

Исследование возможности использования нескольких каналов Wi-Fi в дуплексном режиме*

И.А. Левицкий¹, Я.Е. Окатьев^{1,2}
{levitsky, okatev}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет)

Аннотация Одной из ключевых технологий, предлагаемых для увеличения пропускной способности Wi-Fi сетей следующих поколений, является многоканальная передача, которую планируется реализовать в дополнении к стандарту 802.11be. Многоканальная передача позволяет использовать для передачи данных одновременно несколько каналов. Однако, одновременные прием и передача могут вызвать интерференцию на приемнике из-за перекрытия спектров сигналов. Спектральная маска сигнала, описываемая в стандарте 802.11, задает ограничение мощности только в некоторой области около центральной частоты, вне которой утечка энергии не регламентируется. Мощность интерференции зависит от выбора каналов и взаимного расположения антенн на устройстве. В рамках статьи исследуется влияние дуплексного режима на качество приема в зависимости от расположения антенн и расстояния между каналами. Для этого построена экспериментальная установка на базе двух программно-определяемых реконфигурируемых радиоустройств USRP-2944R. С ее помощью измерена доля успешно доставленных кадров и мощность интерференции на принимающем интерфейсе в зависимости от выбора каналов. Результаты экспериментов показывают, что имеется возможность выбирать каналы даже в пределах одного частотного диапазона для поддержки качественной дуплексной связи при многоканальной передаче.

* Исследование выполнено в ИПФИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00788).

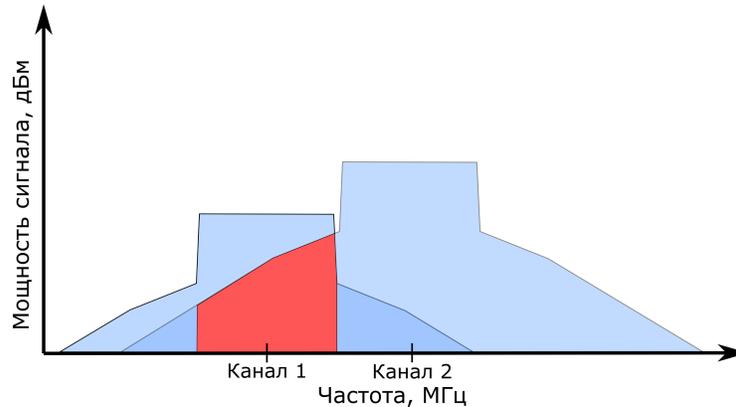


Рис. 1: Утечка энергии в соседний канал.

1 Введение

Благодаря введению новых технологий, с каждым поколением увеличивается пропускная способность сетей IEEE 802.11. В новом стандарте IEEE 802.11be предлагается использование технологии многоканальной передачи, которая позволяет передавать данные между устройствами одновременно по нескольким частотным каналам. Помимо увеличения пропускной способности это позволит уменьшить задержки в сети и повысить ее надежность [1]. Многоканальная передача предполагает два режима работы: синхронный и асинхронный. В синхронном режиме данные по всем каналам передаются в одном направлении (полудуплекс), в асинхронном направлении передачи может быть произвольным для каждого из каналов (дуплекс). Поскольку в асинхронном режиме каналы функционируют независимо друг от друга, теоретический прирост пропускной способности может составить до двух раз. Но так как спектр Wi-Fi сигнала неидеален, часть энергии сигнала выходит за границы используемого канала. Эта утечка энергии может приводить к невозможности корректного приема данных в соседних каналах (см. рис. 1). Для решения данной проблемы используется синхронный режим многоканальной передачи, однако такой режим имеет меньшую пропускную способность и требует более сложной организации системы доступа к каналу и управления сеансами передачи.

В работе рассматривается асинхронный режим работы многоканальной передачи, когда используется дуплексный режим в соседних каналах. Возможность использования данного режима зависит от уровня интерференции, который определяется архитектурой устройства и параметрами передачи. Задача данной работы состоит в определении минимального спектрального расстояния между каналами, позволяющего осуществлять обмен

кадрами в дуплексном режиме, в зависимости от взаимного расположения принимающих и передающих антенн, мощности интерференции и выбора сигнально-кодовой конструкции.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится описание литературы, затрагивающей проблему одновременной передачи данных в противоположных направлениях. В разделе 3 описываются проведенные эксперименты. Раздел 4 содержит численные результаты экспериментов и их анализ. Результаты работы резюмируются в разделе 5.

2 Обзор литературы

Явление утечки энергии в близко расположенных частотных каналах довольно широко известно. Спектр дискретизованного сигнала имеет бесконечную ширину и неизбежно влияет на другой одновременно передаваемый даже в другой частотной полосе сигнал. Для ограничения спектра сигнала используются фильтры, но они все равно допускают утечки энергии. Высококачественные фильтры для радиосигналов весьма дорогостоящие. Если речь идет о массовом производстве пользовательских устройств (например смартфонов, планшетов, ноутбуков с сетевыми картами), то цена устройства является одним из определяющих факторов при разработке.

С другой стороны, для обеспечения высокой пропускной способности беспроводного соединения требуется широкий частотный канал. По разным причинам иногда работать в непрерывном канале большой ширины не представляется возможным. Поэтому используется технология агрегации каналов, позволяющая вести передачу/прием в нескольких более узких каналах, в том числе и несвязных. Такая технология уже используется в сотовых сетях 4G [2], а в локальных сетях 802.11ac/ax [3,4] есть возможность передавать кадры в несвязной полосе 80+80 МГц, но только в полудуплексном режиме. Передача в режиме полного дуплекса в 802.11 до сих пор не поддерживалась. Впервые она появилась в готовящемся дополнении к стандарту 802.11be при внедрении технологии многоканальной передачи [1]. Для станций с поддержкой дуплексного режима должны соблюдаться определенные требования на уровень утечки энергии. В противном случае алгоритмы работы станций будут более сложны и менее производительны [5].

Появляется вопрос: в каких случаях дуплексный режим в станциях Wi-Fi возможен, а в каких нет. Есть предположение [6], что в каналах, расположенных в диапазонах 2,4 ГГц и 5 ГГц соответственно можно всегда осуществлять дуплексный режим, а в диапазонах 5 ГГц и 6 ГГц уже возможна утечка энергии. Другой источник [7] сообщает, что дуплексная передача данных в 160 МГц каналах в соседних диапазонах возможна, но зависит от конкретного расположения каналов в диапазонах. Также есть мнение, что

можно использовать дуплексный режим в одном диапазоне в далеко расположенных каналах. Но спектральное расстояние не является единственным значащим фактором [8]. Кроме него важна разница мощности между принимаемым сигналом и самоинтерференцией, а также скорость спада боковых лепестков (см. рис. 1). Величина этих параметров зависит от характеристик фильтра, а также от архитектуры устройства: использование одной или нескольких антенн, их взаимное расположение, и.т.д. Проблема заключается в отсутствии практических исследований, подтверждающих ту или иную точку зрения.

Анализ современной литературы показал, что отсутствуют исследования, изучающие вопрос возможности вести одновременные прием и передачу в нескольких каналах Wi-Fi устройствами. В данной работе впервые изучается возможность работы дуплексного режима в многоканальной передаче при использовании различных каналов в диапазоне 5 ГГц. В статье экспериментальным путем исследуется качество приема сигнала и уровень интерференции от утечки энергии в соседние каналы с учетом различных конфигураций передающих и принимающих антенн.

3 Постановка эксперимента

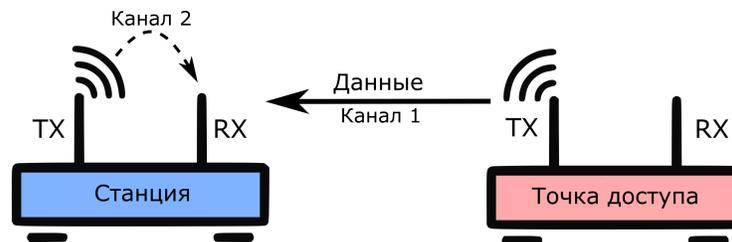


Рис. 2: Схема эксперимента.

Рассмотрим сеть из двух устройств: станция и точка доступа, имеющих по два радиоинтерфейса (рис. 2). Точка доступа передает на первый радиоинтерфейс станции некоторые данные в определенном частотном канале. В асинхронном режиме многоканальной передачи оба радиоинтерфейса устройств работают независимо, то есть станция параллельно с приемом на первом радиоинтерфейсе может также принимать либо передавать данные на точку доступа при помощи второй антенны в другом частотном канале. Однако при одновременных приеме и передаче с двух антенн на принимающем радиоинтерфейсе станции может возникнуть интерференция, поэтому

выбор второго частотного канала для передачи от станции к точке доступа влияет на качество приема данных от точки доступа.

Для моделирования описанной проблемы используется установка, состоящая из двух программно-определяемых радиоустройств USRP-2944R, для управления которыми используется LabVIEW Communications 802.11 Application Framework. Этот фреймворк реализует упрощенный функционал по обмену данными с устройствами согласно стандарту 802.11a/ас. По умолчанию Application Framework не позволяет использовать разные частоты для приема и передачи, поэтому в рамках работы он был модифицирован. Была добавлена отдельная настройка частот для каждого радиointерфейса, выбор ширины канала, в котором измеряется мощность сигнала, и возможность автоматизации экспериментов.

Появление интерференции возможно, когда в один момент времени на одной из близко расположенных антенн происходит отправка кадра, а на другой — получение. Для этого со второго радиointерфейса станции ведется непрерывная передача пакетов. Первый радиointерфейс станции настроен на канал, в котором ведет передачу кадров точка доступа. Размер полезной нагрузки в кадрах составляет 4000 байт. Длительность таких кадров, при использовании MCS 0 – 7 (802.11ac), составляет не менее 540 мкс, что сопоставимо с характерной длительностью агрегированных кадров. Кроме того, она значительно превышает временной промежуток между кадрами. Таким образом, кадры всегда хотя бы частично накладываются друг на друга во времени, создавая условия для возникновения интерференции (рис. 3). Поскольку расстояние между кадрами в двух каналах различается, наложение кадров друг на друга происходит в произвольной последовательности, что приближает эксперимент к реальным условиям, когда пакеты в сети отправляются в случайные моменты времени.

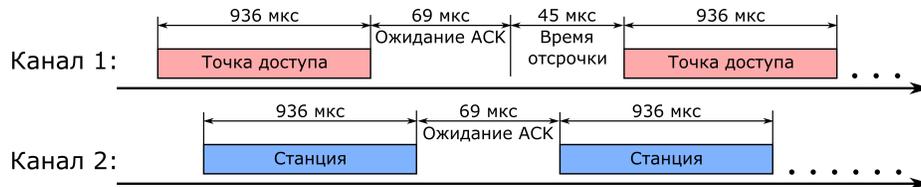


Рис. 3: Кадры в каналах.

4 Численные результаты

4.1 Общие параметры

Для моделирования описанной выше ситуации необходимо, чтобы станция непрерывно передавала пакеты с одного из радиointерфейсов. Возможность передачи определяется по уровню мощности в канале: если он выше энергетического порога, то канал считается занятым и передача не начинается. Для станции пороговое значение устанавливается в 0 дБм, чтобы канал все время считался свободным. Также для обоих устройств включается режим обратной связи для возможности приема во время передачи, отключается использование RTS/CTS и функция повторной отправки. Число отправляемых пакетов за секунду выбирается таким, чтобы система пришла в насыщение.

4.2 Определение качества передачи в дуплексном режиме

Таблица 1: Эксперименты по определению качества каналов

Эксперимент	Влияние мощности	Влияние MCS
Ширина канала, МГц	20	
Частота приема станции, МГц	5730	
Частоты передачи станции	5660 – 5800	
Мощность передачи станции, дБм	1, 3, 6	6
Мощность передачи точки доступа, дБм	6	
MCS	4	0 – 4
Измерения	15 с/канал	15 с/канал

В данных экспериментах измеряется доля успешно полученных станцией кадров. Устройства располагаются на двух столах на расстоянии около 1,6 м. Расстояние между антеннами каждого устройства фиксированное и составляет 15 см, все антенны параллельны друг другу. Канал, в котором передает станция варьируется, принимающий радиointерфейс станции настраивается на канал передачи точки доступа, который зафиксирован. В диапазоне 5 ГГц, в отличие от 2,4 ГГц, каналы не пересекаются, и минимальный шаг между каналами (разница центральных частот) равен ширине канала. Но для измерений использовалось более мелкое разбиение с шагом 5 МГц. Используемый диапазон каналов для эксперимента лежит наибольшим непрерывным отрезком разрешенных в России нелицензируемых каналов. В течение некоторого времени точка доступа отправляет кадры, и по числу

полученных вычисляется доля успешных передач. Мощность 6 дБм — максимально возможная для передачи USRP в диапазоне 5 ГГц. Эта мощность соответствует большей мощности передачи точки доступа, находящейся на большем расстоянии от станции. Подробные условия каждого из экспериментов указаны в таблице 1.

В первом эксперименте (см. рис. 4) определяется доля успешно доставленных кадров в зависимости от разницы частот между принимающим и передающим каналом. Измерения проводятся для нескольких значений мощности передачи станции.

При данном расположении антенн для приема минимальной доли кадров требуется, чтобы расстояние между каналами составляло не менее 40 МГц, то есть прием в пересекающихся и в соседних каналах невозможен. Если расстояние между каналами превышает 55 МГц, то наличие факта передачи практически не сказывается на качестве приема. В канале, отстоящем как минимум на 60 МГц, от передающего, даже при самой большой мощности интерференции влияния на качество приема не оказывается.

Также важным фактором, влияющим на помехоустойчивость канала, является выбор сигнально-кодовой конструкции (англ. modulation and coding scheme, MCS). Во втором эксперименте исследовалась зависимость доли успешно доставленных кадров от выбора MCS для сигнала, передающегося с точки доступа на станцию. Результаты представлены на рис. 5. Передача данных в пересекающихся и соседних каналах невозможна ни при каких значениях MCS. При увеличении номера MCS число успешно доставленных кадров при одинаковых условиях снижается. Если принимающий канал отстоит от передающего на 40 МГц, то пропускная способность для MCS 0 превышает 80%, для MCS 1 составляет не более 15%, для других значений успешный прием кадров все еще невозможен. При использовании каналов, отстоящих на более, чем на 60 МГц, от передающего, пропускная способность каналов, использующих MCS 0 – 4, приближается к 100%, для больших MCS в измеряемом диапазоне пропускная способность не превышала 60%. Таким образом, если устройство использует две разные антенны для многоканальной передачи, чтобы обеспечить качественную дуплексную связь (как при отсутствии интерференции) при использовании MCS 0 – 4, необходимо выбирать каналы, отстоящие друг от друга не менее, чем на 60 МГц.

Также дополнительно проводились эксперименты в диапазоне 2,4 ГГц, которые привели к выводам, что организовать дуплексную многоканальную передачу только в этом диапазоне невозможно в виду его малой ширины и большого количества устройств, работающих в нем. Его использование возможно в сочетании с другими диапазонами 5 и 6 ГГц. Если принимающие

и передающие каналы будут находиться в разных диапазонах, они не будут оказывать никакого негативного влияния друг на друга.

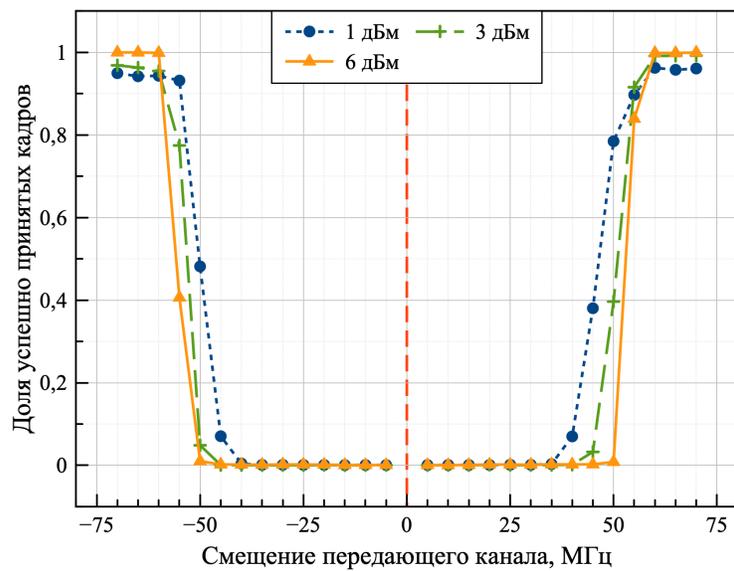


Рис. 4: Влияние мощности интерференции на успешную доставку кадров в дуплексном режиме.

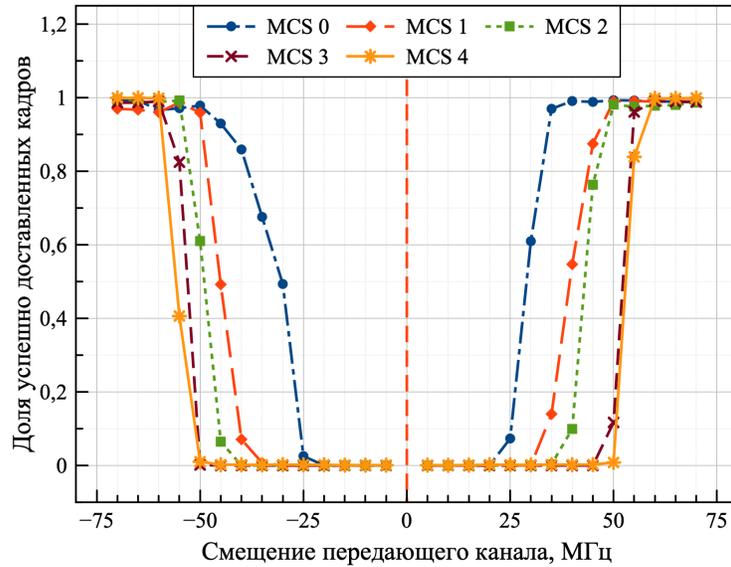


Рис. 5: Влияние выбора MCS на успешную доставку кадров в дуплексном режиме.

4.3 Определение мощности интерференции при использовании дуплексного режима

Следующим шагом проводится измерение мощности интерференции, которое поможет определить уровни утечки энергии за пределами области, покрываемой стандартом. Изначально USRP измеряет мощность в канале шириной 80 МГц, но после модификации 802.11 Application Framework появилась возможность выбора ширины канала для измерения. Положение устройств и антенн такое же, как в предыдущем разделе. Подробные условия каждого из экспериментов указаны в таблице 2.

В первом эксперименте исследуется мощность утечки энергии из одного канала шириной 20 МГц в другой. Передающий канал варьируется, мощность измеряется в фиксированном частотном канале, результат представлен на рис. 6. В пересекающихся каналах уровень интерференции ($-50 - -60$ дБм) превышает мощность сигнала от точки доступа (~ -65 дБм), поэтому в этой области прием однозначно невозможен. График отображает усредненное значение мощности в канале шириной 20 МГц, поэтому при отсутствии пересечения хотя и среднее значение мощности в канале не велико, на краях канала возмущение может быть значительным. Это, согласно

Таблица 2: Эксперименты по определению мощности интерференции

Эксперимент	Интерференция 20 МГц	Интерференция 80 МГц
Ширина канала, МГц	20 + 20	20 + 80
Частота передачи станции, МГц	5660 – 5800	5700 – 5785
Частота приема станции, МГц	5730	5775
Мощность передачи станции, дБм	6	
Мощность передачи точки доступа, дБм	6	
Измерения	15 с/канал	15 с/канал

предыдущим экспериментам, приводит к невозможности использования соседних каналов для дуплексной передачи.

Во втором эксперименте исследуется мощность утечки энергии из канала шириной 80 МГц в канал шириной 20 МГц, результат представлен на рис. 7. Когда расстояние между каналами превышает 50 МГц, заметной утечки энергии не происходит. При расстоянии между каналами в 50 МГц, когда их границы совпадают, мощность интерференции повышается на 12 дБ. При дальнейшем сближении каналов мощность интерференции будет только увеличиваться, так как произойдет их пересечение.

Дополнительно на графики помещены спектральные маски, описанные в стандарте 802.11, которые задают ограничение мощности в области около канала. Мощность утечки энергии в соседний канал для канала шириной 20 МГц оказывается на практике меньше, чем можно оценить, пользуясь исключительно спектральной маской. Однако, она остается на достаточном уровне, чтобы помешать использованию дуплексной связи в соседних каналах. Для каналов шириной 80 МГц утечка энергии в ближайших к границе 20 МГц соответствует стандартной маске.

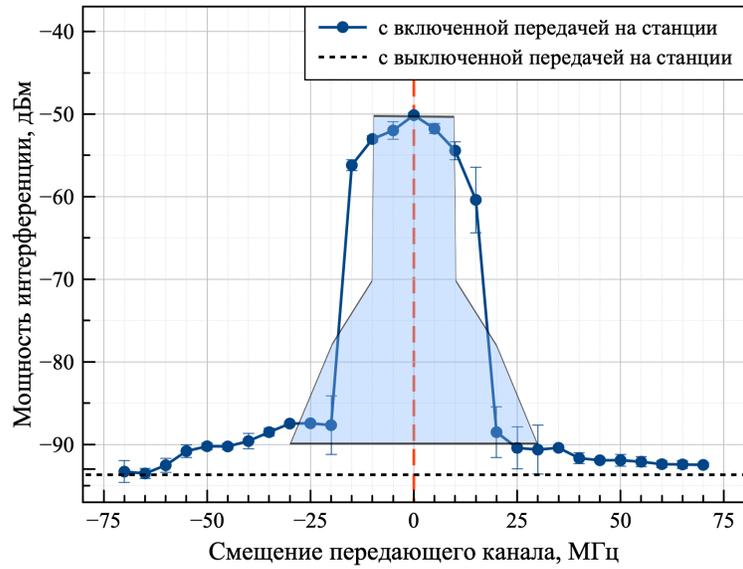


Рис. 6: Утечка энергии из канала шириной 20 МГц в канал шириной 20 МГц.

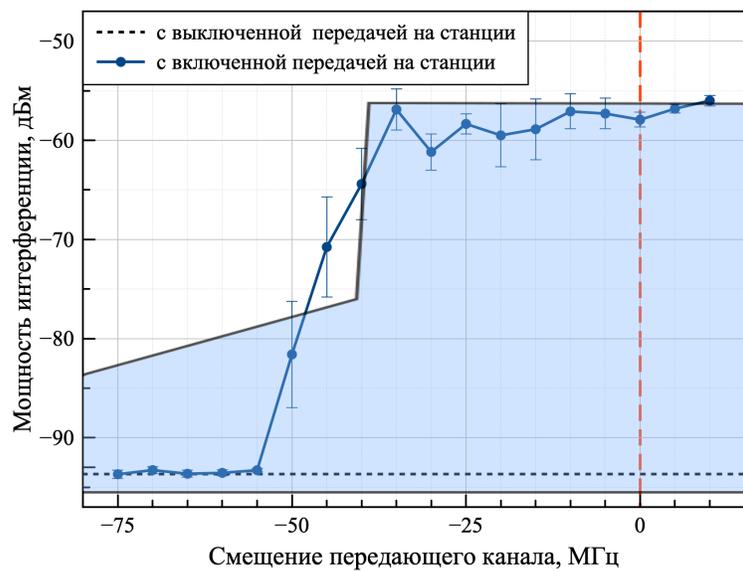


Рис. 7: Утечка энергии из канала шириной 80 МГц в канал шириной 20 МГц.

4.4 Влияние конфигурации антенн в устройствах, поддерживающих многоканальную передачу

Как было упомянуто ранее, спектральное расстояние между каналами не является единственным фактором, определяющим возможность использования дуплексного режима. Важно также то, как расположены антенны относительно друг друга внутри устройства: на каком расстоянии и в каком относительном направлении. Для проверки влияния этих факторов проводятся следующие эксперименты.

Таблица 3: Влияние положения антенн

Ширина канала, МГц	20
Частота передачи станции, МГц	5705
Частота приема станции, МГц	5660 – 5750
Мощность передачи станции, дБм	0
Измерения	3 цикла, 33 с/канал

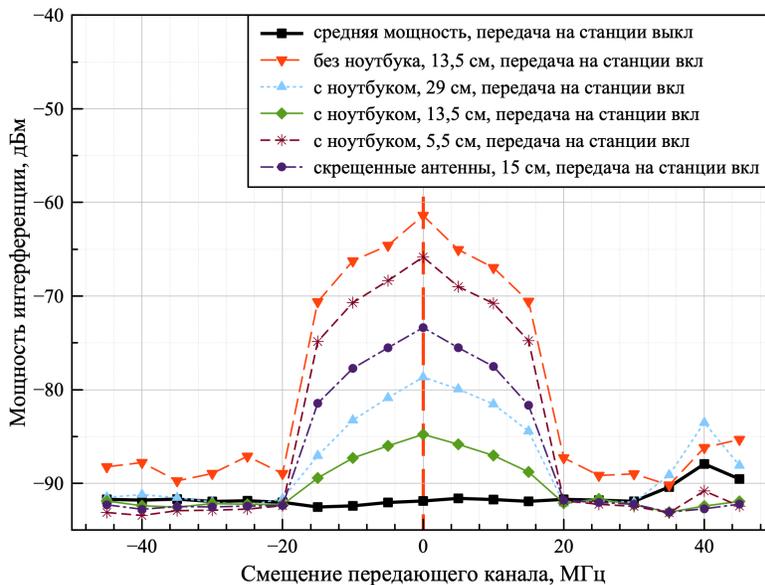


Рис. 8: Влияние конфигурации антенн при использовании дуплексного режима.

Для приближения условий эксперимента к реальным устройствам, антенны прикрепляются к корпусу ноутбука на различном расстоянии друг от друга. Расстояния выбраны, исходя из характерных размеров устройств разных классов: ~ 5 см — смартфоны, ~ 15 см — планшеты, ~ 30 см — ноутбуки. Дополнительно рассматривается случай скрещенных антенн (в предыдущих опытах антенны располагаются параллельно друг другу). Полученные графики представлены на рис. 8.

Наличие корпуса ноутбука позволяет снизить уровень интерференции, но дуплексная связь при такой мощности утечки все равно будет затруднена. Кроме того, возникает особенность, что мощность сигнала не убывает строго с увеличением расстояния между антеннами. Такой результат может быть связан с наличием отражений сигнала от поверхности ноутбука и других объектов. Если антенны расположены непараллельно друг другу, то сигналы имеют различную поляризацию, что снижает интерференцию на 12 дБ.

5 Заключение

С внедрением технологии многоканальной передачи в будущий стандарт для Wi-Fi поднимается вопрос об условиях возможности осуществления обмена данными в дуплексном режиме в разных каналах.

В данной работе исследуется явление утечки энергии в соседние каналы, которое может помешать работе дуплексного режима. Спектральная маска, описанная в стандарте, задает допустимые уровни мощности только в некоторой области около канала, вне которой утечка энергии не регламентируется. Поэтому проведено измерение мощности интерференции и доли успешно принимаемых кадров в дуплексном режиме в зависимости от спектрального расстояния между каналами.

В итоге можно сделать вывод, что наличие качественных фильтров на устройстве обеспечивает возможность работы в дуплексном режиме даже в пределах одного частотного диапазона 5 ГГц. При использованной конфигурации устройств, минимальное расстояние между каналами, позволяющее использование многоканальной дуплексной передачи составило 30 МГц. Доля успешно доставленных кадров значительно зависит от выбора MCS. При расстоянии в 30 МГц успешный прием кадров обеспечивает только MCS 0, при этом большая часть кадров все равно теряется. При использовании MCS 4 доля доставленных кадров приближается к 100% при спектральном расстоянии не меньшем, чем 60 МГц. Сильное влияние оказывает окружающая среда, передачи сторонних устройств тоже способны вызывать значительную интерференцию. Как показал последний эксперимент, помимо расстояния между антеннами важно также их относительное положение, а

корпус реального устройства может как усиливать, так и ослаблять мощность интерференции. В связи с этим особенно важно уделить внимание архитектуре устройства, использующему две антенны для многоканальной дуплексной передачи. Использование частотного диапазона 2,4 ГГц для многоканальной дуплексной передачи возможно только совместно с другими диапазонами для более сильного разнесения каналов друг от друга.

В будущей работе планируется детальнее исследовать утечку энергии и возможности использования дуплексного режима в мобильных устройствах.

Список литературы

1. E. Khorov, I. Levitsky, I. F. Akyildiz, Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7, IEEE Access (2020).
2. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, 4G, LTE-advanced Pro and the Road to 5G, Academic Press, 2016.
3. M. S. Gast, 802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond, "O'Reilly Media, Inc. 2013.
4. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi, A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs, IEEE Communications Surveys & Tutorials 21 (1) (2018) 197–216.
5. Y. Seok, J. Yee, J. Liu, T. Pare, Synchronous Multi-Link Operation, Doc: IEEE 802.11-19/1305r0 (April 2020).
6. Y. Seok, J. Liu, J. Yee, Constrained Multi-link Operation, Doc: IEEE 802.11-19/1959r0 (March 2019).
7. Y. Seok, J. Liu, J. Yee, Multi-link Constraint Signaling, Doc: IEEE 802.11-20/0527r0 (July 2020).
8. P. Monajemi, B. Hart, STR Capability Report, Doc: IEEE 802.11-20/0809r0 (May 2020).