

Исследование возможности использования асинхронной многоканальной передачи мобильными устройствами Wi-Fi

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 В новом дополнении к стандарту беспроводных сетей IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) предлагается технология многоканальной передачи, которая позволит одновременно использовать несколько частотных каналов для обмена данными, что может значительно увеличить пропускную способность будущих сетей Wi-Fi и повысить их надёжность. Однако межканальная интерференция, возникающая при одновременных приёме и передаче на одном устройстве, может приводить к повреждению принимаемых кадров. Мощность интерференции зависит от выбора каналов, физического расположения антенн, что особенно важно для мобильных устройств, так как их размеры ограничены, и других факторов. В статье исследуется возможность использования асинхронного режима многоканальной передачи мобильными устройствами в диапазонах UNII-2с, UNII-3. Для исследования использовались смартфоны, поддерживающие стандарт беспроводных сетей IEEE 802.11ac. Была измерена пропускная способность в зависимости от выбора используемых каналов и положения антенн в пространстве. Результаты экспериментов демонстрируют возможность использования многоканальной передачи в диапазоне 5 ГГц для современных мобильных устройств.

Ключевые слова: 802.11be, Wi-Fi 7, многоканальная передача, мобильные устройства, межканальная интерференция, утечка энергии.

1 Введение

Стандарт беспроводных сетей IEEE 802.11 непрерывно развивается. Находящаяся в разработке дополнение IEEE 802.11be предлагает технологию многоканальной передачи (англ. multi-link operation, MLO), которая позволит одновременно использовать несколько частотных каналов для обмена данными. Ожидается, что эта технология позволит в несколько раз увеличить пропускную способность, уменьшить задержки и повысить надёжность беспроводных сетей [1]. В простом случае устройства, поддерживающие многоканальную передачу, получают доступ к среде и передают/принимают данные независимо в каждом из каналов. Такой режим называется асинхронным, теоретическая пропускная способность в таком случае составляет сумму пропускных способностей каждого из каналов. Однако из-за особенностей фильтров Wi-Fi-передатчиков часть энергии сигнала оказывается за пределами используемого канала. Стандарт определяет требования к мощности излучения за пределами канала (мощности утечки энергии) в виде спектральной маски [2]. На рис. 1 изображён пример, как часть энергии из бокового лепестка маски канала 2, где происходит передача, попадает в соседний канал 1, где в то же время принимается другой сигнал. Даже при условии, что мощность утечки находится в границах, допускаемых стандартом, интерференция может спровоцировать некорректный приём данных на одном из интерфейсов многоканального устройства, если с другого интерфейса ведётся передача в соседнем канале. Синхронный режим многоканальной передачи нивелирует негативное влияние утечки энергии, поскольку в этом случае направление передачи данных во всех каналах оди-

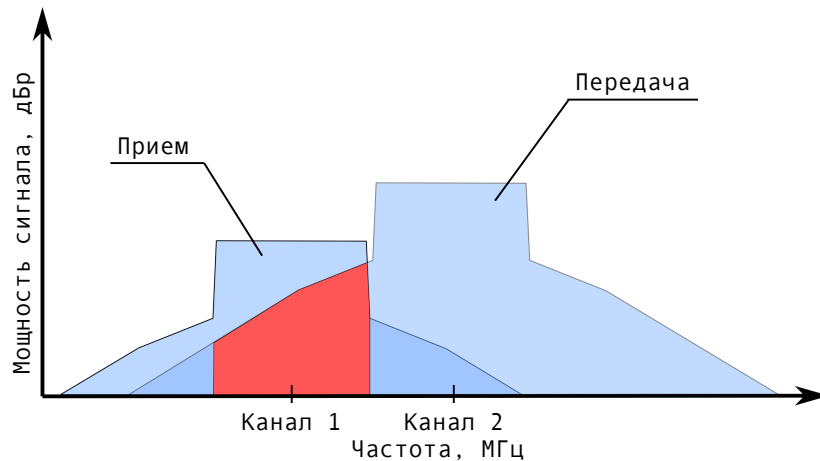


Рис. 1: Утечка энергии в соседний канал.

наковое в каждый момент времени. Такой подход имеет меньший теоретический прирост пропускной способности из-за необходимости балансировки длительности передачи пакетов в каждом из каналов и требует более сложную схему доступа к каналу [3]. Поэтому производители Wi-Fi-устройств заинтересованы в определении условий, при которых возможна асинхронная многоканальная передача, так как она обеспечивает больший теоретический прирост пропускной способности.

Значительную долю беспроводных пользовательских устройств составляют мобильные устройства: смартфоны, планшеты, ноутбуки, причём объём передаваемого трафика и требования к качеству обслуживания постоянно увеличиваются [4]. Возможность использования асинхронного режима в близких частотных каналах определяется, в том числе, и взаимным расположением антенн, возможности размещения которых внутри корпуса мобильных устройств ограничены. Целью данной работы является определение минимального спектрального расстояния между центральными частотами каналов, которое позволяет мобильным устройствам независимо передавать в них данные без ухудшения качества обслуживания.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится описание литературы по теме одновременной двунаправленной передачи в нескольких каналах. В разделе 3 описывается постановка проведённых экспериментов. В разделе 4 содержатся численные результаты экспериментов и их анализ. Завершает работу раздел 5.

2 Обзор литературы

Увеличение ширины канала способствует повышению его пропускной способности. Помимо непосредственного уширения одного непрерывного канала, возможно агрегировать несколько несвязных между собой каналов. Эта технология используется в сотовых сетях LTE [5], также подобная функция существует в Wi-Fi 5 и Wi-Fi 6, где могут одновременно использоваться два канала шириной 80 МГц, но только для однонаправленной передачи данных [6,7]. Поддержку двунаправленной передачи в нескольких каналах для сетей Wi-Fi предлагается добавить в разрабатываемом дополнении IEEE 802.11be [1].

Препятствием к внедрению новой технологии является межканальная интерференция (англ. inter-channel interference, ICI), которая влияет на обмен данными при одновременном использовании близкорасположенных каналов. Для уменьшения негативного влияния интерференции на передатчиках и приёмниках используются фильтры. Высококачественные фильтры дорогостоящие и имеют сложную технологическую структуру, поэтому возможности их применения в потребительских устройствах ограничены. По

этой причине, чтобы станция поддерживала асинхронный режим многоканальной передачи, для неё должны соблюдаться определённые требования к величине утечек энергии. Таким образом, возникает вопрос в определении минимального спектрального расстояния между каналами, позволяющего передавать данные без ухудшения качества обслуживания. При этом спектральное расстояние не является единственным важным фактором [8], важно также относительное расположение антенн в устройстве, мощность передач в каналах и др.

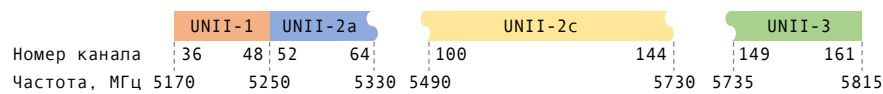


Рис. 2: Разделение частот на диапазоны.

Границы использования асинхронного режима в соседних каналах можно задать, определив необходимый уровень затухания между каналами. В работах [9,10] показано, что для успешного приёма данных при условии наличия передачи в соседнем канале ослабление интерференции должно составлять около 50 дБ. Существуют работы по нахождению минимального спектрального расстояния, использующие экспериментальные установки на базе программно-определяемого радио [11], результаты показывают, что требования к спектральному расстоянию существенно зависят от выбора СКК и мощности передачи. При использовании стандартов IEEE 802.11a/b/g и каналов шириной 20 МГц [12] в диапазоне 2,4 ГГц все каналы подвержены взаимной интерференции, следовательно, использование асинхронной передачи для них невозможно. Мощность интерференции существенно зависит от расстояния между принимающими и передающими антеннами, поэтому при его увеличении возможно независимое использование нескольких каналов в диапазонах UNII-1, UNII-2a (см. рис. 2). Для стандарта IEEE 802.11n [13] в диапазоне UNII-3 при использовании каналов с шириной 20 МГц корректный приём данных при наличии интерференции невозможен, если расстояние между антеннами менее 20 см. При использовании каналов шириной 40 МГц для успешного приёма кадров расстояние между антеннами должно быть более 60 см, что неприменимо для мобильных устройств.

Вышеперечисленные исследования рассматривают работу сетевых карт стационарных ПК и точек доступа, выпускавшихся около 10 лет назад и ранее, либо программно-определяемого радио, алгоритмы работы и характеристики более современных мобильных устройств могут значительно отличаться. Анализ современной литературы показал, что отсутствуют экспе-

риментальные исследования, изучающие возможность асинхронного режима многоканальной передачи для мобильных устройств, поддерживающих стандарт IEEE 802.11ac и ширину канала 80 МГц. В данной работе впервые экспериментальным путём изучается возможность использования асинхронной многоканальной передачи для потребительских мобильных устройств в диапазонах UNII-2с и UNII-3. Исследуется пропускная способность канала при наличии интерференции в зависимости от спектрального расстояния между каналами и положения принимающих и передающих антенн.

3 Постановка эксперимента

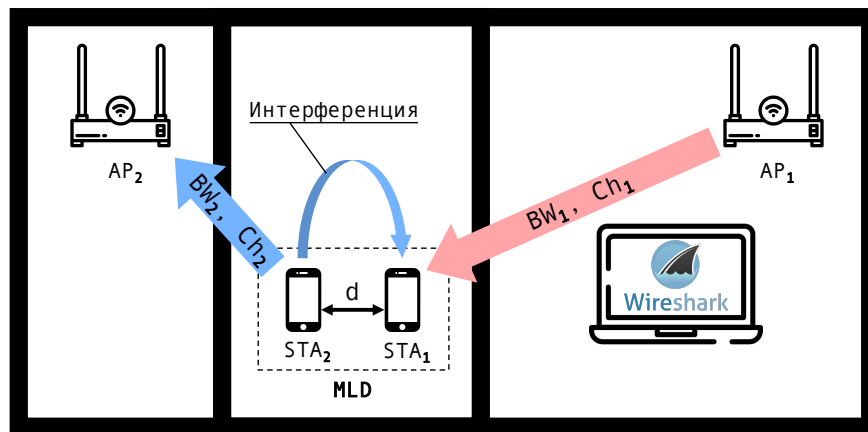


Рис. 3: Схема эксперимента.

Устройство с поддержкой многоканальной передачи, далее многоканальное устройство (англ. multi-link device, MLD), имеет несколько радиоинтерфейсов, которые способны работать в различных частотных каналах. Однако передача на одном интерфейсе может вызвать интерференцию на другом интерфейсе, что при одновременных приёме и передаче может повредить принимаемый кадр. Более того, мощность интерференции может быть достаточно велика, чтобы превысить порог занятости канала на соседнем интерфейсе, что препятствует использованию асинхронной передачи. Таким образом, выбор частотных каналов является важным фактором, влияющим на пропускную способность в каждом из каналов в отдельности, а в следствие и на общую производительность сети. Целью эксперимента является

определение условий, при которых современные мобильные устройства могут использовать режим асинхронной многоканальной передачи. При этом оценивается как качество используемых устройствами радиомодулей, так и алгоритмы управления параметрами передачи. Допустимым снижением пропускной способности считается не более 10% от значений в канале без интерференции.

Рассматривается сценарий, где имеются станция и точка доступа с поддержкой функции асинхронной многоканальной передачи, которые обмениваются данными в двух каналах. В одном из каналов передаётся нисходящий трафик, во втором — восходящий, который может создавать интерференцию и препятствует корректному получению кадров в первом канале. Изменяя спектральное расстояние между каналами и их ширину, необходимо получить зависимость пропускной способности для нисходящего канала.

В настоящее время не выпускаются подобные устройства с несколькими независимыми Wi-Fi-модулями. Двухдиапазонные точки доступа работают в двух каналах из частотных диапазонов 2,4 ГГц и 5 ГГц соответственно, но постановка задачи состоит в определении возможности использования многоканальной передачи при использовании каналов внутри одного диапазона. Поэтому для исследования указанной проблемы используется установка, состоящая из двух точек доступа (AP_1 , AP_2), работающих в различных каналах из диапазонов UNII-2с, UNII-3, и двух смартфонов (STA_1 , STA_2), подключённых к соответствующим точкам доступа (см. рис. 3). Все устройства поддерживают стандарт IEEE 802.11ac, ширину канала до 80 МГц и MIMO 2x2, функция направленной передачи (англ. beamforming) на точках доступа отключена. Данная схема эксперимента моделирует взаимодействие многоканальных станции и точки доступа.

На смартфонах и точках доступа установлено дополнительное ПО, позволяющее генерировать и UDP-трафик. На смартфонах используются скрипты, написанные на языке программирования Python 3, запуск которых происходит через приложение Pydroid 3 [14]. На точках доступа установлено расширение системы для поддержки репозитория Entware [15], для возможности исполнения сторонних бинарных файлов, скомпилированных под ОС точки доступа. В течение эксперимента каждый из смартфонов подключён к соответствующей точке доступа, на STA_2 непрерывно генерируются UDP-пакеты, которые отправляются на AP_2 . Размер данных внутри пакета составляет 972 байта, таким образом, после добавления заголовков транспортного и сетевого уровней, полезная нагрузка Wi-Fi кадра составляет 1000 байт. Во время измерения точка доступа AP_1 генерирует на отправку 100000 аналогичных по размеру UDP-пакетов, адресованных STA_1 . В зоне уверенного приёма сигнала от AP_1 располагается ноутбук с сетевой картой в режиме монитора, который используется для анализа трафика, отправ-

Таблица 1: Используемые в эксперименте устройства.

Обозначение	Название модели	Год выпуска
S_1	Huawei P40	2020
S_2	OnePlus 6	2018
S_3	LG Nexus 5X	2015

ляемого на STA_1 , при помощи программы Wireshark [16]. Режим монитора позволяет просматривать все кадры, передающиеся в канале, что даёт возможность анализировать время передачи кадров, предназначенных STA_1 . Число успешно принятых кадров подсчитывается непосредственно на STA_1 . Это позволяет вычислить пропускную способность канала на MAC-уровне, значения которой далее будут представлены на графиках.

В качестве точки доступа AP_1 выступает беспроводной маршрутизатор Keenetic Giga (KN-1010), в роли AP_2 — Keenetic Extra (KN-1711). Список используемых смартфонов приведён в таблице 1. Все смартфоны имеют сертификацию Wi-Fi Alliance, спектры Wi-Fi сигнала каждого из устройств удовлетворяет маске сигнала, описанной в стандарте [2]. На рис. 4 приведены спектры устройств для канала шириной 80 МГц, спектральная маска, помещённая для сравнения, построена относительно спектров устройств S_1

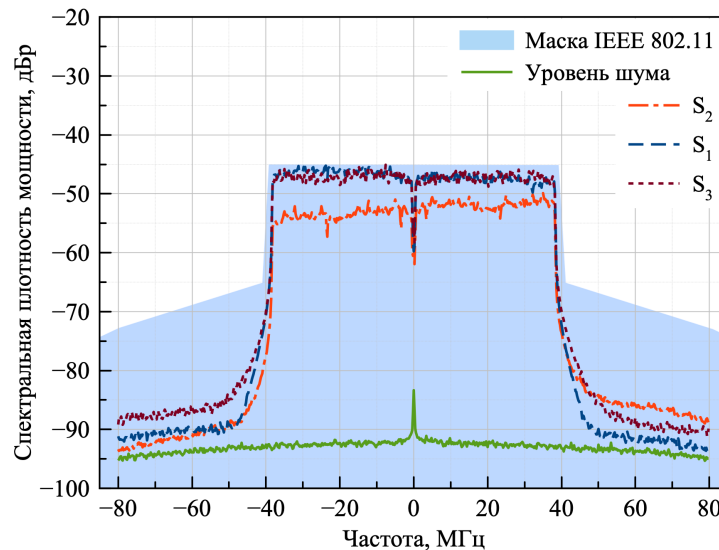


Рис. 4: Соответствие спектров устройств маске стандарта IEEE 802.11.



Рис. 5: Расположение смартфонов в эксперименте.

и S_3 . Параметры эксперимента определяются выбором каналов: Ch_1 , Ch_2 , на которых работают точки доступа, шириной интерферирующего канала BW_2 и расстоянием между смартфонами d . Значение $BW_1 = 20$ МГц зафиксировано в ходе всех экспериментов, так как при проведении предварительных измерений, было обнаружено, что при выборе более широкого рабочего канала (40 МГц или 80 МГц) алгоритм управления параметрами передачи на AP_1 может уменьшать ширину используемого канала, особенно в условиях сильной интерференции. Для каждого фиксированного набора параметров запуск эксперимента проводится 5 раз, и далее полученные значения пропускной способности усредняются.

В ходе эксперимента смартфоны зафиксированы при помощи неметаллического крепления как изображено на рис. 5. Измерения проводятся в каналах, где отсутствуют передачи сторонних устройств. В связи с этим в разных экспериментах результаты получены для различных диапазонов каналов, так как со временем их доступность изменялась.

В текущей работе используется одноадресная передача данных, приближая эксперимент к естественным условиям работы сети, так как интерференция способна влиять не только на приём кадров с данными, но и на отправку подтверждений. Скорость генерации UDP-трафика должна превышать исходящую скорость потока данных, потому что в таких условиях трафик в каждом канале будет насыщенным, и передачи кадров из разных каналов будут систематически пересекаться во времени. Ограниченная производительность процессора точки доступа и приложения, используемого

для работы Python 3 на смартфоне, не позволяют генерировать и обрабатывать более 150 Мб/с в каждом из каналов. Поэтому мощность точек доступа и их положения выбраны так, чтобы уменьшить их прямое влияние друг на друга и ограничить используемую исходящую скорость потока данных на уровне менее 150 Мб/с. Анализ временных промежутков между пакетами в канале Ch_2 не выявил влияния межканальной интерференции, создаваемой передачей в канале Ch_1 , поэтому трафик в канале Ch_2 всегда насыщен вне зависимости от наличия или отсутствия передачи в канале Ch_1 .

4 Численные результаты

В точке, где располагается STA_1 , мощность сигнала от точки доступа колеблется в районе от -60 до -70 дБм, мощность сигнала от STA_2 — в промежутке от -20 до -30 дБм.

4.1 Серия экспериментов №1

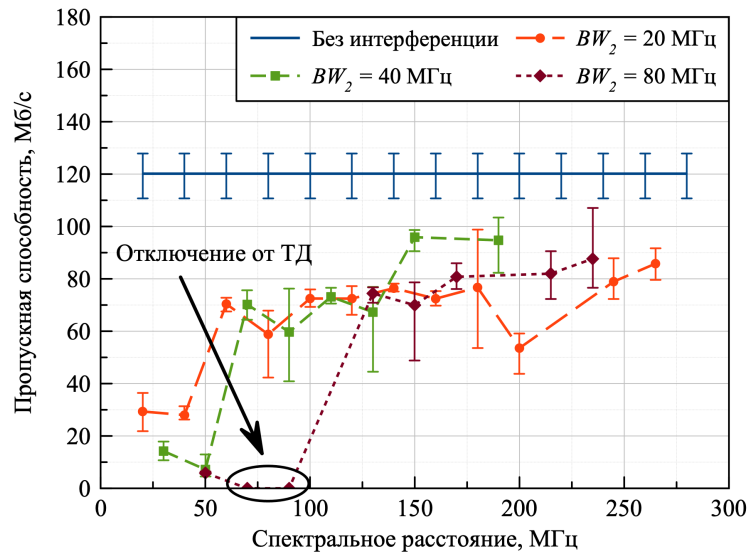


Рис. 6: Зависимость пропускной способности Ch_1 от спектрального расстояния между Ch_1 и Ch_2 для различной ширины Ch_2 . $STA_1 = S_1$ принимает данные, $STA_2 = S_2$ создаёт интерференцию. Расстояние между смартфонами $d = 13,5$ см.

В первой серии экспериментов в качестве STA_1 используется смартфон S_1 , в качестве STA_2 — S_2 , расстояние между которыми равно 13,5 см, что соответствует характерным размерам современных смартфонов. Измеряется пропускная способность канала Ch_1 , где STA_1 принимает данные, результаты представлены на рис. 6, по горизонтальной оси графика откладывается спектральное расстояние между центральными частотами каналов Ch_1 и Ch_2 . Значение пропускной способности при отсутствии интерференции получено из усреднения по всем проводившимся экспериментам. Погрешности на графике отображают минимальное и максимальное значение пропускной способности, полученные в ряде экспериментов для данных значений параметров.

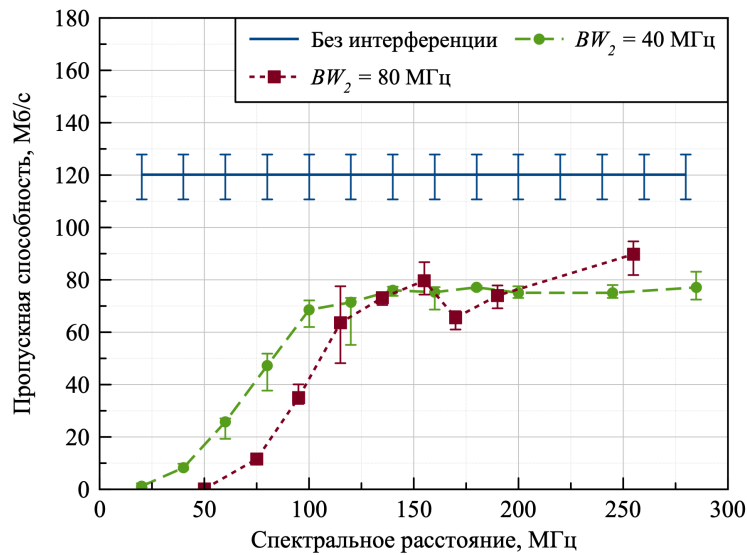


Рис. 7: Зависимость пропускной способности Ch_1 от спектрального расстояния между Ch_1 и Ch_2 для различной ширины Ch_2 . $STA_1 = S_2$ принимает данные, $STA_2 = S_3$ создаёт интерференцию. Расстояние между смартфонами $d = 13,5$ см.

В данной серии экспериментов, получено, что с увеличением ширины интерферирующего канала расширяются и спадающие боковые лепестки, поэтому область, где пропускная способность снижается более чем наполовину, расширяется. Более того, для $BW_2 = 80$ МГц интерференция вызывает потерю сигнала от точки доступа. Однако даже при значительном удалении от интерферирующего канала влияние утечки энергии сохраня-

ется, и пропускная способность не превышает уровня 80% от значений без интерференции.

Аналогичные результаты получены и для другой пары устройств, удалённых на расстояние $d = 13,5$ см. Смартфон \mathbf{S}_2 принимает данные в канале Ch_1 , \mathbf{S}_3 создаёт интерференцию, передавая данные в канале Ch_2 , зависимость пропускной способности Ch_1 изображена на рис. 7. При расстоянии между центральными частотами каналов более 150 МГц пропускная способность сохраняется практически на одном уровне $\approx 75\%$ от пропускной способности в канале без интерференции.

Таким образом, первая серия экспериментов показывает, что при расстоянии между антеннами $d = 13,5$ см межканальная интерференция вызывает падение пропускной способности более чем на 10%, поэтому применение технологии многоканальной передачи внутри диапазонов UNII-2с, UNII-3 для смартфонов затруднительно, так как малые размеры корпуса не позволяют разнести антенны на достаточное расстояние.

4.2 Серия экспериментов №2

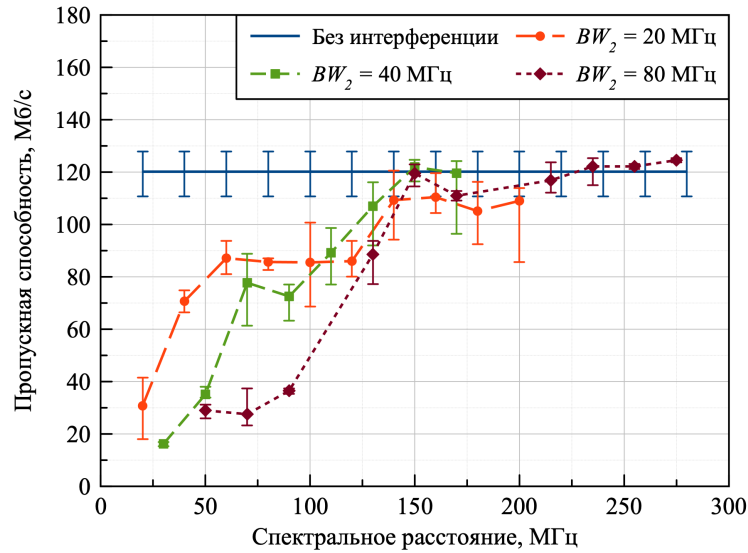


Рис. 8: Зависимость пропускной способности Ch_1 от спектрального расстояния между Ch_1 и Ch_2 для различной ширины Ch_2 . $STA_1 = \mathbf{S}_1$ принимает данные, $STA_2 = \mathbf{S}_2$ создаёт интерференцию. Расстояние между смартфонами $d = 30$ см.

Во второй серии экспериментов в роли STA_1 используется S_1 , в роли STA_2 — S_2 . Расстояние между устройствами $d = 30$ см, что соответствует характерным размерам ноутбуков и больших планшетов. На рис. 8 изображена зависимость пропускной способности от спектрального расстояния. Для большей ширины интерферирующего канала падение пропускной способности также затрагивает более широкую область. При этом можно заметить, что в экспериментах для $BW_2 = 40$ МГц и $BW_2 = 80$ МГц пропускная способность превышает уровень 90% от случая канала без интерференции при спектральном расстоянии 150 МГц и более. Для эксперимента с $BW_2 = 20$ МГц при спектральном расстоянии большем 140 МГц интерференция не оказывает значительного эффекта на пропускную способность, и она колеблется на уровне $\approx 90\%$ от значений в канале без интерференции, что является граничным значением приемлемого качества обслуживания в текущей постановке эксперимента.

Исходя из данного эксперимента, можно сделать вывод, что применение асинхронной многоканальной передачи при использовании каналов из диапазонов UNII-2с, UNII-3 в ноутбуках и больших планшетах возможно, так как размеры корпуса этих классов устройств позволяют расположить антенны на достаточном расстоянии, чтобы избавиться от влияния утечки энергии.

5 Заключение

В будущем дополнении к стандарту IEEE 802.11be предлагается технология многоканальной передачи, что будет способствовать уменьшению задержек, повышению пропускной способности и надёжности сети. Препятствием к раскрытию полного потенциала новой технологии является проблема утечки энергии в соседние каналы. Данная работа рассматривает влияние этой проблемы на применение технологии асинхронной многоканальной передачи в мобильных устройствах (смартфонах, планшетах, ноутбуках). Для исследования были проведены эксперименты по измерению пропускной способности канала в зависимости от выбора каналов для асинхронной передачи, положения устройств и др.

В результате можно сделать вывод, что влияние интерференции может проявляться даже при значительном спектральном расстоянии между каналами. При расположении антенн в устройстве на расстоянии 13,5 см передача в асинхронном режиме с максимальной пропускной способностью в пределах диапазонов UNII-2с, UNII-3 для испытуемых устройств оказалась невозможна. Однако при увеличении расстояния между антеннами до 30 см падение пропускной способности составляет менее 10%, если расстояние между каналами превышает 150 МГц. Таким образом, использование

асинхронной многоканальной передачи возможно в ноутбуках и больших планшетах, где габариты корпуса позволяют разнести антенны на расстояние 30 см и более. Для смартфонов использование асинхронной многоканальной передачи при использовании частот только внутри диапазонов UNII-2с и UNII-3 затруднительно. Но, так как асинхронный режим работы многоканальной передачи остаётся более привлекательным по своим характеристикам, производителям беспроводного оборудования надо принимать во внимание данную проблему. Потенциальным решением для использования асинхронной многоканальной передачи может являться применение барьеров между антеннами или обновлённый дизайн фильтров в радиомодулях, что требует дополнительных исследований по данной тематике.

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* 8 (2020) 88664–88688.
2. IEEE 802.11-2020 — 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., IEEE Standard 802.11-2020 (2020).
3. Y. Seok, J. Yee, J. Liu, T. Pare, Synchronous Multi-Link Operation, Doc: IEEE 802.11-19/1305r0 (April 2020).
4. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022, White paper (February 2019).
5. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition, Academic Press, Inc., 2016.
6. M. S. Gast, 802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond, O'Reilly Media, Inc., 2013.
7. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G. Bianchi, A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs, *IEEE Communications Surveys Tutorials* 21 (1) (2019) 197–216.
8. P. Monajemi, B. Hart, STR Capability Report, Doc: IEEE 802.11-20/0809r0 (May 2020).
9. W. L. Tan, K. Bialkowski, M. Portmann, Evaluating Adjacent Channel Interference in IEEE 802.11 Networks, in: 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, 2010.
10. V. Angelakis, S. Papadakis, V. Siris, A. Traganitis, Adjacent channel interference in 802.11a is harmful: Testbed validation of a simple quantification model, *IEEE Communications Magazine* 49 (2011) 160–166.
11. I. Levitsky, Y. Okatev, E. Khorov, Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks, in: 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), 2020.

12. J. Nachtigall, A. Zubow, J.-P. Redlich, The Impact of Adjacent Channel Interference in Multi-Radio Systems using IEEE 802.11, in: 2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008, pp. 874–881.
13. A. Zubow, R. Sombrutzki, Adjacent channel interference in IEEE 802.11n, in: 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012, pp. 1163–1168.
14. Pydroid 3 — IDE for Python 3, play.google.com/store/apps/details?id=ru.iiec.pydroid3.
15. Entware — software repository for network attached storages, routers and other embedded devices, entware.net.
16. Wireshark — network protocol analyzer, wireshark.org.