

Исследование влияния внеполосного излучения на производительность сетей 5G NR-U¹

В.Д. Ждановский^{*,**}, В.А. Логинов^{*,***}, А.И. Ляхов^{*,**}

^{*} Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

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

^{***} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Поступила в редколлегию 20.07.2020 г.

Аннотация—NR-U — технология, позволяющая сотовым сетям пятого поколения использовать нелицензируемые частотные диапазоны, в частности, диапазон 5 ГГц. Для повышения пропускной способности базовая станция NR-U (англ. gNodeB, gNB) может одновременно использовать несколько частотных каналов, находящихся в данном диапазоне. Однако gNB не всегда может передавать в одном канале и одновременно выполнять процедуру доступа в другом канале из-за проблемы внеполосного излучения, которая может приводить к недоиспользованию канальных ресурсов. Как результат, пропускная способность сетей NR-U может сильно зависеть от значения мощности, излучаемой при передаче в соседние каналы. В настоящей работе при помощи имитационного моделирования исследуется влияние внеполосного излучения на производительность NR-U при использовании всех описанных в спецификации NR-U методов доступа. Показывается, что значения мощности, излучаемой при передаче в соседние каналы, влияют на выбор оптимального по пропускной способности метода доступа. Также показывается, что внеполосное излучение не всегда отрицательно влияет на производительность NR-U, и в некоторых случаях оно позволяет добиться прироста пропускной способности более чем на 30%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: NR-U, Wi-Fi, совместное существование, методы доступа к каналу, внеполосное излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительный рост требований к пропускной способности сотовых сетей. Лицензируемых частотных диапазонов, традиционно используемых в сотовых сетях, оказывается недостаточно для удовлетворения возросших требований. В связи с этим консорциум 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project), занимающийся стандартизацией сотовых сетей, разработал несколько технологий, позволяющих сотовым сетям использовать нелицензируемые частотные диапазоны [1, 2]. В частности, наиболее современной технологией, применяющейся в сетях пятого поколения, является NR-U (англ. New Radio-Unlicensed).

Устройства, использующие технологию NR-U, могут вести передачу в нелицензируемом частотном диапазоне 5 ГГц, который уже используется широко распространёнными беспроводными локальными сетями Wi-Fi. В ряде стран (например, в ЕС и Японии) данный диапазон делится законодательными ограничениями [3] на частотные каналы шириной 20 МГц. Для обеспечения совместного существования устройств, работающих в одном и том же канале, в сетях Wi-Fi используется метод доступа EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access), основанный на множественном доступе с контролем несущей и избеганием коллизий (англ.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01223 а

Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). При использовании данного метода перед каждой передачей устройство Wi-Fi выполняет процедуру двоичной экспоненциальной отсрочки.

Чтобы обеспечить совместное существование Wi-Fi и других технологий, использующих диапазон 5 ГГц, в частности NR-U, законодательные ограничения требуют использования методов доступа к каналу, основанных на CSMA/CA с процедурой двоичной экспоненциальной отсрочки, аналогичной той, что используется в методе EDCA. Очевидно, что для достижения высокой пропускной способности устройству NR-U необходимо использовать одновременно как можно больше частотных каналов. Однако выполнение процедуры отсрочки в нескольких каналах сопряжено с рядом проблем. В частности, устройство NR-U не всегда может вести передачу в одном канале и выполнять процедуру отсрочки в другом канале из-за проблемы внеполосного излучения [4–6].

Спецификация NR-U описывает несколько методов доступа к множеству частотных каналов, однако, не указывает явно, какой метод следует использовать в зависимости от сетевого сценария. В нескольких существующих работах [4–8] по NR-U и технологии-предшественнице LTE-LAA (англ. Long Term Evolution License-Assisted Access) проводится сравнительный анализ вышеупомянутых методов доступа к множеству частотных каналов, в большинстве из них предполагается, что при передаче в одном канале базовая станция NR-U (англ. gNB, gNodeB) считает все свои остальные каналы занятыми из-за внеполосного излучения. Данное допущение может оказаться неверным для реальных устройств. В настоящей работе при помощи имитационного моделирования исследуется влияние внеполосного излучения на производительность сетей NR-U в отсутствие вышеупомянутого допущения, причём случай, когда данное допущение выполняется, также приведён для сравнения. Рассматриваются как сценарии только с устройствами NR-U, так в сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi. В отличие от существующих работ, в данной статье рассматриваются как все описываемые спецификацией NR-U методы доступа к множеству частотных каналов, так и некоторых другие, описанные в литературе.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится детальное описание всех рассматриваемых методов доступа. Описываются как методы доступа к одному каналу, используемые в сетях Wi-Fi, так и методы доступа к множеству каналов, используемые в NR-U. Раздел 3 содержит обзор литературы, посвящённой методам доступа к множеству частотных каналов, используемым в LTE-LAA и NR-U. В разделе 4 исследуется влияние значений мощности, излучаемой при передаче в соседние каналы, на производительность сетей NR-U при использовании всех описанных в спецификации NR-U методов доступа к множеству частотных каналов. Раздел 5 содержит заключение, в котором приводятся краткое описание результатов исследования вместе с рекомендациями для сотовых операторов и производителей устройств.

2. ОПИСАНИЕ РАССМАТРИВАЕМЫХ МЕТОДОВ ДОСТУПА

2.1. Метод доступа к одному каналу в сетях Wi-Fi

Как уже упоминалось во введении, законодательные ограничения требуют использования для передачи в диапазоне 5 ГГц методов доступа, основанных на CSMA/CA с двоичной экспоненциальной отсрочкой. Аналогичным образом работает метод EDCA, используемый в сетях Wi-Fi. По этой причине, а также по причине того, что в настоящей работе рассматривается совместное существование сетей NR-U и Wi-Fi, в данном разделе приводится краткое описание вышеупомянутого метода EDCA.

При использовании EDCA, см. рис. 1, после появления кадра данных для передачи устройство Wi-Fi сначала ожидает, пока канал не окажется свободным в течение интервала *AIFS*

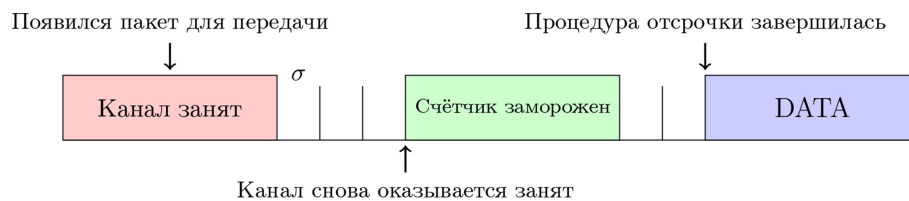


Рис. 1. Процедура отсрочки в методе доступа EDCA.

(англ. Arbitration Interframe Space). Затем оно инициализирует счётчик отсрочки случайным значением, равномерно распределённым на интервале $[0, W - 1]$, где W — это текущее значение конкурентного окна. Значение счётчика уменьшается на единицу по истечении каждого слота отсрочки длительностью σ , во время которого канал оставался свободным. В случае, если канал во время очередного слота окажется занятым, устройство приостанавливает процедуру отсрочки до момента, когда канал снова станет свободным в течение $AIFS$, после чего оно уменьшает значение счётчика отсрочки на единицу. Когда значение счётчика достигает нуля, устройство начинает передачу.

При успешном приёме кадра данных устройство отвечает кадром-подтверждением ACK. В случае, если отправитель не начинает приём кадра ACK по истечении интервала $ACK\ Timeout$, передача считается неуспешной. Это может произойти, например, из-за возникшей коллизии или влияния постороннего шума. W при этом удваивается вплоть до W_{max} для уменьшения вероятности возникновения последующих коллизий. После удачной передачи окно устанавливается в минимальное значение W_{min} .

Также стоит отметить, что максимальная длительность передачи задаётся параметром $TXOP\ Limit$, определённым в стандарте Wi-Fi [9] вместе с параметрами W_{min} , W_{max} , $AIFS$ и др.

2.2. Методы доступа к каналу в сетях NR-U

Чтобы как можно больше использовать уже существующие технологии, в NR-U используются те же структура кадра и механизм агрегирования частотных каналов, что и в сетях пятого поколения NR (англ. New Radio), работающих в лицензируемых диапазонах частот. Согласно данному механизму, gNB может вести передачу в нескольких каналах одновременно. Стоит отметить, что и в NR, и в NR-U передачи могут начинаться только на границах временных слотов в лицензируемом частотном диапазоне.

В NR-U используется реализация CSMA/CA под названием LBT (англ. Listen-before-Talk) с процедурой отсрочки, схожей с используемой в EDCA. Однако, между EDCA и LBT есть заметные отличия. Устройство Wi-Fi может начинать передачу сразу после завершения процедуры отсрочки, в то время как gNB может начинать передачу только на ближайшей границе временных слотов в лицензируемом частотном диапазоне. Из-за этого устройство Wi-Fi может занять канал в случае, если gNB после окончания процедуры отсрочки будет ожидать момента, когда она сможет начать передачу. Таким образом, канал окажется занятым, и gNB будет вынуждена отказать от передачи. Данный эффект приводит к сильному падению производительности сети NR-U [10, 11]. Во многих работах [12–17] предлагается посылать резервирующий сигнал между моментами завершения процедуры отсрочки и ближайшей границей временных слотов в лицензируемом частотном диапазоне, чтобы предотвратить занятие канала устройствами Wi-Fi. В данной работе также используется данный подход.

Стоит отметить, что в спецификации NR-U присутствует параметр $MCOT$ (англ. Maximum Channel Occupancy Time) [18], аналогичный $TXOP\ Limit$, см. раздел 2.1.

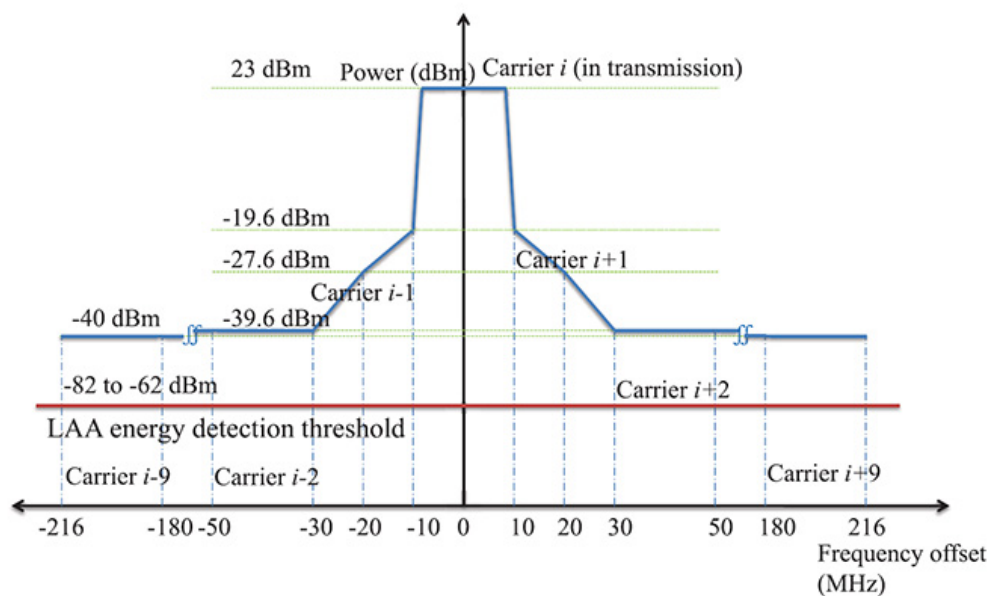


Рис. 2. Пределы мощности, излучаемой в соседние каналы [5]

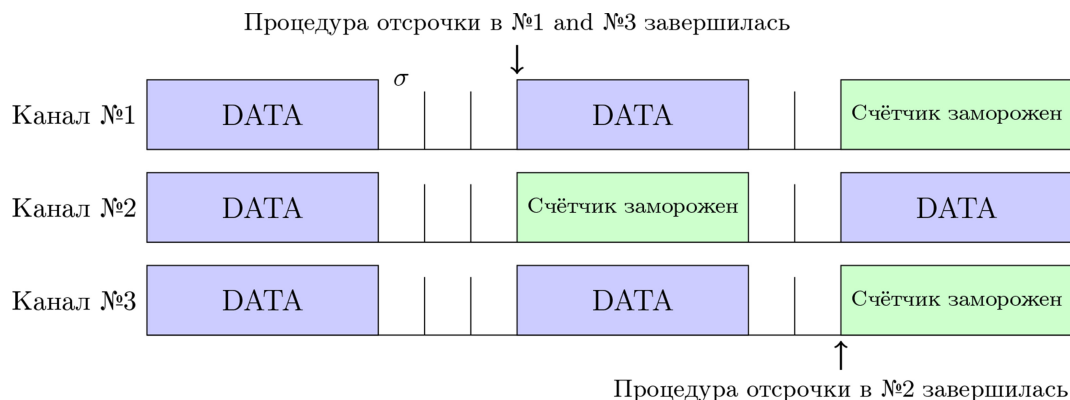


Рис. 3. Метод доступа Type A.

Очевидно, что одновременное использование нескольких частотных каналов необходимо для достижения высокой пропускной способности. В связи с этим, перейдём непосредственно к методам доступа к множеству частотных каналов, используемым в NR-U. Спецификация определяет два типа выполнения процедуры отсрочки в нескольких частотных каналах:

- Type A: процедура отсрочки выполняется во всех каналах независимо;
- Type B: процедура отсрочки выполняется только в одном канале.

Метод доступа к множеству каналов Type A

При использовании Type A gNB выполняет процедуру отсрочки во всех каналах параллельно. Когда значение счётчика отсрочки в каком-либо канале достигает нуля, gNB начинает передачу в этом канале. Передачи могут вестись в нескольких каналах в случае, если значения соответствующих счётчиков отсрочки достигли нуля.

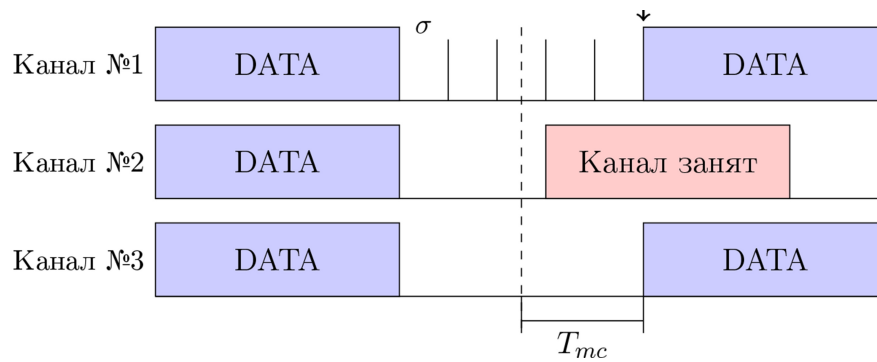


Рис. 4. Метод доступа Type B.

Однако одновременным передачам в нескольких каналах мешает проблема, связанная с внеполосным излучением. Она заключается в том, что мощность, излучаемая при передаче в соседние каналы, может превышать пороговое значение, по которому gNB определяет занятость среды. Из-за этого во время передачи в одном канале gNB не может отсчитывать слоты отсрочки в соседних каналах, поскольку она считает их занятыми, см. рис. 3. Таким образом, этот эффект может приводить к недоиспользованию множества каналов.

Для дальнейшего изложения необходимо ввести следующее определение. Будем называть *эффективной шириной внеполосного излучения* число лежащих по одну сторону от рабочей полосы каналов, которое gNB считает занятыми при передаче. Например, если при передаче в одном канале gNB считает занятыми также один канал слева и один канала справа, то эффективная ширина внеполосного излучения равна одному.

В большинстве существующих работ по NR-U и LTE-LAA [6–8] предполагается, что эффективная ширина внеполосного излучения равна числу каналов, т.е. gNB считает все свои каналы занятыми при передаче в одном из них. Несмотря на то, что данное допущение может быть обосновано спецификацией NR-U, оно имеет ряд недостатков. Так, например, описанные в спецификации NR-U пределы мощности, излучаемой в соседние каналы, см. рис. 2, рассчитаны на наихудший возможный случай и представляют из себя максимально допустимые значения. Реальные же устройства могут иметь меньшие по сравнению со спецификацией значения эффективной ширины внеполосного излучения. Таким образом, gNB может считать не все каналы занятыми при передаче в одном из них.

Спецификация NR-U описывает две разновидности Type A: Type A1 и Type A2. При использовании Type A1 gNB выполняет процедуру отсрочки во всех каналах независимо, с учётом вышеупомянутой проблемы внеполосного излучения. При использовании Type A2 в момент завершения передачи в канале gNB заново инициализирует счётчики отсрочки во всех каналах новым значением, равномерно распределённым на интервале $[0, W_0 - 1]$, где W_0 – это максимальное значение текущего конкурентного окна во всех каналах.

Метод доступа к множеству каналов Type B

В отличие от Type A при использовании Type B gNB выбирает только один основной канал, в котором будет выполняться отсчёт времени отсрочки. Когда процедура завершается, gNB начинает передачу как в основном канале, так и в других каналах, оказавшихся свободными в течение интервала T_{mc} , см. рис. 4.

Аналогично Type A, спецификация NR-U описывает две разновидности Type B: Type B1 и Type B2. При Type B1 gNB использует одно конкурентное окно (только на основном канале).

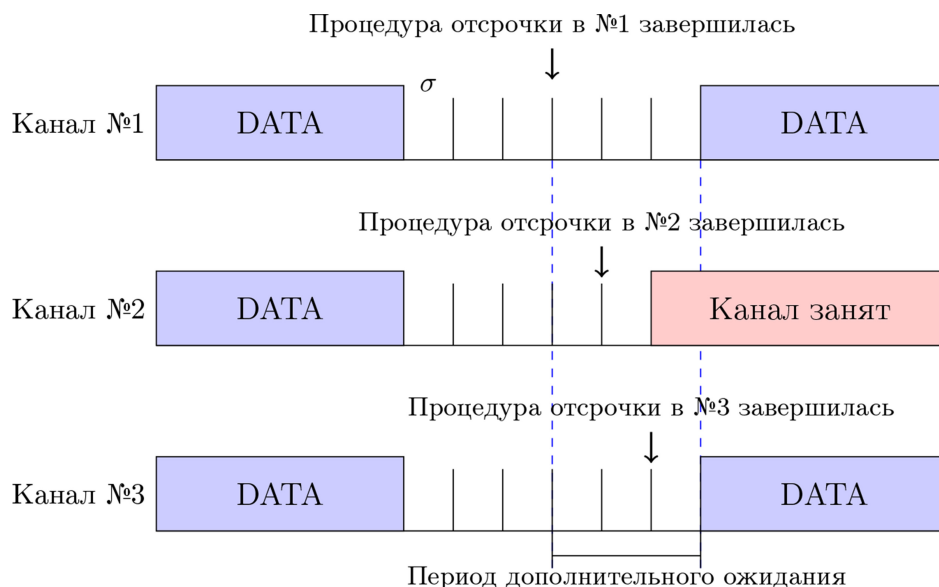


Рис. 5. Метод доступа Type A с дополнительным ожиданием (SD).

При Type B2 несмотря на то, что процедура отсрочки выполняется только в основном канале, gNB имеет отдельные конкурентные окна на всех каналах. Значение счётчика на основном канале выбирается из максимума W_0 по всем текущим окнам на всех каналах, аналогично Type A2.

Стоит отметить, что спецификация NR-U не указывает, каким образом gNB должна выбирать основной канал. В [6] мы показали, что для уменьшения вероятности коллизии основные каналы должны распределяться между gNB равномерно согласно дисциплине Round Robin, т.е. на gNB i используется канал $i \bmod Z$, где Z – общее число каналов. В настоящей работе также используется этот подход.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Несмотря на то, что NR-U вместе со своей технологией-предшественницей LTE-LAA широко исследованы в литературе, относительно малое количество работ посвящено использованию агрегирования частотных каналов в этих технологиях.

Для уменьшения влияния внеполосного излучения на эффективность Type A в [19] предлагается модификация данного метода доступа с применением дополнительного периода ожидания (англ. SD, self-deferral). После завершения процедуры отсрочки в одном из каналов gNB ждет несколько дополнительных слотов отсрочки, во время которых процедура отсрочки может также завершиться и в других каналах. Таким образом, передача может начаться одновременно в нескольких каналах. Однако недостатком такого решения является то, что во время периода дополнительного ожидания канал могут занять другие gNB или устройства Wi-Fi, что, в свою очередь, приведёт к отказу от передачи в данном канале. В настоящей работе также рассматривается данное решение, но с одним отличием. В [19] gNB прослушивает канал дополнительно в течение интервала $AIFS$ после завершения периода дополнительного ожидания. Аналогично [6], в настоящей работе предполагается, что gNB непрерывно слушает канал во время данного периода. При таком подходе отсутствует необходимость в дополнительном прослушивании канала, что повышает вероятность начала передачи.

В [7] предлагается выполнять процедуру отсрочки только на заданном подмножестве каналов. После завершения процедуры отсрочки в каком-либо канале из данного подмножества передача начинается во всех каналах, которые оказались свободными в течение T_{mc} . Можно заметить, что данный метод похож на Type B с той лишь разницей, что процедура отсрочки выполняется в нескольких каналах, а не в одном основном канале, как в Type B. Предложенное решение сравнивается с Type A1 (как с дополнительным ожиданием, так и без). Показывается, что предложенное решение обеспечивает более высокую пропускную способность по сравнению с обоими вариантами Type A1. Однако авторы рассматривают сценарий только с четырьмя каналами, в то время как спецификация NR-U допускает использование вплоть до 32 каналов.

Авторы [4] предлагают гибридный метод доступа к множеству частотных каналов, который делит каналы на группы таким образом, что передача в канале из одной группы не оказывает влияние на каналы из других групп из-за внеполосного излучения. Внутри одной группы передачи происходят согласно Type B1. При помощи имитационного моделирования авторы показывают, что предложенное решение обеспечивает прирост пропускной способности по сравнению с Type A1 (как с дополнительным ожиданием, так и без) и Type B1 в нескольких сценариях взаимного сосуществования LTE-LAA и Wi-Fi.

В [8] предлагаются адаптивные алгоритмы детектирования мощности и выбора каналов при использовании Type A1 и Type B1. Авторы оценивают эффективность предложенных решений при помощи имитационного моделирования в сценарии совместного сосуществования LTE-LAA и Wi-Fi в пределах помещения [20]. Однако, аналогично [7], в [8] предполагается возможность одновременного использования только четырёх каналов при восьми доступных.

Авторами [5] предлагается модификация Type A1 с адаптивной длительностью периода дополнительного ожидания. Данное решение направлено на максимизацию ожидаемого числа одновременно используемых для передачи каналов. Из-за вычислительной сложности полученной аналитической модели авторы также предлагают субоптимальный, но менее сложный алгоритм для определения длительности периода дополнительного ожидания. При помощи имитационного моделирования оценивается производительность предложенных решений по сравнению с Type A1 без дополнительного ожидания, Type A1 с периодом дополнительного ожидания и Type B1. Однако, как в [7] и [8], рассматривается использование только четырёх каналов. Стоит отметить, что в [4] и [5], в отличие от других работ, рассматриваются различные значения эффективной ширины внеполосного излучения.

Обычно при исследовании LTE-LAA и NR-U не рассматриваются сценарии плотного размещения устройств. Помимо этого, обычно не проводится сравнение всех описываемых спецификацией методов доступа к множеству каналов. В отличие от других работ, в [6] авторы настоящей работы проводят сравнение всех существующих в NR-U методов доступа к множеству частотных каналов при варьировании числа устройств и числа каналов в широких пределах. При помощи результатов имитационного моделирования в [6] разработаны рекомендации для производителей устройств и сетевых операторов по выбору метода доступа в зависимости от сетевого сценария. Однако в [6] считается, что эффективная ширина внеполосного излучения равна числу каналов. Как уже упоминалось ранее, даже будучи допустимым спецификацией, данное предположение может оказаться неверным для реальных устройств. Это может повлиять на выбор метода доступа в зависимости от сетевого сценария. Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния эффективной ширины внеполосного излучения на производительность сетей NR-U при использовании всех существующих методов доступа.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Данное исследование проводилось при помощи имитационного моделирования. В модели были реализованы все описанные ранее вариации Type A (как с SD, так и без) и Type B. Однако в данной работе не приводится сравнение с Type B2, поскольку он всегда демонстрирует худшую по сравнению с Type B1 пропускную способность [6]. Рассматривается сценарий плотного размещения сетей, в котором имеется N gNB, передающих данные пользовательским устройствам. Для передачи доступно Z каналов, расположенных непрерывно в частотной области. Для оценки эффективности методов доступа NR-U рассматривается 2 сценария. В первом сценарии присутствуют только устройства NR-U. Во втором сценарии рассматривается совместное существование NR-U и Wi-Fi, когда на каждом канале присутствует независимая сеть Wi-Fi, работающая только в данном канале. В каждой сети Wi-Fi имеется одна точка доступа (англ. Access Point, AP), осуществляющая передачу данных. Как gNB, так и AP передают насыщенный нисходящий трафик на номинальной скорости передачи C . Стоит отметить, что рассматривается передача нисходящего трафика, так как именно в нисходящем канале в беспроводных сетях передаётся подавляющая часть данных [21]. Численные значения параметров, используемые в имитационной модели, приведены в таблице 1.

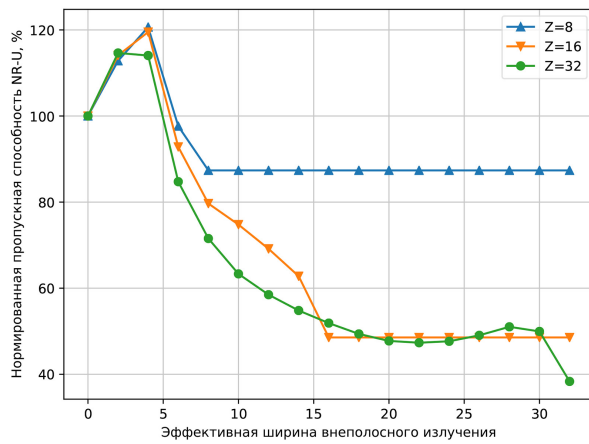
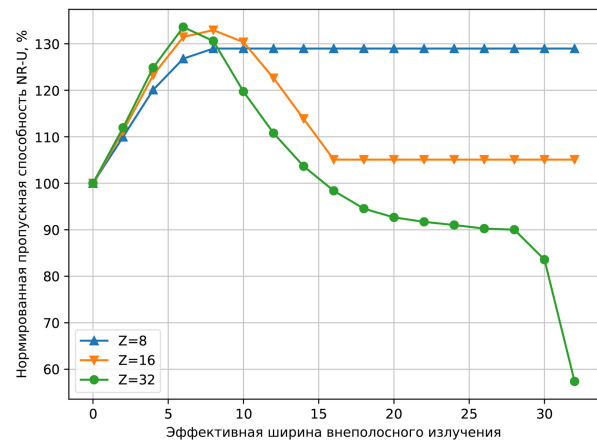
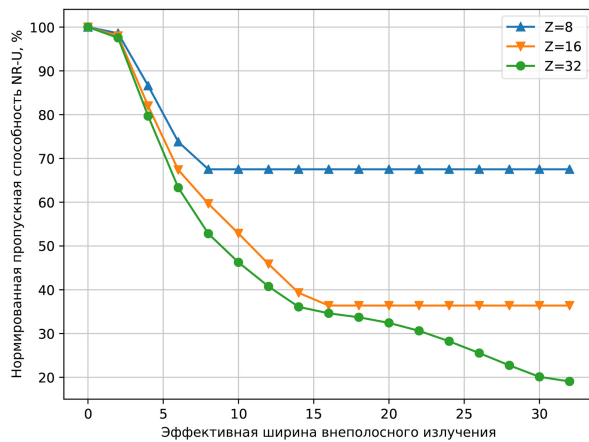
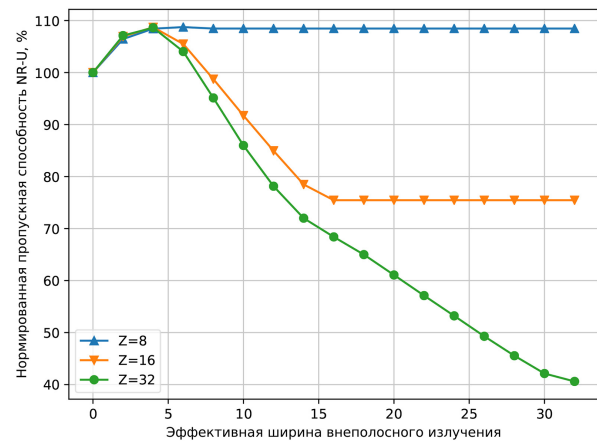
Таблица 1. Численные значения параметров модели

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальная скорость передачи C	75 Мбит/с	$AIFS$	43 мкс
$MCOT$	8 мс	T_{mc}	25 мкс
$TXOP\ Limit$	2.5 мс	σ	9 мкс
W_{min}, W_{max}	16, 64	Период SD	$10\sigma^1$

Перейдем к исследованию влияния значения эффективной ширины внеполосного излучения L на производительность NR-U. Так как наблюдаемые эффекты оказываются схожи для всех вариаций Type A, для простоты изложения ограничимся рассмотрением Type A1 без SD. На рис. 6(а) приведена зависимость нормированной пропускной способности NR-U в расчёте на gNB от L при $N = 5$ в отсутствие Wi-Fi. Нормировка производилась относительно точки $L = 0$ для каждого значения Z . Как можно заметить, наблюдается максимум для всех Z около точки $L = 4$, значение пропускной способности в котором может превышать значение в точке $L = 0$ более чем на 30%. Этот эффект связан с тем, что при передаче в одном канале gNB приостанавливает процедуру отсрочки в соседних каналах и, следовательно, перестаёт соревноваться за доступ к ним, что ведёт к уменьшению числа коллизий. При дальнейшем увеличении L пропускная способность начинает падать, поскольку gNB использует одновременно для передачи все меньшее количество каналов. Постоянная пропускная способность при $L > Z$ в случае $Z = 8$ и $Z = 16$ объясняется тем, что при $L \geq Z$ gNB считает все свои каналы занятыми при передаче в одном из них.

При увеличении N до 10, см. рис. 6(б), наблюдаемые эффекты оказываются схожи со случаем $N = 5$ для $Z = 16$ и $Z = 32$, однако стоит отметить, что максимумы на графиках смещаются вправо, так как большее число gNB позволяет эффективно использовать множество каналов при больших L , чем при $N = 5$, при этом снижая вероятность коллизии. Стоит отметить, что в случае $Z = 8$ максимум достигается при L , равном числу каналов. В этом случае каждая gNB одновременно выполняет процедуру отсрочки только в одном канале. Однако это не мешает эффективно использовать все каналы, так как число gNB превышает число каналов.

⁰ В данной работе используется та же длительность периода дополнительного ожидания, что и в [4–7].

(а) $N = 5$, сценарий только с устройствами NR-U(б) $N = 10$, сценарий только с устройствами NR-U(в) $N = 5$, сценарий совместного существования NR-U и Wi-Fi(г) $N = 10$, сценарий совместного существования NR-U и Wi-Fi**Рис. 6.** Зависимость пропускной способности NR-U при использовании метода доступа Type A1 без SD от L

В сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi при $N = 5$, см. рис. 6(в), аналогичного максимума на графиках не наблюдается. Это связано с тем, что при малом числе gNB, соревнующихся за каждый канал, каналы часто оказываются заняты передачей Wi-Fi. При $N = 10$, см. рис. 6(г), максимум наблюдается снова, так как за каждый канал уже соревнуется большее количество gNB, что позволяет избегать занятия канала AP.

Также стоит отметить, что в любом сценарии на рис. 6 при фиксированном N негативное влияние внеполосного излучения на пропускную способность усиливается при больших Z . Это связано с тем, что каждая gNB передаёт одновременно в малом числе каналов. Этот факт не позволяет всем gNB полностью использовать потенциал всех Z каналов.

На рис. 7 представлена зависимость пропускных способностей всех вариаций Type A от Z при различных L . Для сравнения на графиках также представлены кривые для Type B1. При $L = 0$, см. рис. 7(а), наибольшую пропускную способность демонстрирует Type A2 благодаря менее частым коллизиям из-за более долгой процедуры отсрочки. Можно заметить, что Type A1 с SD и Type A2 с SD несколько отстают по пропускной способности от Type A1 без SD и Type A2 без SD соответственно из-за накладных расходов, вызванных использованием дополнительного ожидания. Также стоит отметить, что внеполосное излучение никак не

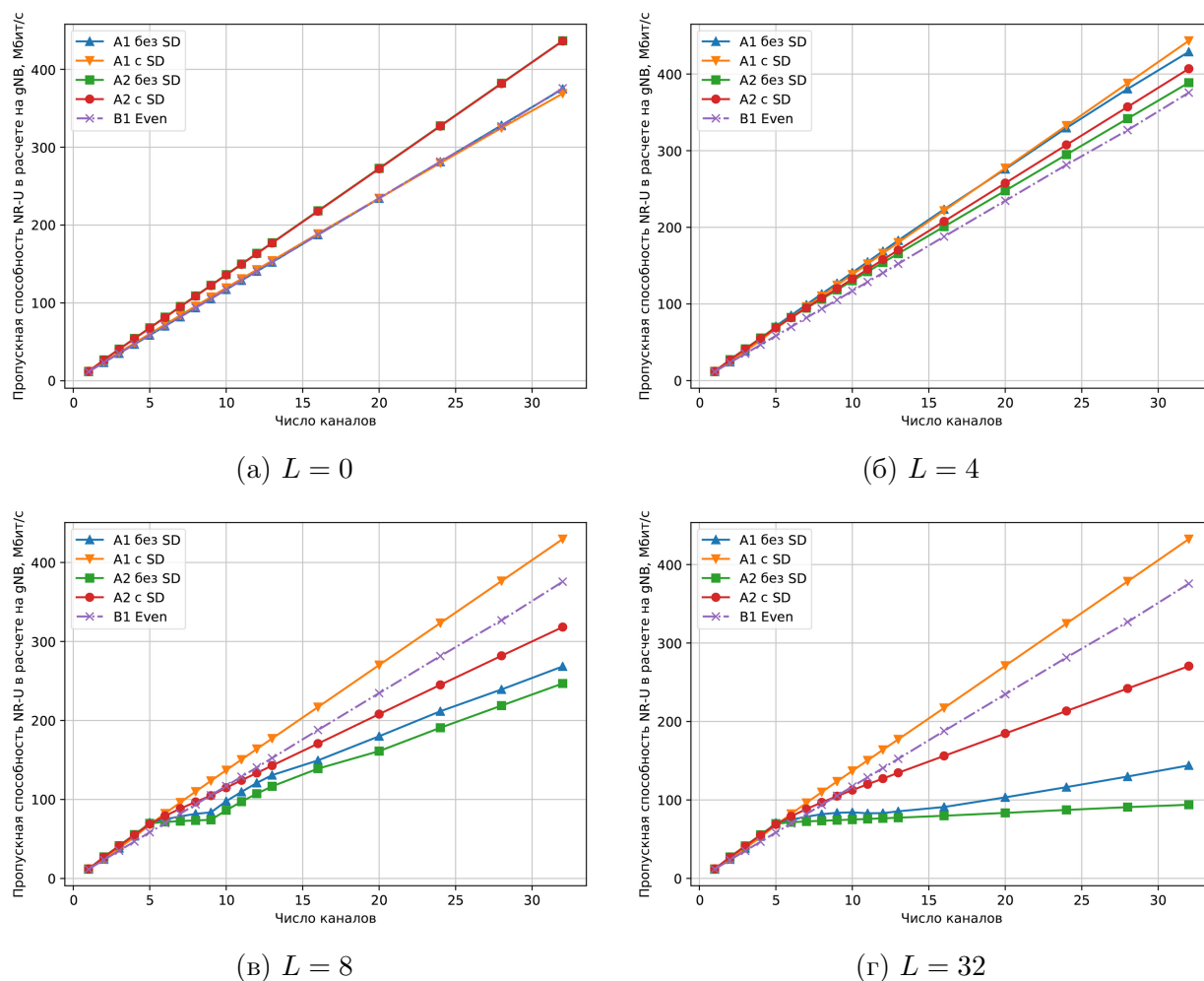


Рис. 7. Зависимость пропускной способности всех рассматриваемых методов доступа от Z при $N = 5$ в отсутствие Wi-Fi

сказывается на эффективности Type B, поскольку при его использовании процедура отсрочки выполняется только в одном канале.

В случае $L = 4$, $L = 8$ и $L = 32$, см. рис. 7(б)–(г), при $Z < N$ наблюдается линейный рост пропускной способности, поскольку «засветка» соседних каналов на одной gNB не мешает разным gNB одновременно использовать разные каналы. При $N \leq Z < L$ (эта область отсутствует при $L = 4$, поскольку $N = 5$) пропускная способность Type A1 без SD и Type A2 без SD перестаёт расти с увеличением Z , так как каждая gNB почти всегда передаёт только в одном канале из-за внеполосного излучения, что ведёт к недоиспользованию каналов. При $Z \geq L$ пропускная способность Type A1 без SD и Type A2 без SD снова начинает расти с увеличением Z . Это связано с тем, что при передаче в одном канале gNB больше не «засвечивает» все остальные каналы, и в каких-то каналах слоты отсрочки могут продолжать отсчитываться. Таким образом, несмотря на внеполосное излучение, gNB может использовать одновременно более одного канала, причём тем больше, чем меньше L , поскольку при уменьшении L влияние внеполосного излучения ослабевает. Также стоит отметить, что благодаря использованию дополнительного ожидания у Type A1 с SD и Type A2 с SD не наблюдается «полки», возникающей из-за недоиспользования канала при $N \leq Z < L$. Однако, это не избавляет полностью от негативного влияния внеполосного излучения, и при $Z > N$ на графике наблюдается рост

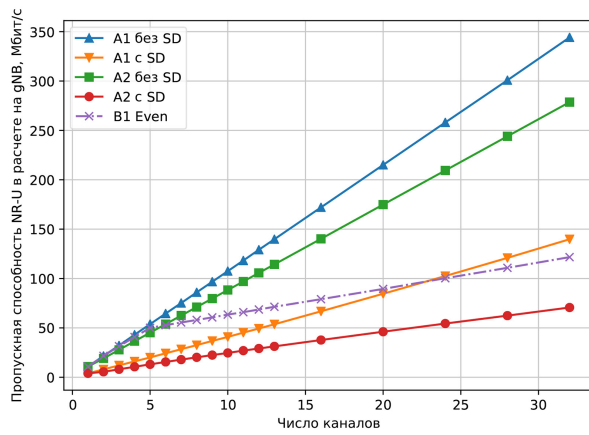
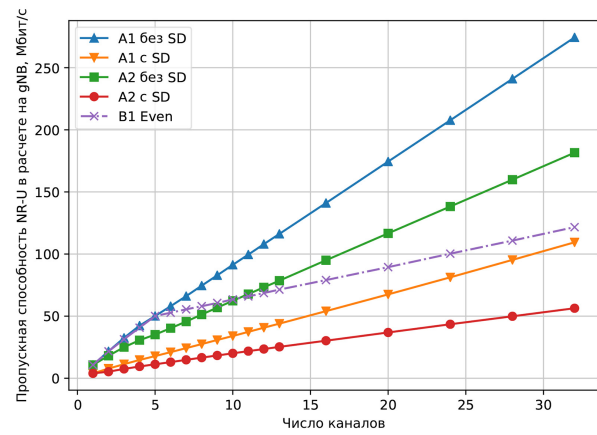
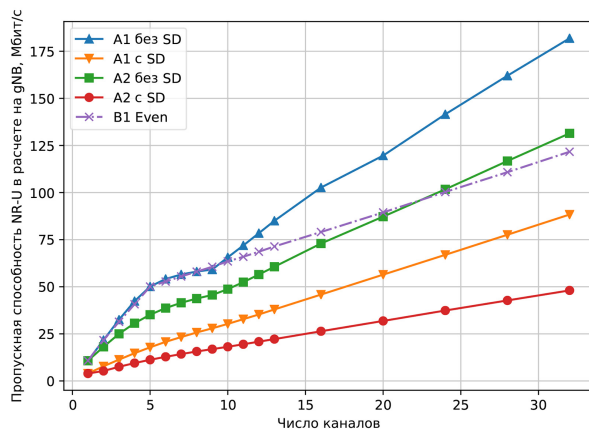
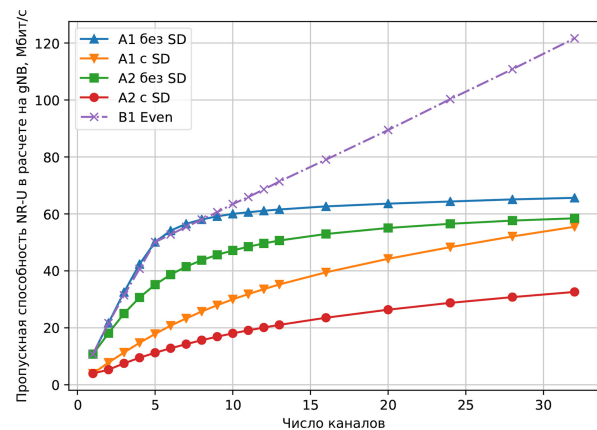
(а) $L = 0$ (б) $L = 4$ (в) $L = 8$ (г) $L = 32$

Рис. 8. Зависимость пропускной способности всех рассматриваемых методов доступа от Z при $N = 5$ в сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi

с меньшим коэффициентом наклона прямой, чем в области $N \leq Z < L$. Помимо этого, можно заметить, что в данном случае все вариации Type A2 показывают несколько меньшую пропускную способность по сравнению с соответствующими версиями Type A1, что можно объяснить накладными расходами из-за более долгой процедуры отсрочки. При использовании дополнительного ожидания разница между Type A1 и Type A2 более заметна, так как меньшее количество каналов успевает завершить свою процедуру отсрочки во время дополнительного ожидания из-за более долгой длительности данной процедуры, что сильно влияет на пропускную способность.

В сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi при $N = 5$, см. рис. 8, можно наблюдать схожие с предыдущим случаем эффекты. Однако, стоит отметить, что пропускная способность Type A с SD заметно снижается, поскольку AP может занять канал в то время, когда gNB находится в состоянии дополнительного ожидания. В этом случае gNB отказывается от передачи. Также стоит отметить, что при $L = 0$ и $L = 8$ Type A1 без SD демонстрирует наилучшую пропускную способность, в то время при $L = 16$ и $L = 32$ наилучшим по пропускной способности оказывается Type B1.

В сценарии только с устройствами NR-U при $N = 10$, см. рис. 9, ситуация аналогична случаю $N = 5$. Однако можно отметить, что в этом случае разница между соответствующими

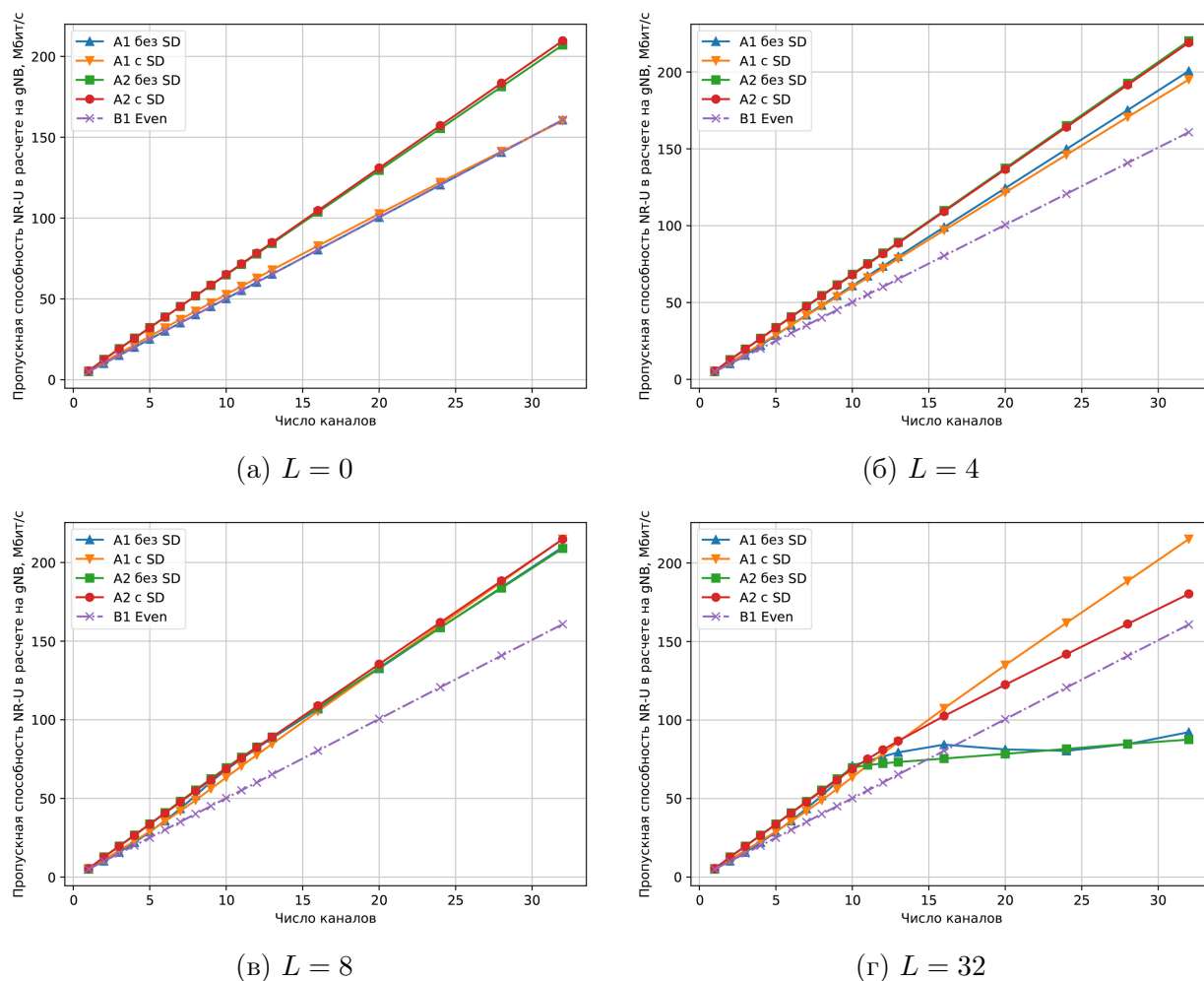


Рис. 9. Зависимость пропускной способности всех рассматриваемых методов доступа от Z при $N = 10$ в отсутствие Wi-Fi

вариациями Type A с SD и Type A без SD менее заметна, так как большое количество gNB позволяет сократить недоиспользование канала, от которого сильно страдает Type A без SD. Характерная область $N < Z \leq L$, заметная на рис. 7(в), отсутствует на рис. 9(в), так как $N > L$. Вообще, большее число gNB положительно сказывается на эффективности Type A при малых L , так как выполнение процедур отсрочки в большом числе каналов большим числом gNB позволяет использовать каналы эффективнее. При $L = 8, N = 10$, см. рис. 9(в), все вариации Type A показывают большую примерно на 30% пропускную способность по сравнению с Type B1, в то время как при $L = 8, N = 5$, см. рис. 7(в), все вариации Type A, кроме Type A1 без SD, демонстрируют меньшую по сравнению с Type B1 пропускную способность. При $L = 32, N = 10$, см. рис. 9(г), пропускная способность Type A без SD перестаёт расти при больших Z из-за недоиспользования канала. Однако обе вариации Type A с SD показывают большую по сравнению с Type B1 пропускную способность, в то время как при $L = 32, N = 5$, см. рис. 9(в), только Type A1 с SD эффективнее Type B1.

В сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi при $N = 10$, см. рис. 10, наблюдаемые эффекты схожи со случаем $N = 5$, однако при $L = 0, L = 4$ и $L = 8$ можно отметить сокращение разницы в пропускной способности между Type A1 без SD и Type A2 без SD по

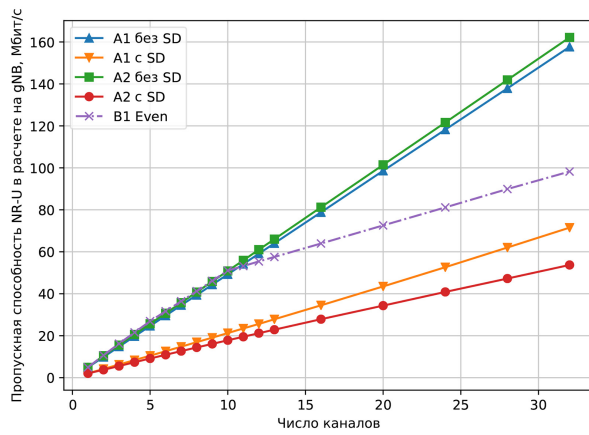
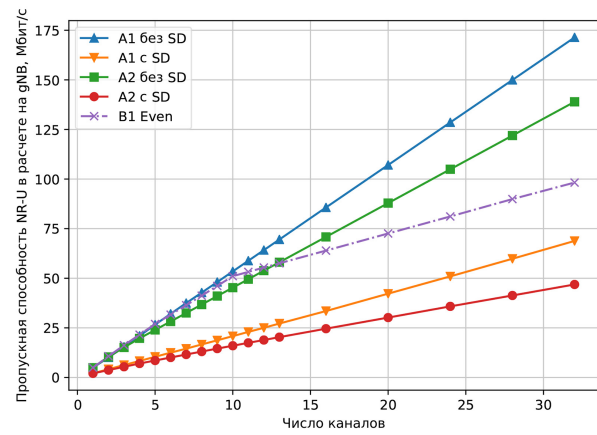
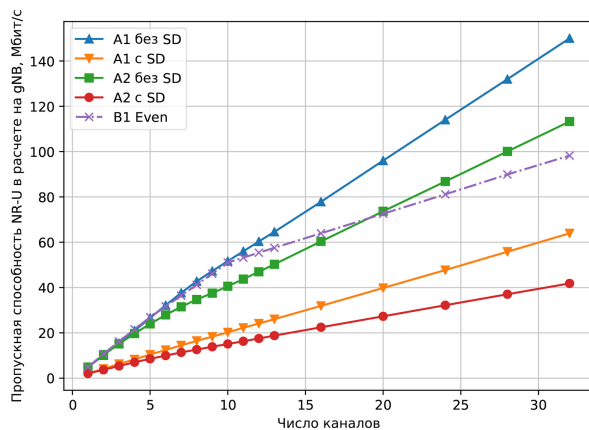
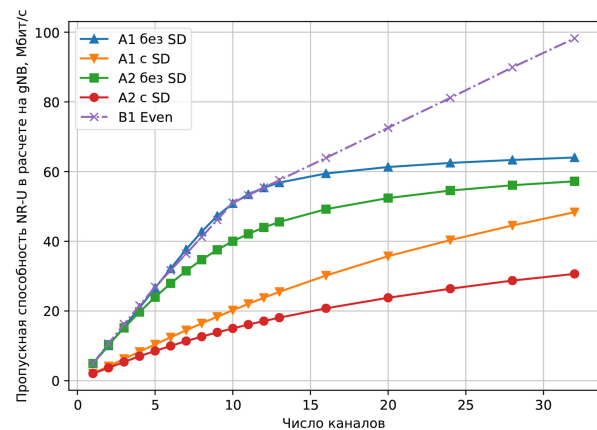
(а) $L = 0$ (б) $L = 4$ (в) $L = 8$ (г) $L = 32$

Рис. 10. Зависимость пропускной способности всех рассматриваемых методов доступа от Z при $N = 10$ в сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi

сравнению с рис. 8. Увеличение числа gNB позволяет снизить долю пустых слотов отсрочки при использовании Type A2 без SD, что уменьшает накладные расходы.

Итого, внеполосное излучение оказывает значительное влияние на эффективность Type A. Стоит отметить, что Type A с SD менее подвержен этому влиянию, так как использование дополнительного ожидания позволяет снизить недоиспользование множества каналов. Таким образом, влияние внеполосного излучения особенно важно в сценарии совместного существования NR-U и Wi-Fi, когда выбор наиболее эффективного метода доступа происходит между вариациями Type A без SD и Type B1. В этом случае пропускная способность сети NR-U при использовании Type A без SD сильно зависит от значения эффективной ширины внеполосного излучения L , что играет важную роль при выборе метода доступа. Таким образом, производителям устройств и сотовым операторам стоит экспериментально определять данное число на реальных устройствах для выбора наиболее эффективного метода доступа. Также стоит отметить, что внеполосное излучение не всегда негативно сказывается на пропускной способности Type A, и при определенных значениях L оно способно повысить пропускную способность более чем на 30%. Если L , измеренное на реальном устройстве, меньше, чем данное значение, gNB имеет смысл вводить виртуальную занятость на соседние каналы для увеличения пропускной способности Type A.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

NR-U — это технология, позволяющая использовать для передачи данных в сотовых сетях пятого поколения нелицензируемые диапазоны частот, в частности, диапазон 5 ГГц. Данный диапазон делится законодательными ограничениями на каналы шириной 20 МГц. Для достижения больших пропускных способностей требуется использовать несколько каналов одновременно, в связи с чем спецификация NR-U описывает несколько методов доступа к множеству частотных каналов. Однако на эффективность некоторых из них может сильно влиять внеполосное излучение.

В настоящей работе при помощи разработанной имитационной модели проводится сравнительный анализ всех существующих в NR-U методов доступа к множеству частотных каналов при различных значениях эффективной ширины внеполосного излучения. Рассматриваются сценарии с большим числом устройств и частотных каналов, причём число каналов варьируется вплоть до максимального значения, предусмотренного спецификацией. Так как диапазон 5 ГГц используется широко распространёнными сетями Wi-Fi, в данной работе также рассматривается влияние сетей Wi-Fi на производительность вышеупомянутых методов доступа. Показывается, что на эффективность метода доступа Type A, при котором процедура отсрочки выполняется в каждом канале, сильно влияет значение эффективной ширины внеполосного излучения, что может сказаться на выборе оптимального по пропускной способности метода доступа в зависимости от сетевого сценария. Таким образом, для определения оптимального метода доступа сотовым операторам и производителям устройств имеет смысл экспериментально измерять значение эффективной ширины внеполосного излучения. Помимо этого, показывается, что пропускная способность Type A повышается более чем на 30% при определённых значениях эффективной ширины внеполосного излучения. В случае если экспериментально измеренные значения оказываются меньше, чем данные значения, gNB имеет смысл виртуально увеличивать эффективную ширину внеполосного излучения для увеличения пропускной способности метода доступа Type A.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Wang M., Hua M., Xia T., Yang W., You X. LTE on license-exempt spectrum. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 20, no. 17, pp. 647–673.
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, 1530–1537
3. ETSI. 301 893 V1.7.2 (2014-07): Broadband radio access networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive, 2014.
4. Vu L.H., Yun J. Power leakage-aware multi-carrier LBT for LTE-LAA in unlicensed spectrum. *2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 1–10, 2018.
5. Vu L.H., Yun J. Adaptive Self-Deferral for Carrier Aggregation of LTE-LAA With RF Power Leakage in Unlicensed Spectrum. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 89292–89305.
6. Zhdanovskiy V., Loginov. V., Lyakhov A., Khorov E. A Comparative Study on Multi-Channel Access Methods in 5G NR-U Networks. *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Odessa, Ukraine, 2020.
7. Liu J., Shen G. Performance of multi-carrier LBT mechanism for LTE-LAA. *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016.
8. Li L., Salehi S., Shen C., Cimini L.J., Graybeal J. Multi-Carrier LAA with Adaptive Energy Detection and Carrier Selection. *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019.

9. 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.
10. Kutsevol P., Loginov V., Khorov E., Lyakhov A. Analytical study of license-assisted access in 5G networks. *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, 2019.
11. Kutsevol P.N., Loginov V.A., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Mathematical Modeling of Joint Operation of Wireless Local Area Networks and Fifth Generation Cellular Networks. *Automation and Remote Control*, 2019, vol. 80, no. 12, pp. 2163–2177.
12. Kutsevol P., Loginov V., Khorov E., Lyakhov A. New Collision Detection Method for Fair LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence, *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2019.
13. Yi J., Sun W., Park S., Choi S. Performance analysis of LTE-LAA network. *IEEE Communications Letters*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 1236–1239.
14. Mehrnough M., Sathya V., Roy S., Ghosh M. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 1990–2003.
15. Cano C., Leith, D.J. Unlicensed LTE/WiFi coexistence: Is LBT inherently fairer than CSAT? *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016.
16. Mehrnough M., Roy S., Sathya V., Ghosh M. On the fairness of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networkin*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 735–748.
17. 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)*, Sochi, Russia, 2019.
18. 3GPP. Physical layer procedures for shared spectrum channel access — Technical specification (TS) — 37.213 — Version 16.0.0, 2020.
19. Multi-carrier LBT operation for LAA, *3GPP Tech. Rep. R1-152784*, May 2015.
20. Feasibility study on licensed-assisted access to unlicensed spectrum, *3GPP Tech. Rep. TR-36.889*, 2015.
21. IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030, *ITU-R, Recommendation M.2083*, September 2015.

A Study on the Impact of Out-of-band Emissions on Performance of 5G NR-U Networks

Zhdanovskiy V.D., Loginov V.A., Lyakhov A.I.

NR-U is a technology that allows fifth generation cellular networks to utilize unlicensed frequency bands, in particular, the 5 GHz band. In order to increase throughput, an NR-U base station (gNB) can operate at the same time in several frequency channels located within this band. However, a gNB can not always simultaneously transmit in one channel and perform the channel access procedure in another channel because of the out-of-band emission problem, which leads to channel underutilization. As a result, throughput of NR-U networks can highly depend on the out-of-band emission level. In this paper, using simulation, the impact of out-of-band emissions on NR-U performance is studied with all channel access methods defined in the NR-U specification. It is shown that out-of-band emission level affects the choice of the channel access method which is optimal in terms of throughput. It is also shown that out-of-band emissions do not always have a negative impact on NR-U performance, and sometimes they allow to achieve more than 30% throughput gain.

KEYWORDS: NR-U, Wi-Fi, coexistence, channel access methods, out-of-band emission