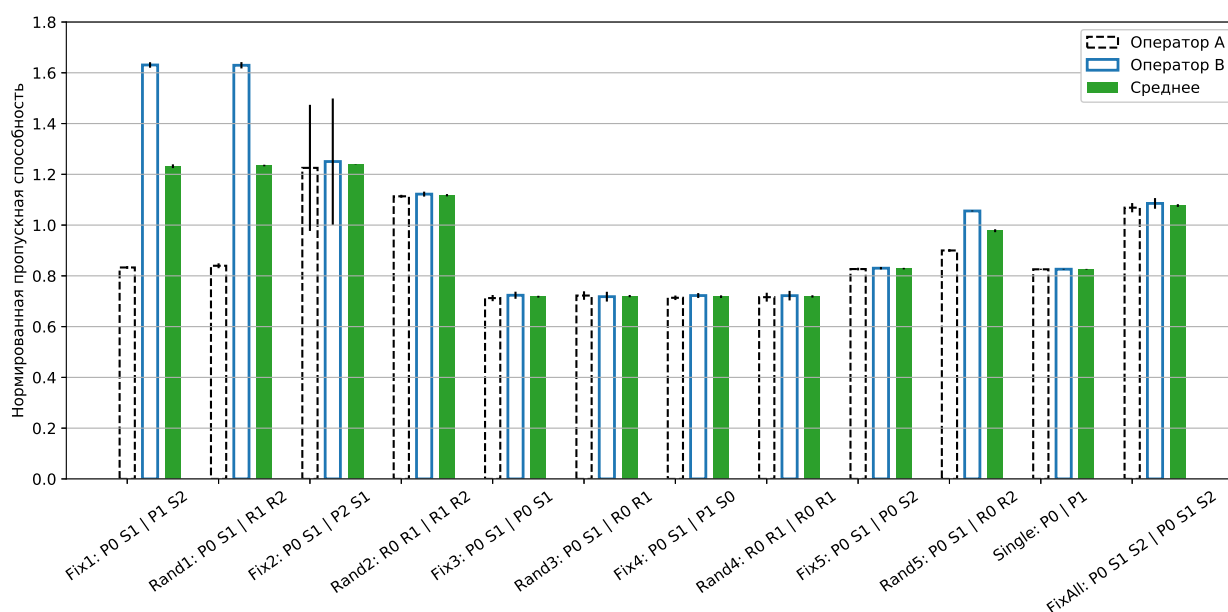


Рис. 4. Нормированная пропускная способность для сетей операторов А и В в различных сценариях, $N_A = N_B = 5$

няются по пяти прогонам модели. На рис. 3 и 4 приведена нормированная пропускная способность для сетей обоих операторов, когда в каждой сети по 3 и 5 gNB соответственно. Видно, что при одинаковом числе gNB у каждого оператора их суммарное число качественно не влияет на полученные результаты. Отметим, что из-за коллизий даже в сценарии Single пропускная способность обеих сетей меньше 1. По этой же причине пропускная способность для сетей с 5 gNB всегда ниже, чем для сетей с 3 gNB в тех же самых сценариях.

Таблица 3. Значение метрики $JFI_{A,B}$ в различных сценариях, $N_A = N_B \equiv N$

Сценарий	N	$JFI_{A,B}$	N	$JFI_{A,B}$
Fix1	3	0.90	5	0.90
Rand1	3	0.91	5	0.91
Fix2	3	0.94	5	0.96
Rand2	3	1.00	5	1.00
Fix3	3	1.00	5	1.00
Rand3	3	1.00	5	1.00
Fix4	3	1.00	5	1.00
Rand4	3	1.00	5	1.00
Fix5	3	1.00	5	1.00
Rand5	3	0.99	5	0.99
Single	3	1.00	5	1.00
FixAll	3	1.00	5	1.00

В сценариях Fix3, Rand3, Fix4 и Rand4 наблюдается наименьшая пропускная способность. В них частотные каналы обоих операторов совпадают, а один канал вообще не используется. Это приводит к увеличению числа коллизий по сравнению со сценарием Single и уменьшению пропускной способности несмотря на использование каждым оператором более широкой частотной полосы. В сценарии FixAll пропускная способность примерно в 1,5 раза выше, чем в сценариях Fix3/Fix4, так как при том же числе коллизий gNB используют три канала вместо двух.

В сценарии Fix5, где у обоих операторов совпадают только основные каналы, наблюдается значение пропускной способности, близкое к полученному в сценарии Single. При занятом основном канале gNB не может передавать во вторичном канале, даже если он свободен. Таким образом, gNB каждого оператора передают данные примерно в два раза реже, но для передачи всегда используют два канала. Также отметим, что в данном сценарии наблюдается прирост пропускной способности относительно сценариев Fix3/Fix4. Это объясняется тем, что когда передачи разных операторов попадают в коллизию в общем основном канале, данные в соответствующих вторичных каналах передаются успешно.

В сценарии Rand5 наблюдается небольшое различие пропускных способностей операторов, что вызвано следующим. Часть gNB оператора B выбирают канал 0 в качестве основного и в нем повышается вероятность коллизий. В то же время оставшиеся gNB оператора B выбирают канал 2 в качестве основного, в котором нет gNB оператора A, и, как следствие, они могут передавать в нем независимо от gNB оператора A. Сценарии Fix3, Rand3, Fix4, Rand4, Fix5 и Rand5 далее рассматривать не будем из-за низкой пропускной способности.

В сценариях Fix1, Fix2 и Rand1 наблюдается наибольшая суммарная пропускная способность, однако в них возникает несправедливое распределение канальных ресурсов. В Таблице 3 приведено значение метрики $JFI_{A,B}$ для рассматриваемых сценариев, подсчитанной за все время моделирования. Видно, что в большинстве сценариев метрика $JFI_{A,B}$ близка к 1, в то время как в сценариях Fix1, Fix2 и Rand1 она заметно отличается от 1. Это объясняется эффектом захвата канала [25, 26]. В рассматриваемых сценариях он проявляется в том, что в течение продолжительного интервала времени, сравнимого с T_{sim} , в канале 1 передают gNB только одного оператора.

В сценарии Fix2 эффект захвата канала вызван тем, что из-за большой длительности передачи NR-U и независимости основных каналов происходит рассинхронизация передач gNB разных операторов. Поэтому, когда один оператор завершает передачу данных в общем вторичном канале, основной канал другого оператора обычно занят, и его gNB не могут получить доступ к освободившемуся вторичному каналу. Похожий эффект наблюдается и в сценарии Fix1. В нем эффект захвата канала приводит к тому, что gNB оператора A почти всегда пе-

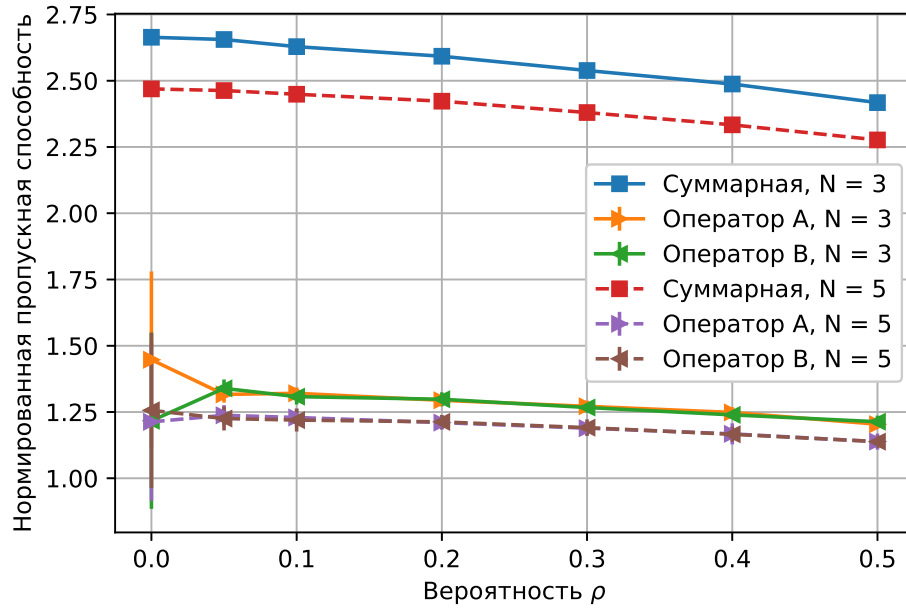


Рис. 5. Зависимость суммарной пропускной способности от параметра ρ метода Туре B1(ρ) в сценарии Fix2, $N_A = N_B \equiv N$,

редают только в своем основном канале, в то время как gNB оператора В используют для передачи данных оба канала.

В сценарии Rand1 в зависимости от выбора оператором В основного канала получается пересечение множеств каналов, как в сценарии Fix1 или Fix2, которые уже рассмотрены выше. В сценарии Rand2 операторы используют все три канала, поэтому в нем пропускная способность выше, чем в сценариях Fix3/Fix4. Более того, в данном сценарии, в отличие от других сценариев с тремя каналами (Fix1, Fix2, Rand2), наблюдается равномерное распределение канальных ресурсов между операторами, так как gNB обоих операторов выбирают основной канал случайным образом.

Эффект захвата канала приводит к краткосрочно несправедливому распределению канальных ресурсов (англ. short term unfairness), что увеличивает задержки доступа в сети. Для решения проблемы с краткосрочной несправедливостью в данной работе предлагается улучшение метода Туре B1. При его использовании gNB с вероятностью ρ не использует вторичный канал для передачи данных, т.е. передает только в основном канале ($\rho = 0$ соответствует исходному методу Туре B1). Далее данный метод обозначается как Туре B1(ρ).

Эффективность предложенного улучшения продемонстрируем на примере сценария Fix2, так как в нем наблюдается одна из самых высоких суммарных пропускных способностей. Параметр ρ подберем исходя из оценки суммарной пропускной способности сетей и краткосрочной справедливости распределения пропускной способности между gNB разных операторов.

На рис. 5 приведена зависимость пропускной способности обоих операторов от параметра ρ в сценарии Fix2 при использовании метода Туре B1(ρ). С увеличением значения параметра ρ суммарная пропускная способность уменьшается, так как возрастает вероятность того, что gNB сразу обоих операторов решат не передавать в свободном вторичном канале.

Как и в работах [27, 28], для оценки краткосрочной справедливости распределения канальных ресурсов будет использоваться метрика $JFI_{A,B}$, посчитанная в окне наблюдения разной длительности. На рис. 6 приведена зависимость метрики $JFI_{A,B}$ от размера T_{win} окна наблюдения для сценариев с наибольшей пропускной способностью, а также для сценария Fix2 при

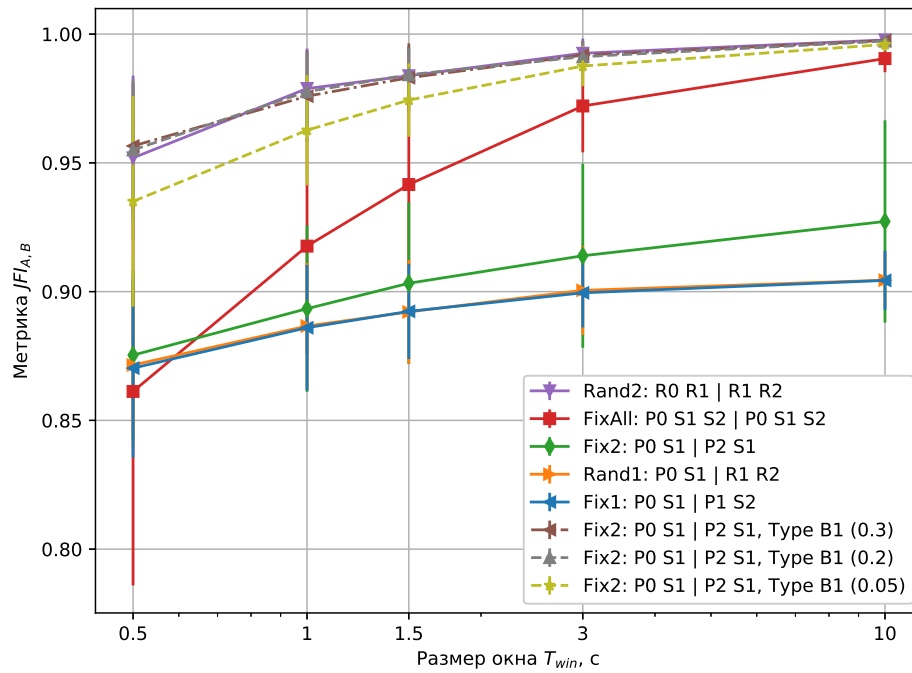


Рис. 6. Зависимость метрики $JFI_{A,B}$ от длительности окна наблюдения в различных сценариях, $N_A = N_B = 3$

использовании метода Type B1(ρ). Измерения проводились после достижения системой стационарного режима, а полученные результаты усреднялись по 20 прогонам, т.е. в выражении (1) T_x^i отсчитывалось от момента достижения стационарного режима, а вместо T_{sim} использовалось T_{win} .

Видно, что даже при маленьком значении параметра ρ метрика $JFI_{A,B}$ улучшается по сравнению со сценарием Fix2, в котором не используется метод Type B1(ρ). При $\rho = 0,2$ метрика $JFI_{A,B}$ получается такой же, как и в сценарии Rand2. Дальнейшее увеличение ρ не приводит к улучшению метрики $JFI_{A,B}$, но при этом снижает суммарную пропускную способность (см. рис. 5), поэтому далее используется $\rho = 0,2$.

Наконец, сравним метод Type B1(ρ) в сценарии Fix2 при $\rho = 0,2$ с методом Type B1 в других сценариях. На рис. 7 приведена нормированная пропускная способность для каждого оператора и средняя пропускная способность между операторами. Видно, что использование предложенного метода Type B1(ρ) почти не меняет суммарную пропускную способность в сценарии Fix2. Более того, предложенный метод обеспечивает справедливое распределение канальных ресурсов как в сценарии Rand2, достигая при этом более высокой пропускной способности. Более того, пропускная способность для сетей обоих операторов выше, чем при использовании трех каналов в сценарии FixAll.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была рассмотрена работа двух сетей NR-U, принадлежащих разным операторам. Исследованы все возможные сценарии использования двумя операторами двух частотных каналов из трех доступных при использовании многоканального метода доступа Type B1. При помощи имитационного моделирования продемонстрировано, что пропускная способность обеих сетей сильно зависит от способа выбора основного канала и взаимного расположения основных каналов у разных операторов. Например, если оба оператора работают в одних и тех

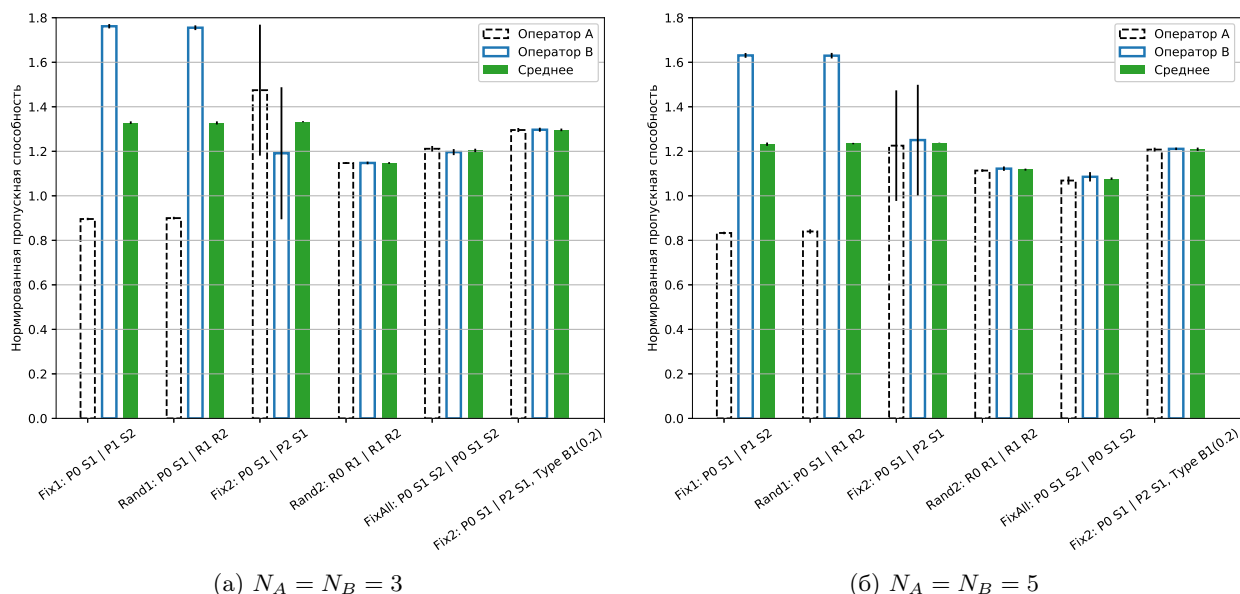


Рис. 7. Сравнение нормированной пропускной способности при использовании метода Type B1(ρ) в сценарии Fix2 с другими сценариями

же каналах, то использование многоканальных передач только ухудшает производительность сетей по сравнению со случаем, когда каждый оператор работает в отдельном канале. В то же время, если у операторов пересекаются только вторичные каналы, суммарная пропускная способность выше, чем если бы оба оператора передавали данные во всех трех каналах.

Исходя из полученных результатов, в работе были определены сценарии расположения двух частотных каналов разных операторов, обеспечивающие наибольшую суммарную пропускную способность. В этих сценариях наблюдалась проблема неравномерного распределения канальных ресурсов между операторами. Для ее решения было предложено улучшение метода Type B1. На примере одного из сценариев продемонстрировано, что предложенное улучшение обеспечивает одинаковую нормированную пропускную способность для обоих операторов почти без изменения суммарной пропускной способности.

Дальнейшее исследование может включать рассмотрение сценариев сосуществования операторов NR-U при использовании не только разных способов выбора основного канала, но и отличающихся методов доступа к каналу, например, метода разрешения коллизий [29, 30] или ожидания начала передачи без послышки резервирующего сигнала [9, 10]. Также представляет интерес рассмотрение сценариев совместного существования операторов NR-U в нескольких каналах при наличии устройств Wi-Fi.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sathya V. et al. Standardization advances for cellular and Wi-Fi coexistence in the unlicensed 5 and 6 GHz bands //GetMobile: Mobile Computing and Communications. — 2020. — Т. 24. — №. 1. — С. 5-15.
2. 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. — С. 11-20.
3. Zheng B. et al. Design of multi-carrier LBT for LAA& WiFi coexistence in unlicensed spectrum //IEEE Network. — 2019. — Т. 34. — №. 1. — С. 76-83.
4. Sathya V., Rochman M. I., Ghosh M. Measurement-based coexistence studies of LAA & Wi-Fi deployments in Chicago //IEEE Wireless Communications. — 2020. — Т. 28. — №. 1. — С. 136-143.

5. Sathya V., Rochman M. I., Ghosh M. Hidden-nodes in coexisting LAA & Wi-Fi: a measurement study of real deployments //2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). — IEEE, 2021. — С. 1-7.
6. Zhdanovskiy V. et al. A comparative study on multi-channel access methods in 5G NR-U networks //2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). — IEEE, 2020. — С. 1-6.
7. 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. — Т. 66. — №. 6. — С. 784-795.
8. Vu L. H., Yun J. H. Multi-carrier listen before talk with power leakage awareness for LTE-LAA in unlicensed spectrum //IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. — 2019. — Т. 5. — №. 3. — С. 678-689.
9. Tinnirello I. et al. No Reservations Required: Achieving Fairness between Wi-Fi and NR-U with Self-Deferral Only //Proceedings of the 24th International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. — 2021. — С. 115-124.
10. Zajac M., Szott S. Resolving 5G NR-U Contention for Gap-based Channel Access in Shared Sub-7 GHz Bands //IEEE Access. — 2022.
11. Kosek-Szott K. et al. 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. — Т. 195. — С. 108188.
12. Kutsevol P. et al. Analytical study of license-assisted access in 5G networks //2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking). — IEEE, 2019. — С. 1-9.
13. Naik G. et al. Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges //IEEE Access. — 2020. — Т. 8. — С. 153027-153056.
14. 3GPP. Physical layer procedures for shared spectrum channel access — Technical specification (TS) — 37.213 — Version 16.7.0, 2021.
15. Levitsky I., Okatev Y., Khorov E. Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11 be networks //2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). — IEEE, 2020. — С. 1-4.
16. 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. — Т. 7. — С. 89292-89305.
17. 3GPP R1-152784: Multi-carrier LBT operation for LAA, Qualcomm Incorporated, Tech. Rep., May 2015.
18. Wang S., Cui Q., Gu Y. Performance analysis of multi-carrier LAA and Wi-Fi coexistence in unlicensed spectrum //2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). — IEEE, 2017. — С. 1-5.
19. Tuladhar S., Cao L., Viswanathan R. Markov Chain Based Performance Analysis of LAA and WiFi Coexistence in Dual Carrier Aggregation //2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). — IEEE, 2019. — С. 504-508.
20. Kushwaha H., Kotagi V., Murthy S. R. On the Effects of Transmit Power Control on Multi Carrier LAA-WiFi Coexistence //IEEE Transactions on Sustainable Computing. — 2021.
21. 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. — С. 147-152.
22. Maldonado R., Rosa C., Pedersen K. I. Multi-link Techniques for New Radio-Unlicensed URLLC in Hostile Environments //2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). — IEEE, 2021. — С. 1-6.

23. Matloff N. Introduction to discrete-event simulation and the simpy language //Davis, CA. Dept of Computer Science. University of California at Davis. Retrieved on August. — 2008. — Т. 2. — №. 2009. — С. 1-33.
24. Jain R. K. et al. A quantitative measure of fairness and discrimination //Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA. — 1984. — Т. 21.
25. Vishnevsky V. M., Lyakhov A. I. IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration //Cluster Computing. — 2002. — Т. 5. — №. 2. — С. 133-144.
26. Krasilov A. Physical model based interference classification and analysis //International Workshop on Multiple Access Communications. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. — С. 1-12.
27. Koksai C. E., Kassab H., Balakrishnan H. An analysis of short-term fairness in wireless media access protocols //Proceedings of the 2000 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems. — 2000. — С. 118-119.
28. Berger-Sabbatel G. et al. Short-term fairness of 802.11 networks with several hosts //IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks. — Springer, Boston, MA, 2004. — С. 263-274.
29. Loginov V. et al. CR-LBT: Listen-before-talk with collision resolution for 5G NR-U networks //IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2021.
30. Loginov V. et al. Enhanced Collision Resolution Methods With Mini-Slot Support for 5G NR-U //IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 146137-146152.

Study of Multichannel Access Method in Coexistence Scenarios of Two NR-U Operators

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

The use of multichannel transmissions significantly improves the performance of NR-U networks. The NR-U specification describes a multichannel access method, using which a base station performs a backoff procedure only in one channel called primary channel. Other channels are called secondary channels and sensed immediately before data transmission. In coexistence scenarios of several NR-U operators in the same frequency band, this may result in asymmetrical distribution of channel resources among operators. In this paper, with simulation, different options of selecting primary and secondary channels of two operators are studied. Normalized throughput and equality of channel resources sharing are estimated. Based on the results obtained, an enhancement of the multichannel access method is proposed to provide equal distribution of channel resources between operators and high total throughput.

KEYWORDS: Multichannel access methods, simulation, Listen Before Talk, NR-U.