

Совместное существование сетей Wi-Fi и LTE-LAA: открытые проблемы¹

В.А. Логинов*, А.И. Ляхов*, Е.М. Хоров*,**

* *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия*

** *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 01.03.2018

Аннотация—В последние годы все острее становится необходимость в повышении пропускной способности сотовых сетей LTE. Один из главных факторов, ограничивающих рост пропускной способности сотовых сетей, заключается в ширине доступной для передачи полосы радиочастотного спектра. Для решения данной проблемы в сетях LTE планируется использовать для передачи нелицензируемые диапазоны частот, которые сейчас уже используются другими технологиями, например, Wi-Fi, с помощью новой технологии LTE-LAA. В данной работе проведен сравнительный обзор механизмов доступа к среде в нелицензируемом диапазоне, описанных в стандарте Wi-Fi и спецификации LTE-LAA, а также обозначены открытые на данный момент проблемы совместного существования этих технологий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Беспроводная сеть, совместное существование, LTE-LAA, Wi-Fi.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается значительный рост объема информации, передаваемой в сотовых сетях [1]. Это приводит к тому, что с каждым годом обеспечить растущие требования пользователей к пропускной способности используемых сегодня сотовых сетей LTE (англ. Long Term Evolution) четвертого поколения становится все труднее.

Современные сотовые сети, в частности, сети LTE, используют централизованное управления сетью радиодоступа, согласно которому базовая станция полностью контролирует параметры передач всех подключенных устройств (включая сигнально-кодированную конструкцию, время начала и длительность передачи и т.д.). Централизованное управление является возможным из-за того, что сотовые сети используют лицензируемую полосу частот, в которой разрешено передавать только устройствам определенного оператора сотовой связи.

Использование централизованного управления имеет ряд преимуществ, таких как отсутствие коллизий при передаче различных устройств, способность обеспечить гарантированное качество обслуживания и т.д. Однако, у него есть существенный недостаток — ограниченная ширина и дороговизна лицензируемых диапазонов частот. В частности, спецификация LTE позволяет одновременно использовать для передачи до 32 частотных каналов суммарной шириной до 640 МГц, однако из-за вышеописанных причин на практике на сегодняшний день операторы сотовой связи ограничиваются использованием максимум 4 каналов с суммарной шириной, не превышающей 80 МГц [2].

Получившие в последние два десятилетия большую популярность беспроводные локальные сети Wi-Fi имеют совершенно другой принцип управления сетью радиодоступа, основанный на методе множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.

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

CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Это связано с тем, что сети Wi-Fi работают в нелицензируемых диапазонах 2,4 и 5 ГГц, которые также могут использоваться другими сетями передачи данных, например, Bluetooth, Zigbee и др. Из-за этого механизм доступа для сетей Wi-Fi изначально разрабатывался с учетом возможности совместного существования с другими сетями, работающими в том же диапазоне. Несмотря на то, что при использовании децентрализованного механизма доступа возможны коллизии, вследствие чего они имеют более низкую эффективность по сравнению с централизованным, он обеспечивает эффективное совместное существование находящихся рядом сетей.

Для решения проблемы дефицита частотных ресурсов в сетях LTE планируется использовать не только лицензируемые, но и нелицензируемые полосы частот в диапазоне 5 ГГц. В данном диапазоне, в зависимости от страны, доступны для нелицензируемого использования полосы частот суммарной шириной более 400 МГц.

Однако, существуют и значительные трудности при использовании диапазона 5 ГГц в сетях LTE. Во-первых, данный диапазон уже активно используется сетями Wi-Fi стандарта IEEE 802.11a/n/ac, различными радарными, а в будущем будет использоваться также сотовыми сетями различных операторов. Иными словами, в отличие от лицензируемого диапазона частот, у оператора сотовой связи нет возможности контролировать все передачи в полосе. Из-за этого механизм доступа к нелицензируемой полосе должен учитывать наличие в канале устройств, работающих по другой технологии. Кроме того, в ряде стран (например, страны ЕС, Япония, и др.) существуют законодательные ограничения по использованию нелицензируемого диапазона 5 ГГц. Так, например, в странах ЕС действуют следующие ограничения, описанные в [3]:

- обязательное использование механизма прослушивания перед передачей, основанного на CSMA/CA, а также ограничения на значения его параметров, например, порога детектирования занятости среды, см. раздел 2.1;
- некоторые полосы частот в диапазоне 5 ГГц разрешено использовать только внутри помещений;
- ограничение на максимально допустимые мощность и длительность непрерывной передачи данных, а также спектральная маска сигнала;
- использование механизма динамического выбора частотного канала (англ. Dynamic Frequency Selection, DFS), предназначенного, во-первых, для обеспечения равномерной загрузки частотных каналов, а, во-вторых, для перехода на другой частотный канал диапазона 5 ГГц в случае детектирования работы радара¹;
- использование механизма регулирования мощности передачи (англ. Transmit Power Control, TRP), позволяющего снижать мощность передачи устройств для уменьшения интерференции в плотных сетях.

Для того чтобы использовать нелицензируемые полосы частот в диапазоне 5 ГГц, консорциум 3GPP, занимающийся разработкой LTE, в рамках версии 13 спецификации стандарта LTE разработал кардинально новую технологию, получившую название доступ при помощи лицензируемой полосы (англ. License-Assisted Access, LTE-LAA). LTE-LAA удовлетворяет локальным законодательным решениям большинства стран, поэтому подходит для международного внедрения в сетях LTE. Кроме того, одной из поставленных при разработке LTE-LAA

¹ Данное требование существует из-за того, что некоторые погодные и военные радары, а также радары гражданской авиации используют при работе диапазон 5 ГГц. При использовании DFS устройство должно детектировать передачи радара (короткие периодические импульсы), и после обнаружения такой передачи устройство обязано перейти на другой частотный канал, не занятый радаром, и не использовать предыдущий канал как минимум в течение 30 минут.

целей было обеспечение *справедливого совместного существования* с устройствами Wi-Fi, которое зачастую формулируется в виде следующего примера. Пусть есть N Wi-Fi устройств, работающих в одном частотном канале и находящихся в области радиовидимости друг друга. Считается, что механизм совместного существования LTE-LAA является справедливым, если при замене одного устройства Wi-Fi на устройство LTE-LAA удельная пропускная способность оставшихся Wi-Fi устройств не уменьшится. Кроме того, производительность устройства LTE-LAA при этом должна быть выше, чем у устройства Wi-Fi, которое им заменили.

Стоит отметить, что до появления LTE-LAA организацией LTE-U Forum, состоящей из ведущих телекоммуникационных компаний, велась разработка альтернативного решения на базе LTE для работы в нелицензируемом диапазоне 5 ГГц, которое получило название LTE-U (англ. LTE-Unlicensed) [4]. В отличие от LTE-LAA, LTE-U не может использоваться в некоторых странах (ЕС, Япония и др.) из-за нарушения законодательных ограничений, в частности, отсутствия механизма прослушивания канала перед передачей. Однако, в некоторых странах, в которых законодательные ограничения слабее, например, в США, LTE-U может использоваться. Так как LTE-U изначально разрабатывался скорее как решение, показывающее принципиальную возможность использования диапазона 5 ГГц сетями LTE, после завершения стандартизации LTE-LAA компании, входящие в LTE-U Forum, перестали развивать LTE-U. Ввиду этого, в данной работе будет рассматриваться только проблемы взаимодействия сетей Wi-Fi и LTE-LAA.

Для осуществления доступа к нелицензируемой полосе LTE-LAA использует ранее введенный в LTE механизм объединения несущих (англ. carrier aggregation), при этом главный канал (англ. primary component carrier, PCC) всегда находится в лицензируемом диапазоне, в то время как дополнительные каналы (англ. secondary component carrier, SCC) могут находиться в нелицензируемом диапазоне. Это приводит к тому, что при использовании LTE-LAA часть служебной информации передается в лицензируемом PCC, например, подтверждения HARQ (англ. Hybrid Automatic Repeat Request) об успешном/неуспешном принятии блока данных [5].

Изначально LTE-LAA поддерживала передачу данных в нелицензируемом диапазоне только в нисходящем канале, однако в версии 14 спецификации LTE была добавлена поддержка передач в восходящем канале. Новая технология получила название усовершенствованный LAA (англ. enhanced LAA, LTE-eLAA).

Согласно заявлениям 3GPP, LTE-LAA поможет значительно увеличить пропускную способность сотовых сетей. Кроме того, LTE-LAA является важным шагом в развитии сотовых сетей на пути к сетям пятого поколения (5G), активно разрабатываемым сейчас. Планируется, что в сетях 5G будут использоваться как лицензируемые, так нелицензируемые полосы частот, причем не только в диапазоне 5 ГГц.

Несмотря на то, что LAA и eLAA уже являются частью спецификации LTE, в их описании есть множество неспецифицированных деталей, причем именно от этих деталей существенно зависит как производительность сети LTE, так и производительность других сетей, работающих в том же нелицензируемом диапазоне, например, сетей Wi-Fi. В данной работе мы рассмотрим основные отличия механизмов доступа к каналу в сетях LTE-LAA и Wi-Fi и обратим внимание на возможные проблемы, которые могут возникнуть при совместном существовании этих сетей в нелицензируемом диапазоне 5 ГГц.

2. МЕХАНИЗМЫ ДОСТУПА К СРЕДЕ В НИСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ

2.1. Определение занятости среды

Как уже было отмечено в разделе 1, законодательные ограничения использования диапазона 5 ГГц ряда стран обязывают устройства использовать реализацию метода доступа

CSMA/CA. При использовании CSMA/CA перед каждой передачей данных устройство должно прослушать канал и убедиться, что в данный момент в канале не ведется передача сигнала другим устройством. Так как устройства, построенные на основе различных технологий, зачастую не могут правильно декодировать сигнал друг друга, механизмы прослушивания канала, в основном, опираются на оценку мощности передаваемого в канале сигнала. Рассмотрим более подробно, как эти механизмы устроены в сетях Wi-Fi и LTE-LAA.

Согласно стандарту Wi-Fi, среда считается занятой, если выполнено хотя бы одно из следующих условий:

1. Мощность сигнала в канале превышает порог $t_{ED}^W = -62\text{dBm}$ детектирования энергии.
2. Станция синхронизировалась на прием Wi-Fi-кадра, мощность сигнала которого превышает порог $t_{PD}^W = -82\text{dBm}$ детектирования преамбулы кадра.
3. Канал занят виртуально, например, если ожидается передача кадра-подтверждения.

В отличие от Wi-Fi, механизм определения занятости среды в LTE-LAA опирается только на мощность сигнала в канале. В частности, канал считается занятым, если мощность передачи сигнала в канале превышает порог $t_{ED}^L = -72\text{dBm}$ детектирования энергии.

Очевидно, что использование в LTE-LAA механизма определения занятости среды, аналогичного используемому в сетях Wi-Fi, является, на первый взгляд, очевидным решением, обеспечивающим справедливое совместное существование обеих технологий. Однако, для этого устройствам LTE-LAA было бы необходимо, во-первых, синхронизироваться на преамбулу Wi-Fi-кадра, и, во-вторых, использовать в начале передачи преамбулу Wi-Fi, на что консорциум 3GPP не пойдет в силу различных причин.

Вообще говоря, консорциум 3GPP и рабочая группа IEEE 802.11, занимающаяся стандартизацией Wi-Fi, пробовали договориться по этому вопросу и другим проблемам совместного существования LTE-LAA и Wi-Fi в течение более чем трех лет [6], но это привело лишь к регулярному обмену официальными заявлениями о сотрудничестве (англ. liaison statement), в которых обе стороны по большей части придерживались своих, противоположных взглядов на проблему. В результате, осознав малую эффективность подобных затяжных переговоров, рабочая группа IEEE 802.11 решила вести дискуссию с комитетом ETSI BRAN, занимающимся разработкой законодательных требований по использованию нелицензируемого диапазона 5 ГГц в странах ЕС [7], которые являются одним из наиболее важных рынков как для Wi-Fi, так и для LTE.

2.2. Использование резервирующего сигнала сетями LTE-LAA

Теперь перейдем к рассмотрению того, как метод доступа CSMA/CA реализован в нисходящем канале сетей Wi-Fi и LTE-LAA.

В современных сетях Wi-Fi используется реализация метода доступа CSMA/CA под названием EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access). При использовании механизма EDCA перед совершением каждой попытки передачи кадра данных устройство Wi-Fi выполняет процедуру отсрочки. Для этого сначала счетчик отсрочки инициализируется случайным целым числом, равномерно распределенным на интервале $[0, W - 1]$, где W – текущее значение конкурентного окна. Счетчик отсрочки уменьшается на 1 каждый раз, когда канал считается свободным в течение слота отсрочки длительностью $\sigma = 9$ мкс. В противном случае, т.е. если канал занят, счетчик отсрочки замораживается до тех пор, пока канал снова не станет свободным в течение интервала *AIFS*.

Как только значение счетчика отсрочки достигает нуля, устройство Wi-Fi совершает попытку передачи кадра данных (или последовательности кадров данных), длительность которой

с учетом передачи кадра-подтверждения не превышает значения $TXOP\ limit$. Если попытка была успешной, т.е. если был получен кадр-подтверждение, текущее значение W конкурентного окна устанавливается равным минимальному значению W_{min} . Если же кадр-подтверждение не был получен, то попытка передачи считается неуспешной, и значение конкурентного окна становится равным $W = \min(2W, W_{max})$, где W_{max} – максимальное значение величины конкурентного окна.

Значения параметров EDCA (W_{min} , W_{max} , $TXOP\ limit$) устанавливаются в зависимости от того, к какой из категорий доступа (англ. Access category, AC) принадлежит трафик.

При использовании механизма EDCA возможны коллизии при передаче кадров, когда, например, счетчик отсрочки достигает нуля одновременно у двух и более устройств Wi-Fi. Для того чтобы уменьшить длительность коллизий, а также для уменьшения влияния проблемы скрытых станций, устройства Wi-Fi могут использовать механизм RTS/CTS. При использовании этого механизма после выполнения процедуры отсрочки устройство Wi-Fi посылает короткий служебный кадр RTS (англ. Request to send) получателю кадра данных. Получив RTS, устройство-получатель отправляет короткий служебный кадр CTS (англ. Clear to send) в случае, если канал свободен. Передача кадра данных начинается только после получения кадра CTS. Как итог, использование этого механизма приводит к тому, что в коллизию могут попадать только служебные кадры RTS, которые имеют небольшую длительность.

Реализация метода доступа CSMA/CA в нисходящем канале сетей LTE-LAA получила название LBT (англ. Listen before talk). Механизм LBT имеет много общего с механизмом EDCA, однако существует ряд значительных отличий.

В частности, аналогично EDCA, механизм LBT использует процедуру отсрочки. Однако, несмотря на то что механизм LBT определяет 4 аналогичные категории трафика, некоторые значения параметров существенно отличаются. Так, например, значение по умолчанию параметра $TXOP\ limit$ (в LBT он имеет обозначение T_{mcot}), определяющего максимальную длительность непрерывной передачи, в стандарте Wi-Fi не превышает 4 мс для всех типов трафика, в то время как в LTE-LAA для некоторых типов трафика оно равно 8 мс.

Помимо этого, в связи с тем, что часть служебной информации LTE-LAA передается в канале PCC, находящемся в лицензируемом диапазоне, передачи данных LTE-LAA могут начинаться только на границе временных слотов в лицензируемой полосе, следующих с периодом 500 мкс. Спецификация LTE не дает однозначной рекомендации того, что базовая станция LTE-LAA должна делать, если процедура отсрочки завершилась, но ближайшая граница слотов еще далеко. Одним из возможных решений этой проблемы, которое неявно подразумевается 3GPP [8] и используется в литературе и оценочных натурных экспериментах, является посылка резервирующего сигнала вплоть до ближайшей границы слотов в PCC для того, чтобы не допустить занятия канала другими устройствами, см. рис. 1.

Использование резервирующего сигнала в сетях LTE-LAA, даже не закрепленное в спецификации LTE, вызвало сильную критику рабочей группы IEEE 802.11 [9], занимающейся стандартизацией Wi-Fi. Попытавшись договориться с 3GPP [6] и не придя к соглашению, рабочая группа IEEE 802.11 обратилась в комитет ETSI BRAN для того, чтобы на уровне европейского законодательства запретить или существенно ограничить длительность резервирующего сигнала.

Рассмотрим более подробно аргументы против использования резервирующего сигнала, приводимые группой IEEE 802.11. Во-первых, так как резервирующий сигнал не описан в спецификации LTE, он не может быть использован для передачи каких-либо полезных данных, так как пользовательские устройства не обязаны уметь декодировать сигналы, которые не описаны в рамках их спецификации. Таким образом, единственной целью резервирующего сигнала является блокировка доступа к каналу для станций Wi-Fi. Во-вторых, в текущей вер-

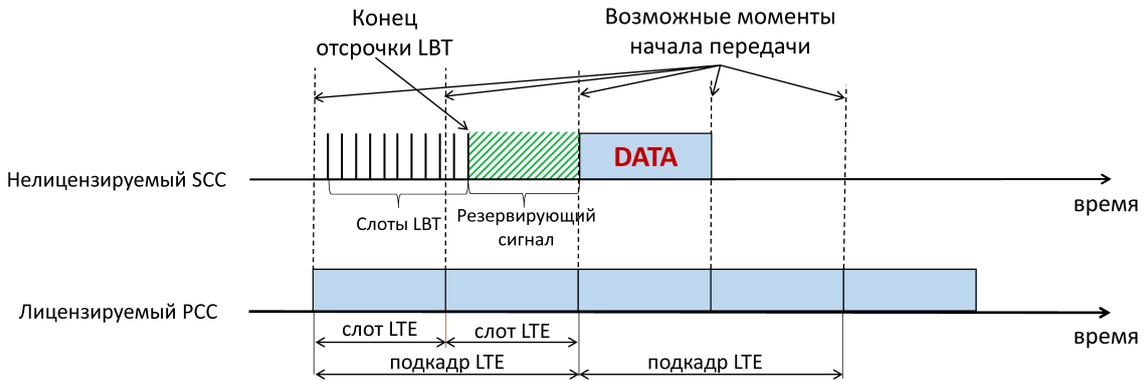


Рис. 1. Использование резервирующего сигнала в сетях LTE-LAA

сии законодательных ограничений в странах ЕС [3] говорится, что устройству, работающему в нелицензируемом диапазоне 5 ГГц, разрешено передавать либо пользовательские данные, либо служебные сигналы, входящие в стандарт/спецификацию технологии передачи данных. Очевидно, что резервирующий сигнал не подпадает под эти определения. Кроме того, устройство должно эффективно использовать полосу, а резервирующий сигнал, длительность которого может достигать 500 мкс, по сути несет в себе только один бит информации, что очень неэффективно.

На данный момент, дискуссия в комитете ETSI BRAN по поводу резервирующего сигнала не закончена.

В будущих версиях спецификации LTE планируется разрешить начинать передачу в нелицензируемом спектре не только на границе слотов, а в моменты начала ряда OFDM-символов в лицензируемой частоте, т.е. с периодом порядка 80 мкс. Однако, во-первых, несмотря на явные плюсы данного решения с точки зрения гибкости механизма доступа к нелицензируемой полосе, он имеет и ряд недостатков. Так, при использовании большого числа стартовых позиций пользовательское устройство должно пытаться детектировать начало кадра на всех возможных позициях, а базовая станция должна заранее кодировать кадры данных для разных стартовых позиций, так как все они имеют разную длину и базовая станция заранее не может знать о том, когда закончится процедура отсрочки. Как можно заметить, это значительно увеличивает сложность построения устройств LTE-LAA, поэтому внесение этих изменений в стандарт LTE все еще остается в стадии обсуждения.

Кроме этого, существенно отличается механизм уведомления об успешности/неуспешности попытки передачи данных. В отличие от Wi-Fi, где подтверждение о приеме кадра данных посылается в том же канале спустя интервал $SIFS = 16$ мкс после его получения, в LTE-LAA подтверждения о приеме данных отправляются в PCC, находящемся в лицензируемом диапазоне, что приводит к задержке порядка 5 мс, вызванной работой протокола HARQ.

В дополнение к этому, в спецификации LTE-LAA отсутствует механизм RTS/CTS, а также существенно отличается механизм определения коллизии, т.е. события, при наступлении которого необходимо увеличивать конкурентное окно W . В сетях Wi-Fi устройство считает, что произошла коллизия, если после передачи данных не пришел пакет-подтверждение.

При разработке механизма определения коллизии в сетях LTE-LAA необходимо было учесть особенности используемого механизма подтверждения данных. В отличие от Wi-Fi в LTE-LAA передача данных состоит из последовательно идущих подкадров длительностью 1 мс, каждый из которых состоит из одного или нескольких транспортных блоков, предназначенных различным пользователям. Транспортные блоки в каждом подкадре декодируются получателями независимо, при этом подтверждение посылается на каждый успешно или unsuccessfully приня-

тый транспортный блок. Вследствие этого на каждую передачу LTE-LAA приходит множество подтверждений, и разработчикам спецификации необходимо было определить, во-первых, подтверждения на какой подкадр учитывать при определении коллизии, и, во-вторых, при каком проценте негативных подтверждений механизм будет детектировать, что произошла коллизия, а не просто искажения сигнала в связи с затуханием и/или замиранием в канале.

Что касается первого вопроса, консорциум 3GPP рассматривал три основных варианта решения: учитывать только первый подкадр передачи, только последний подкадр передачи, или все подкадры сразу. Приняв во внимание тот факт, что кадры данных, которые оказались в коллизии, могут иметь разную длину, а также то, что все соревнующиеся за канал устройства используют метод доступа CSMA/CA, было принято решение о том, что механизм определения коллизий LTE-LAA будет учитывать только первый подкадр передачи [10].

Решение второго вопроса, т.е. определение того, при каком проценте Z негативных подтверждений механизм определения коллизии ее детектирует, оказалось менее тривиальным. Помимо всего прочего, необходимо было учесть особенность механизма выбора сигнально-кодированной конструкции (СКК) в LTE, согласно которой для передачи выбирается СКК, имеющая наибольшую скорость при условии вероятности ошибки на транспортный блок не более 10%, т.е. значения $Z < 10\%$ не имеют смысла из-за высокой вероятности ошибочного детектирования. В ходе работы над спецификацией рассматривались различные значения, в частности, $Z = \{10, 50, 75, 100\}$ [11], однако в итоге был выбран компромиссный вариант [12], согласно которому конкурентное окно W увеличивается в случае, если более $Z = 80\%$ HARQ-подтверждений были негативными.

Подведем некоторые итоги. Несмотря на то, что механизмы доступа в нисходящем канале и сетей Wi-Fi, и сетей LTE-LAA построены на основе CSMA/CA и используют механизм двойной экспоненциальной отсрочки, они имеют множество различий. Влияние некоторых из этих различий на производительность обеих сетей и справедливость разделения ресурсов уже было частично изучено в литературе, например, в работах [13–15] исследовалось взаимодействие сетей при использовании различных значений параметров механизмов определения занятости канала. В тоже самое время, некоторым важным аспектам, например, сравнению производительности LTE-LAA и Wi-Fi в случае, если LTE-LAA будет использовать резервирующий сигнал ограниченной длительности, не было уделено достаточно внимания. Кроме того, в большинстве работ, например, в [16], считается, при коллизии кадров LTE-LAA и Wi-Fi она детектируется обоими станциями. Однако это может быть не так, если устройства Wi-Fi используют кадр RTS для уменьшения длительности коллизий, так как в сетях LTE-LAA аналогичного механизма не предусмотрено. В результате при коллизии кадра RTS и передачи резервирующего сигнала LTE-LAA в некоторых случаях могут наблюдаться «асимметричные» коллизии. Если длительность кадра RTS меньше, чем длительность резервирующего сигнала, то базовая станция LTE-LAA, в отличие от устройства Wi-Fi, не сможет задетектировать коллизию, что в долгосрочной перспективе приведет к несправедливому разделению частотных ресурсов.

3. ОДНОВРЕМЕННАЯ ПЕРЕДАЧА В НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛАХ

Очевидным способом увеличения пропускной способности сети при фиксированной ширине канала является параллельная передача в нескольких каналах. Заметим, что из-за использования CSMA/CA передача в разных каналах должна начинаться одновременно из-за эффекта утечки мощности вне рабочей полосы (англ. RF leakage). Этот эффект приводит к тому, что если устройство передает в одном канале, то соседние каналы будут считаться занятыми до конца этой передачи. Рассмотрим, как реализованы механизмы одновременной передачи в нескольких каналах нелицензируемого диапазона в сетях Wi-Fi и LTE-LAA.

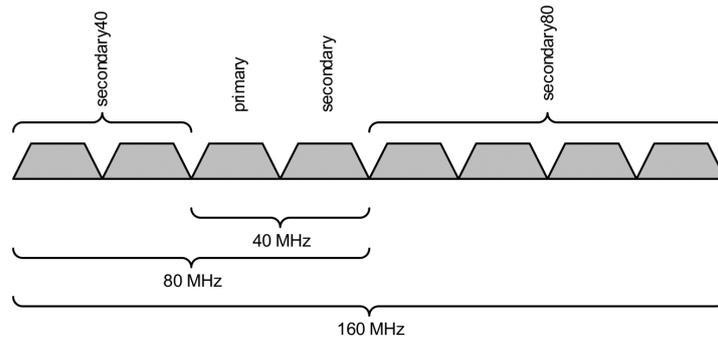


Рис. 2. Иерархическое разделение каналов в сетях Wi-Fi

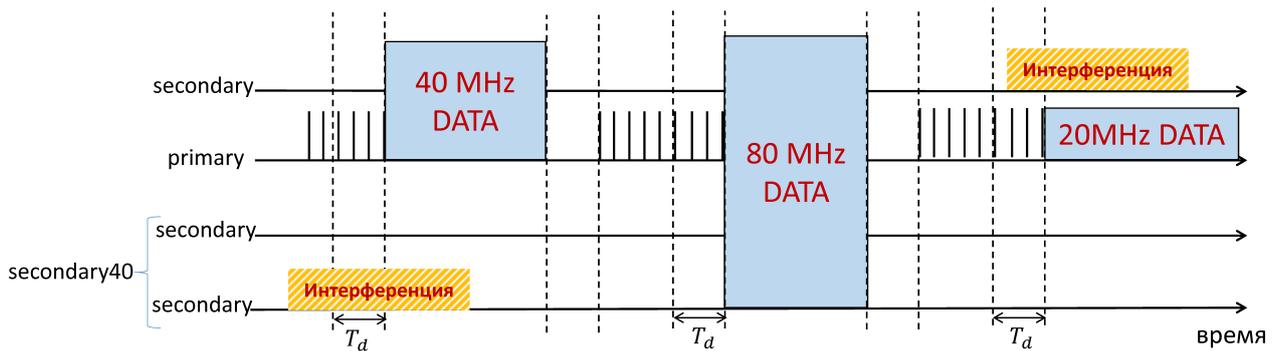


Рис. 3. Одновременная передача в нескольких каналах в сетях Wi-Fi

Изначально сети Wi-Fi вели передачу данных, используя частотный канал шириной 20 МГц. Для увеличения пропускной способности была добавлена возможность одновременной передачи в 2, 4 или 8 смежных частотных каналах, используя механизм channel bonding. При использовании этого механизма устройство Wi-Fi выполняет процедуру отсрочки только в одном канале шириной 20 МГц, который называется главным каналом (англ. primary channel). В момент завершения процедуры отсрочки в главном канале устройство Wi-Fi проверяет, были ли заняты вторичные каналы (англ. secondary channel) в течение предшествующего интервала $T_d = 25$ мкс, при этом каналы разбиваются по иерархическому принципу на группы под названиями secondary, secondary40, secondary80, см. рис. 2.

В результате устройство последовательно рассматривает группы вторичных каналов. Если канал secondary оказался незанятым, то устройство может использовать и его для передачи. Если кроме того все каналы группы secondary40 оказались свободны, то устройство может использовать для передачи и их. В случае, если незаняты все вторичные каналы, то устройство может задействовать все 8 каналов для передачи.

Отметим, что при объединении каналов устройство Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n/ac формирует единый кадр физического уровня, занимающий всю полосу частот, поэтому передача всегда ведется только в смежных каналах. Исключением из этого правила является только параллельная передача в двух несмежных 80 МГц каналах, один из которых является secondary80 каналом. Кроме того, любые другие комбинации объединения каналов запрещены².

² Следует отметить, что в новой версии стандарта Wi-Fi, получившей название IEEE 802.11ax и находящейся в стадии активной разработки на момент написания данной работы, это ограничение убрано для многопользовательских передач. Вследствие этого устройство стандарта IEEE 802.11ax после завершения процедуры

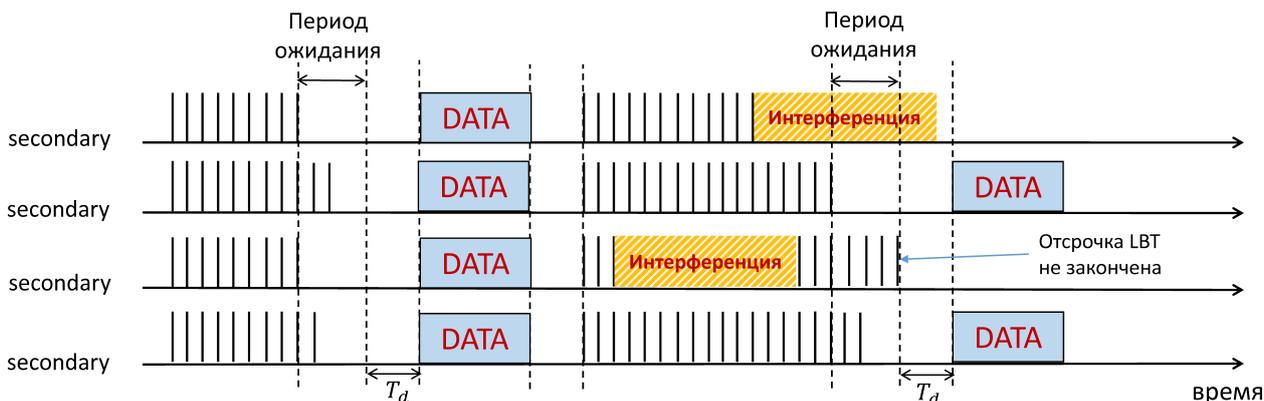


Рис. 4. Одновременная передача типа А в нескольких каналах в сетях LTE-LAA

Базовая станция LTE-LAA также имеет возможность объединить несколько частотных каналов для одновременной передачи данных в них с помощью механизма carrier aggregation, который является значительно более гибким по сравнению с аналогичным механизмом в сетях Wi-Fi. В LTE-LAA при одновременной передаче в нескольких каналах не происходит формирование единого кадра, а передаются одновременно одиночные кадры данных в каждом из объединенных каналов. В связи с этим в сетях LTE-LAA нет ограничения на объединение только смежных каналов, которое действует в Wi-Fi, а также жесткого ограничения возможных конфигураций объединения каналов. В частности, текущая версия LTE-LAA поддерживает объединение до 31 канала в нелицензируемом диапазоне шириной 20 МГц каждый.

Что касается механизма доступа к каналу, в спецификации LTE-LAA описаны 2 типа процедуры доступа при использовании многоканальной передачи, каждая из которых имеет два подтипа. Рассмотрим каждую из процедур более подробно.

При использовании процедуры типа А базовая станция LTE-LAA выполняет параллельно процедуру отсрочки в каждом канале, рассматриваемом для многоканальной передачи. При использовании подтипа А1 значение конкурентного окна выбирается для каждого канала независимо от других каналов. При использовании подтипа А2 в качестве значения текущего конкурентного окна выбирается максимальное значение среди объединяемых каналов. В обоих случаях в каждом канале счетчики отсрочки инициализируются из текущего значения конкурентного окна независимо друг от друга. После завершения многоканальной передачи типа А необходимо заново начать процедуру отсрочки в каждом канале.

Очевидно, что при использовании механизмов объединения каналов типа А из-за разных начальных значений счетчика отсрочки, а также из-за различной занятости каналов, процедура отсрочки в объединяемых каналах заканчивается неодновременно. Решение о том, что делать в таком случае, выходит за рамки спецификации LTE-LAA. В ходе разработки стандарта обсуждался следующий вариант реализации механизма типа А [17, 18], который, по-видимому, будет взят за основу при разработке устройств. Согласно [17, 18], после завершения процедуры отсрочки хотя бы в одном канале начинается так называемый период ожидания (англ. defer period) длительностью несколько слотов отсрочки, см. рис. 4. В момент окончания периода ожидания начинается многоканальная передача с использованием тех каналов, в которых процедура отсрочки уже завершилась, но при этом канал все еще свободен.

При использовании механизма объединения каналов типа В, процедура отсрочки выполняется только в одном (главном) объединяемом канале, в то время как все остальные каналы

отсрочки в главном канале может начать передачу данных в произвольном наборе свободных вторичных каналов без учета вышеописанной иерархии.

прослушиваются только в течение интервала T_d до начала передачи. В результате, передача ведется в главном канале, а также в тех каналах, которые оказались незанятыми в течение интервала T_d до начала передачи. В отличие от механизма объединения каналов в Wi-Fi, где главный канал обычно не меняется со временем, при использовании механизма типа В базовая станция может либо выбрать главный канал равновероятно среди объединяемых каналов перед каждой передачей, либо выбрать его по какому-либо алгоритму, но не чаще 1 раза в секунду.

Аналогично механизму типа А, тип В имеет два подтипа. При использовании подтипа В1 для всех каналов используется единое значение конкурентного окна, при этом механизм определения коллизий ее детектирует в случае, если средняя доля негативных подтверждений, пришедших на первый кадр многоканальной передачи в каждом канале, превышает $Z = 80\%$.

При использовании подтипа В2 значение конкурентного окна считается независимо в каждом из объединяемых каналов, т.е. коллизия в каждом из объединяемых каналов определяется согласно правилам, описанным в разделе 2.2. При этом счетчик отсрочки в главном канале инициализируется с использованием максимального значения текущего конкурентного окна среди объединяемых каналов.

Подводя итог, и Wi-Fi, и LTE-LAA имеют механизмы объединения частотных каналов для одновременной передачи данных, которые необходимы для эффективного использования частотных ресурсов в диапазоне 5 ГГц. Тем не менее, несмотря на то что спецификация LTE-LAA описывает 4 варианта механизма объединения, но при этом не дает рекомендаций по поводу того, в каких условиях какой вариант необходимо использовать. Кроме того, некоторые детали, напрямую влияющие на эффективность механизма, также нуждаются в настройке. Например, открытой задачей является выбор длительности периода d ожидания при использовании механизма объединения типа А.

Кроме того, насколько известно авторам данной работы, в литературе еще не было исследовано совместное существование сетей LTE-LAA и Wi-Fi при использовании многоканальных передач.

4. МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП В ВОСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ LTE-LAA

В отличие от сетей Wi-Fi, где механизм доступа к каналу EDCA используется как в нисходящем, так и в восходящем канале, в сетях LTE-LAA механизм доступа в восходящему каналу имеет существенные различия по сравнению с нисходящим каналом. Это связано с тем, что, в отличие от Wi-Fi, все передачи данных в восходящем канале сетей LTE контролируются базовой станцией, поэтому пользовательское устройство может начать передачу, только предварительно получив разрешение на передачу.

Процесс передачи данных в нелицензируемой полосе в восходящем канале изображен схематично на рис. 5.

Как только на устройстве пользователя появляются данные на передачу, оно уведомляет об этом базовую станцию, используя восходящий контрольный канал (PUSCH).

После этого базовая станция с помощью процедуры отсрочки посылает в нисходящем канале LTE-LAA разрешение на передачу, называемое грантом (англ. grant), в котором описаны все параметры будущей передачи в восходящем канале, включая номера подкадров и транспортных блоков, в которых она запланирована, используемую СКК и другую информацию. Из-за того, что пользовательскому устройству необходимо время на то, чтобы декодировать информацию, содержащуюся в гранте, а также закодировать саму передачу данных в восходящем канале, минимальное время между грантом и разрешенными им для передачи подкадрами составляет 4 мс.

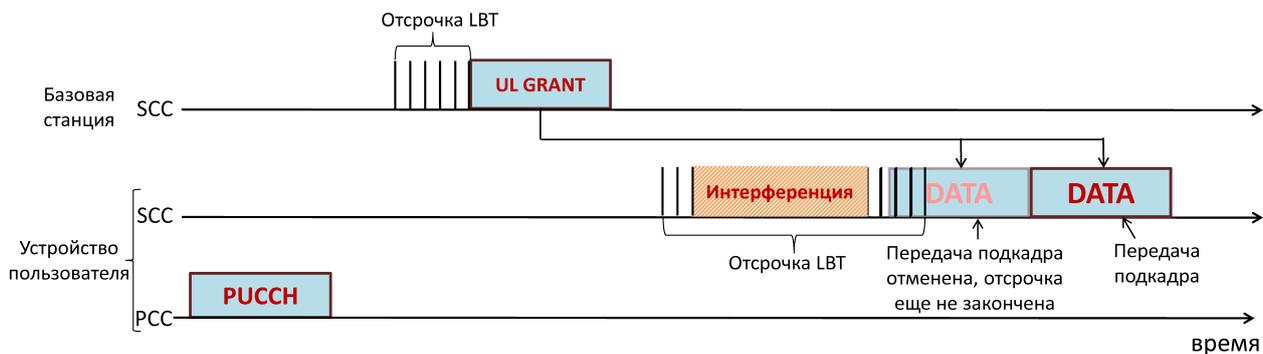


Рис. 5. Передача в восходящем канале в сетях LTE-LAA

Получив разрешение, перед передачей данных пользовательское устройство должно выполнить процедуру отсрочки, аналогичную описанной в главе 2.2.

Очевидно, что в некоторых случаях из-за интерференции пользовательское устройство может не успеть закончить процедуру отсрочки до начала подкадра i , назначенного в гранте. В этом случае пользовательское устройство отказывается от передачи подкадра i , но продолжает процедуру отсрочки. Как только устройство пользователя завершило процедуру отсрочки, оно может начать передачу начиная с ближайшего кадра в случае, если канал является незанятым в течение интервала T_d непосредственно перед началом подкадра.

Как несложно заметить, описанный в спецификации LTE-LAA механизм доступа к среде в восходящем канале имеет ряд недостатков. В частности, для того чтобы передать данные в восходящем канале, необходимо дважды получить доступ к каналу с помощью механизма LBT, что существенно повышает задержку при передаче данных и снижает пропускную способность. Кроме того, открытым остается вопрос о планировании передач (т.е. назначении подкадров и транспортных блоков для передачи) в восходящем канале с точки зрения задержки при передаче и минимизации количества посылаемых грантов. В литературе была найдена всего одна работа [19] посвященная данной тематике, но в ней рассмотрен предельно простой сценарий, в котором каждый подкадр в восходящем канале выделяется только одному пользователю.

При определенных условиях базовая станция может разрешить использование упрощенной процедуры отсрочки с прослушиванием только интервала T_d перед передачей и без использования процедуры отсрочки. Например, такая упрощенная процедура может использоваться в случае, если передача в восходящем канале будет совершена через интервал T_d после конца передачи в нисходящем канале, причем суммарная длительность этих передач не превышает ограничение на максимальную длительность T_{mcot} передачи данных одним устройством.

Стоит отметить, что в настоящее время в консорциуме 3GPP ведется разработка механизма доступа в восходящем канале без использования грантов, получившего название AUL (англ. Autonomous UpLink) [20], однако она еще не завершена. Очевидно, что применение такого механизма доступа могло бы существенно повысить эффективность работы LTE-LAA в восходящем канале. Единственной работой, рассматривающей варианты реализации AUL является [21].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен сравнительный обзор механизмов доступа к среде в нелицензируемом диапазоне 5 ГГц в сетях Wi-Fi и LTE-LAA. Обозначены открытые проблемы, возникающие при совместном существовании сетей LTE-LAA и Wi-Fi. В частности, подробно описаны

различия механизмов доступа в нисходящем канале и проблема влияния резервирующего сигнала на пропускную способность и справедливость распределения ресурсов в сетях LTE-LAA и Wi-Fi. Приведено сравнение механизмов доступа при одновременной передаче в нескольких частотных каналах, обозначены ключевые проблемы их применения в сетях LTE-LAA. Рассмотрен описанный в спецификации LTE-LAA механизм доступа к среде в восходящем канале, выделены его основные недостатки, а также кратко описано возможные направления дальнейшего развития механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco Cisco Visual Networking Index. Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper, 2016 // Online: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_in/innovation/enterprise/assets/mobile-white-paper-c11-520862.pdf.
2. GSA Global mobile Suppliers Association. Progress to Gigabit LTE Networks – May Update, 2018 // Online: <https://gsacom.com/paper/progress-gigabit-lte-networks-may-update/>.
3. ETSI EN. 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. Jindal N, Breslin D. LTE and Wi-Fi in unlicensed spectrum: A coexistence study // Google white paper. – 2015.
5. LTE on License-exempt Spectrum / Jingjing Zhang, Mao Wang, Min Hua et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 20, no. 1. – P. 647–673.
6. Myles A. A discussion of LS from 3GPP RAN1/RAN4 in May 2017 in response to IEEE 802 LS in March 2017. – URL: <https://mentor.ieee.org/802.19/dcn/17/19-17-0062-01-0000-a-discussion-of-most-recent-ran1-ls.pptx>.
7. Myles A. Proposed Liaison Statement to ETSI BRAN in relation to adaptivity. – URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-0708-04-coex-proposed-liaison-statement-to-etsi-bran-in-relation-to-adaptivity.docx>.
8. 3GPP R1-156862: Reservation signal in LAA : Rep. / LG Electronics : 2015. – November.
9. Myles A. On transmission of reservation signals by LAA. – URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/17/11-17-1759-00-coex-on-transmission-of-reservation-signals-by-laa.docx>.
10. 3GPP R1-157099: Remaining details of CWS adjustment based on HARQ-ACK feedback : Rep. / ETRI : 2015. – November.
11. 3GPP R1-157833: WF on Contention Window Adaptation : Rep. / ETRI : 2015. – November.
12. 3GPP R1-160236: Final Report of RAN1 83 meeting : Rep. / ETSI : 2016. – February.
13. Impact of Changing Energy Detection Thresholds on Fair Coexistence of Wi-Fi and LTE in the Unlicensed Spectrum / Muhammad Iqbal, Cholilur Rochman, Vanlin Sathya, Monisha Ghosh // Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2017 / IEEE. – 2017. – P. 1–9.
14. Coexistence of Wi-Fi and LAA Networks with Adaptive Energy Detection / Li Li, James P Seymour, Leonard J Cimini, Chien-Chung Shen // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2017.
15. LTE Transmission in Unlicensed Bands: Evaluating The Impact Over Clear Channel Assessment / Babak Mafakheri, Leonardo Goratti, Roberto Riggio et al. // 27th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2018). – 2018.
16. Song Yujae, Sung Ki Won, Han Youngnam. Coexistence of Wi-Fi and Cellular with Listen-before-talk in Unlicensed Spectrum // IEEE Communications Letters. – 2016. – Vol. 20, no. 1. – P. 161–164.
17. 3GPP R1-152784: Multi-carrier LBT operation for LAA : Rep. / Qualcomm : 2015. – May.

18. 3GPP R1-154342: Multicarrier operation for LAA DL : Rep. / Huawei, HiSilicon : 2015. — August.
19. Uplink Performance of Enhanced Licensed Assisted Access (eLAA) in Unlicensed Spectrum / Reem Karaki, Jung-Fu Cheng, Evanny Obregon et al. // Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE / IEEE. — 2017. — P. 1–6.
20. 3GPP R1-1713524: Channel access for autonomous UL access : Rep. / Samsung : 2017. — August.
21. Karaki Reem, Mukherjee Amitav, Cheng Jung-Fu. Performance of Autonomous Uplink Transmissions in Unlicensed Spectrum LTE // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference / IEEE. — 2017. — P. 1–6.

Coexistence of Wi-Fi and LTE-LAA Networks: Open Issues

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

Nowadays, the need in LTE network capacity increase is getting stronger every year. One of the main factors limiting the capacity growth of cellular networks is the scarcity of spectrum available for transmission. To solve this problem, LTE networks are going to exploit unlicensed frequency bands in 5 GHz spectrum, which are already being used by other technologies, e.g., Wi-Fi, using the new technology called LTE-LAA. This paper presents a comparative study of channel access methods for unlicensed spectrum described in the Wi-Fi standard and LTE-LAA specification, as well as their coexistence issues, which are currently open.

KEYWORDS: Wireless networks, coexistence, LTE-LAA, Wi-Fi.