

## Анализ возможности выполнения требований индустриального интернета вещей методами Wi-Fi 6

А.Ю. Карамышев<sup>\*,\*\*</sup>, М.В. Любогощев<sup>\*</sup>, А.И. Ляхов<sup>\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

<sup>\*\*</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Поступила в редколлегию 1 ноября 2023 г. Принята 16 ноября 2023 г.

**Аннотация**—В последние годы наблюдается активное развитие беспроводных систем индустриального интернета вещей. Возникает вопрос выбора и настройки технологии беспроводной связи с учетом как способности обеспечить строгие требования к качеству обслуживания для большого числа устройств, так и доступности технологии. Одной из таких технологий является Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax). Однако эффективное применение Wi-Fi 6 в сценариях индустриального интернета вещей остается открытой задачей. В работе проанализировано влияние механизмов Wi-Fi 6 на ключевые показатели производительности системы, такие как время и надежность доставки сообщений. Показано, как и какие существующие механизмы Wi-Fi 6 могут быть использованы для выполнения строгих требований к качеству обслуживания.

**Ключевые слова:** индустриальный интернет вещей, PoT, QoS, Wi-Fi 6

DOI: 10.53921/18195822\_2023\_23\_4\_438

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет ускорился рост отрасли промышленной автоматизации. Подобный тренд развития принято связывать с четвертой промышленной революцией (англ.: Industry 4.0). Одной из ее отличительных особенностей является появление автономных интеллектуальных систем, также называемых индустриальным интернетом вещей (англ.: Industrial Internet of Things, PoT) [1, 2]. PoT предполагает объединение промышленного оборудования и систем мониторинга в единую систему. Для осуществления регулярного обмена сообщениями внутри такой системы разворачивается коммуникационная сеть. Такая сеть должна быть способна удовлетворить строгие требования к качеству обслуживания (англ.: Quality of Service, QoS) индустриального трафика. Кроме того, с учетом постоянно растущего числа мобильных устройств, предъявляются высокие требования к гибкости и масштабируемости сети связи.

Использование беспроводной связи в рамках PoT имеет как плюсы, так и минусы. С одной стороны, плюсом использования беспроводных сетей является обеспечение легко масштабируемой промышленной автоматизации, поскольку беспроводная связь снижает затраты на установку, упрощает обслуживание и допускает мобильность оборудования. С другой стороны, к обслуживанию трафика PoT предъявляются чрезвычайно строгие требования к качеству обслуживания, выполнение которых в рамках беспроводных сетей является сложной технологической задачей. Команды управления должны надежно передаваться с детерминированными и крайне низкими задержками, чтобы обеспечить жесткую синхронизацию для большого числа роботов и автономных машин. В частности, для промышленной сети ограничения на задержку составляют несколько миллисекунд, на долю потерянных пакетов — около  $10^{-6}$ , а на джиттер — около нескольких десятков микросекунд, что трудно достижимо для современных беспроводных сетей [3, 4].

Возникает вопрос выбора и настройки технологии беспроводной связи как с точки зрения способности удовлетворить строгие QoS-требования, так и с позиции доступности технологии. Мировым сообществом предлагается множество проприетарных технологий, построенных поверх протоколов физического уровня стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.15.4 [5–8], а так же ряд технологий, разработанных с нуля под требования IoT: WirelessHP [9], w-SHARP [10] и других. Потенциальным выбором может быть сервис сверхнадежной связи с низкими задержками (англ.: Ultra Reliable Low Latency Communication, URLLC) сотовых сетей пятого поколения (5G) [11, 12]. Наконец, конкуренцию перечисленным беспроводным технологиям связи составляет технология Wi-Fi, в частности, актуальный на момент написания работы стандарт IEEE 802.11ax, также носящий название Wi-Fi 6 [13].

Устройства Wi-Fi являются массово доступными, что обеспечивает низкую стоимость, легкость настройки и масштабирования беспроводной сети. При этом современный Wi-Fi является универсальным инструментом, способным удовлетворить даже самые строгие QoS-требования, что делает Wi-Fi отличным кандидатом на использование в сценариях IoT [14]. В последние годы в Wi-Fi были интегрированы множество эффективных механизмов, такие как агрегация кадров, многопользовательские многоантенные передачи (англ.: Multi-User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO), методы формирования радиолуча (англ.: beamforming), улучшенные техники помехоустойчивого кодирования, множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов (англ.: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA), методы координированных передач для снижения интерференции, поддержка доступа к среде по расписанию, широкие частотные каналы и другие. Однако для выполнения строгих требований к качеству обслуживания для большого числа устройств требуются эффективные выбор и настройка механизмов технологии Wi-Fi 6. Этот вопрос остается слабо исследованным в литературе.

В данной работе исследуется влияние отдельных механизмов Wi-Fi 6 на ключевые показатели производительности промышленной системы связи (IoT-системы), включающие в себя время и надежность доставки сообщений. Полученные результаты представляют собой рекомендации по выбору и настройке технологии Wi-Fi для удовлетворения QoS-требований в индустриальных сценариях.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлен обзор литературы. Затем в разделе 3 описывается исследуемый сценарий. Раздел 4 содержит исследование влияния различных механизмов Wi-Fi 6 на ключевые показатели IoT-системы, включающие в себя описания экспериментов с выводами об эффективности отдельно взятых механизмов. Наконец, в разделе 5 приводятся основные результаты работы и обсуждаются потенциальные направления для будущих исследований.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературе производительность сетей Wi-Fi 6 в промышленных сценариях часто сравнивается с производительностью 5G систем. Например, в работе [15] исследуется производительность нисходящей линии связи Wi-Fi и 5G. Однако в этой работе рассматривается сценарий со случайным нисходящим трафиком, что, во-первых, нереалистично, поскольку промышленные коммуникации, критичные ко времени обслуживания, в основном цикличны [3], а во-вторых, неэффективно, поскольку случайный трафик приводит к дополнительным накладным расходам. Эти накладные расходы пагубно сказываются на производительности Wi-Fi из-за обязательного механизма случайного доступа к каналу и длинных преамбул физического уровня. Кроме того, в рамках сценариев IoT, сравнение по показателю задержки обособленной нисходящей линии связи не дает полной картины, в отличие от, например, минимальной достижимой длительности цикла [16].

В работах [16–18] производится сравнение производительности 5G системы с Wi-Fi 6, исходя из которого, авторы заключают, что Wi-Fi 6 способен обеспечивать показатели времени и надежности доставки лучше, чем у технологии 5G. К сожалению, данные работы лишены полноценного анализа новых механизмов Wi-Fi. Кроме того, осуществляется лишь примерная оценка производительности системы, из-за чего открытым остается вопрос об актуальности представленных результатов.

Авторы [19] анализируют недавно введенные механизмы Wi-Fi, такие как синхронизация времени, многоканальная работа и доступ по расписанию, которые могут улучшить производительность Wi-Fi в рамках IIoT. Однако работе не достаёт деталей имплементации, должного численного анализа и обоснований представленных результатов.

В работе [20] показывается, что Wi-Fi 6 с интеграцией протоколов чувствительного ко времени сетевого обмена данными (англ.: Time-Sensitive Networking, TSN) способен обеспечить малые времена доставки пакета вплоть до нескольких миллисекунд. Однако авторами не исследуется область высокой надежности, а набор численных результатов сильно ограничен. Авторы подчеркивают многие слабые стороны Wi-Fi, например, непредсказуемость длительности успешной доставки с учетом повторных попыток, однако упускают из рассмотрения многие доступные в стандарте механизмы, которые позволяют с этим бороться.

Наконец, в работе [21] сравнивается производительность технологий Wi-Fi 5 и Wi-Fi 6 в широком диапазоне промышленных сценариев. Однако в представленных экспериментах выставляются слишком мягкие ограничения на надежность доставки пакетов (порядка 90%), в то время как для промышленных приложений интерес представляет надежность много более 99,9%. Ожидается, что такое различие способно отразиться в кратном изменении емкости системы, что делает представленные результаты неактуальными для сценариев со строгими требованиями к времени и надежности доставки. Кроме того, в работе не проводится исследование производительности отдельных механизмов Wi-Fi 6, что оставляет открытым вопрос выбора и настройки этих механизмов для увеличения производительности Wi-Fi 6 в промышленных сценариях.

Завершая обзор литературы, отметим, что в результате долгого пути развития технология Wi-Fi стала универсальным инструментом, способным удовлетворить даже самые строгие QoS-требования в различных сценариях. Устройства Wi-Fi являются массово доступными, что обеспечивает низкую стоимость, легкость настройки и масштабирования беспроводной сети. Однако для развертывания сетей Wi-Fi в сценариях IIoT требуется четкий анализ и комплексная настройка механизмов и параметров этой технологии, которым и посвящена данная работа.

### 3. ИССЛЕДУЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Рассматривается промышленная система связи некоторого автоматизированного завода, развернутая в большом производственном цехе размером порядка нескольких тысяч квадратных метров. Для передачи сообщений используется технология Wi-Fi 6.

Металлическое оборудование производственных линий и другие препятствия затрудняют прямое распространение сигнала, поэтому для обеспечения стабильной беспроводной связи требуется развертывание множества точек доступа, покрывающих небольшие области диаметром в пару десятков метров. Как правило, точки доступа располагается над большинством препятствий, чтобы обеспечить лучшее покрытие.

Как результат, вся промышленная система связи разбита на несколько сетей Wi-Fi 6 (англ.: Basic Service Set, BSS), как это показано на рис. ???. Каждая BSS состоит из точки доступа, оснащенной контроллером, и нескольких управляемых контроллером станций. Под станциями подразумеваются машины, оборудованные различными механизмами: сенсорами, роботами

зированными руками и другими периферийными механизмами. Плотность производственного оборудования такова, что с каждой точкой доступа может быть связано несколько десятков станций. Все станции подчиняются командам, которые рассылаются точкой доступа. Однако для своевременной генерации этих команд требуется актуальная информация о станциях, поэтому эти устройства регулярно отправляют отчеты о своем состоянии на точку доступа. Станции и/или их части могут двигаться со скоростью вплоть до нескольких километров в час, что затрудняет использование проводных технологий для обеспечения коммуникации между устройствами. В дальнейшем предполагается, что все станции перемещаются с некоторой постоянной скоростью, а их перемещение описывается согласно двумерной модели случайного выбора направления движения (англ.: 2D random direction mobility model) [22].

В нелицензированном диапазоне частот, который использует Wi-Fi, доступно ограниченное число каналов. Например, в России без дополнительной регистрации в 5 GHz доступно всего девять частотных каналов шириной 40 MHz. Поэтому некоторые точки доступа (и соответствующие им BSS) могут быть вынуждены использовать одни и те же каналы, даже в случае когда координатор осуществляет строгое частотное планирование в рамках конкретного цеха. Существование нескольких BSS в одном частотном канале влечет за собой появление межсетевой (англ.: inter-BSS) интерференции, в результате чего возникает задача избежания или подавления такой интерференции.

В работе предполагается, что станции могут перемещаться внутри ограниченной области, но постоянно связаны с конкретной точкой доступа, что формирует постоянную структуру BSS. Как точка доступа, так и станции в полной мере поддерживают стандарт Wi-Fi 6.

Пусть обмен информацией между точкой доступа и станциями организован по циклу, состоящему из передачи данных в нисходящем и восходящем каналах связи. Периодически точка доступа посылает сообщение каждой станции. Независимо от этого, каждая станция периодически посылает сообщение о своем состоянии на точку доступа. Как контроллер, расположенный на точке доступа, так и каждая станция генерируют пакеты с одинаковым периодом  $T$ , но в разные моменты времени, смещенные относительно друг друга. Каждый пакет должен быть доставлен до генерации следующего, в противном случае он считается потерянным, поскольку информация в старом пакете теряет свою актуальность. Как правило, длительность цикла  $T$  не превышает десятка миллисекунд, а типичным размером полезной нагрузки сообщения в обе стороны является несколько десятков байт [3].

#### 4. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕХАНИЗМОВ ТЕХНОЛОГИИ WI-FI

Современный стандарт технологии Wi-Fi специфицирует ряд механизмов, крайне полезных для удовлетворения строгих QoS-требований, характерных для IoT. Однако для достижения наилучшей производительности сети Wi-Fi требуется тщательный выбор и настройка всех функций. Для того чтобы исследовать влияние механизмов Wi-Fi 6 на время и надежность доставки сообщений в сценарии IoT, изложенном в разделе 3, используется платформа имитационного моделирования NS-3 [24]. Численные параметры исследуемого сценария представлены в таблице 1. Для моделирования затухания сигнала и крупномасштабных замираний (англ.: shadowing) используется 3GPP Indoor Factory Channel Model [23]. Для исследования мелкомасштабных замираний (англ.: fading) используется QuaDRiGa [25].

В данном разделе приводится описание и анализ исследований ключевых механизмов Wi-Fi 6, потенциально применимых для удовлетворения строгих QoS-требований IoT-системы.

Таблица 1. Численные параметры сценария.

Число антенн точек доступа/станций	8/2
Высота антенн точек доступа/станций	3,6/1,5 м
Скорость перемещения станций	10 км/ч
Размер пакета на канальном уровне	100 байт
Период генерации пакетов $T$	5 ms
Требование к надежности доставки пакетов	$> 1 - 10^{-6}$

#### 4.1. Снижение накладных расходов

Одним из факторов, ограничивающих производительность технологии Wi-Fi в промышленных сценариях, является большая доля накладных расходов на передачу коротких пакетов. Классическая настройка Wi-Fi предполагает, что все устройства в сети должны получать доступ к каналу в соответствии с правилами множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), однако случайная природа CSMA/CA подразумевает ненулевую вероятность коллизии в процессе получения доступа к среде, что не дает осуществить детерминированную доставку за короткое время. Кроме того, передача каждого кадра должна начинаться с преамбулы физического уровня и включать заголовок канального уровня, а между передачами кадров обязаны присутствовать межкадровые интервалы. Эти компоненты накладных расходов почти не зависят от номинальной пропускной способности сети: сигнально-кодовых конструкций (СКК; англ.: Modulation and Coding Scheme, MCS), числа пространственных потоков (англ.: Spatial Stream, SS) и т. д. Таким образом, существует постоянная добавка накладных расходов порядка сотни микросекунд ко времени передачи каждого кадра. В случае передачи пакетов небольшого размера, характерных для сценариев IIoT, доля накладных расходов становится очень большой, откуда возникает потребность в их снижении.

#### Агрегирование пакетов

Относительная доля накладных расходов на передачу преамбулы физического уровня и заголовка канального уровня может быть уменьшена, если устройство передает несколько пакетов одновременно в виде одного агрегированного кадра. Кроме того, агрегирование пакетов снижает накладные расходы на доступ к каналу, поскольку устройству нужно получить доступ к каналу только один раз для передачи одного агрегированного кадра.

Стандарт Wi-Fi определяет два метода агрегации пакетов: A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit) и A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit).

В случае использования A-MSDU к каждому пакету сетевого уровня будет добавлен дополнительный заголовок (англ.: A-MSDU subframe header) размером 14 байт в наиболее часто используемой базовой версии (англ.: Basic A-MSDU subframe format). После чего они объединяются в единый агрегированный кадр, который дополняется заголовком канального уровня и контрольной суммой, общим размером порядка 34 байт. При этом контрольная сумма рассчитывается по всей совокупности агрегированных пакетов. Как результат, весь A-MSDU может быть либо полностью принят, либо потерян.

При использовании A-MPDU к каждому пакету будет добавлен заголовок канального уровня, контрольная сумма, а также специальный разделитель (англ.: MPDU delimiter) общим размером порядка 38 байт. Наличие такой структуры позволяет выборочно декодировать некоторые пакеты даже в случае наличия локальной помехи.

Отметим, что по сравнению с A-MSDU, метод A-MPDU потенциально улучшает надежность передачи ценой увеличения накладных расходов на пару десятков байт. В рассматриваемом промышленном сценарии все пакеты небольшие, и такой объем накладных расходов составляет существенную долю (порядка 20% процентов) относительно полезной нагрузки в 100 байт, что заметно влияет на производительность системы. Таким образом, предлагается использовать метод A-MSDU как наиболее эффективный с точки зрения потребления канального времени.

Стоит выделить, что в случае отсутствия обязательных подтверждений, метод A-MSDU эффективно сочетается с групповой рассылкой (англ.: Groupcast). Точка доступа может объединить предназначенные для разных станций пакеты в один A-MSDU с групповым адресом, а затем отправить их за одну передачу, что снижает число межкадровых интервалов и промежутков отсчета отсрочки.

### (MU-)MIMO и измерение состояния канала

Еще один путь снижения доли накладных расходов предоставляет технология MU-MIMO, позволяющая в разных пространственных потоках одновременно проводить несколько передач для различных устройств. Благодаря этому повышается эффективность использования канала за счет экономии на преамбулах физического уровня и времени, потраченном на доступ к среде. В частности, версии стандарта Wi-Fi 5 и Wi-Fi 6 специфицируют технологию MU-MIMO для нисходящего и восходящего каналов соответственно.

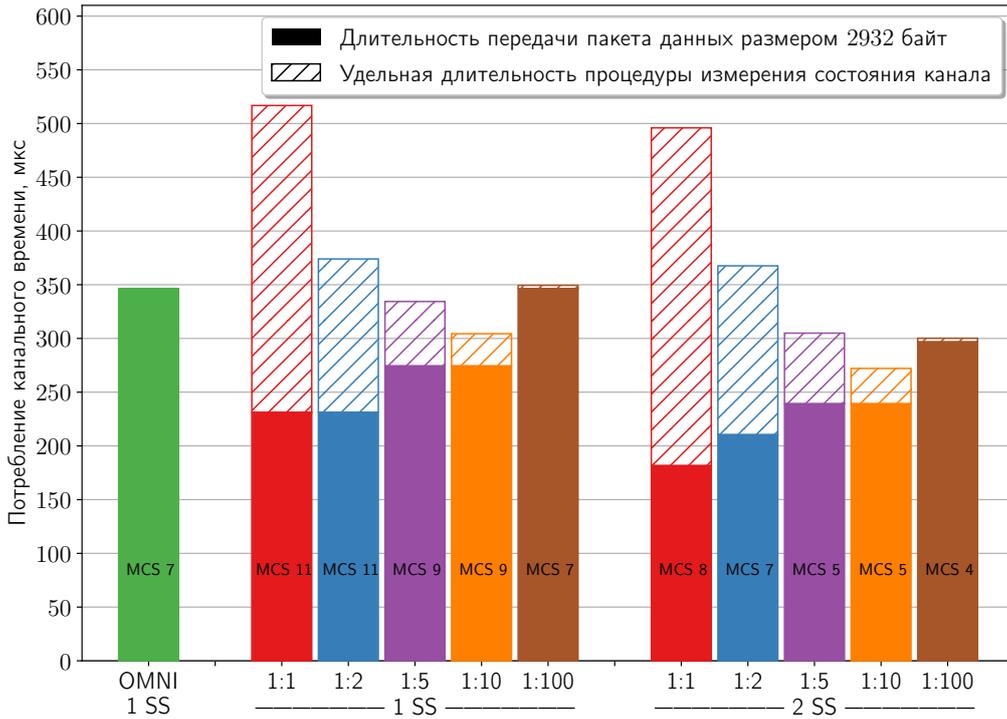
Работа технологий MIMO и MU-MIMO завязана на своевременном получении информации о состоянии канала, на основании которой происходит подбор СКК и формирование нескольких ортогональных пространственных потоков. Состояние многопользовательского канала с большим числом пространственных потоков быстро меняется со временем, поэтому требуется крайне часто проводить процедуру измерения состояния канала (англ.: sounding). Устройства стандарта Wi-Fi 6 поддерживают лишь процедуру прямого измерения (англ.: explicit feedback), т. е. передачу измерительного кадра в одну сторону и результатов измерения в другую. Длительность такого обмена превышает пару сотен микросекунд на станцию. Следовательно, в крупномасштабном промышленном сценарии с десятками станций, процедура измерения может потреблять большую часть ресурсов канала, нивелируя весь возможный выигрыш от (MU-)MIMO.

Чтобы продемонстрировать этот эффект, рассмотрим следующий сценарий. Пусть в канале 20 МГц точка доступа периодически отправляет одной станции кадр размером 2932 байт (соответствует A-MSDU, включающему в себя 25 MSDU размером 100 байт). Период отправки кадра составляет  $T = 5$  мс.

Для различных СКК измеряется длительность и надежность передачи кадра, а также длительность процедуры измерения состояния канала. После чего выбирается СКК, обеспечивающая уровень потерь в  $10^{-6}$  с минимальной длительностью передачи. Исследуется всенаправленный способ передачи «OMNI» (без использования какой-либо информации о канале), а также MIMO-передачи с формированием 1 и 2 пространственных потоков (1 SS и 2 SS на рис. 1) на основе информации о канале, получаемой с периодом  $\hat{T}$ . На рис. 1(а) представлены суммы длительности передачи самого кадра и удельной (в пересчете на период отправки кадра данных, равный  $T = 5$  мс) длительности процедуры измерения состояния канала. Внутри каждого столбца подписана СКК, обеспечивающая уровень потерь ниже  $10^{-6}$ . Кроме того, по оси абсцисс у каждого столбца подписано число пространственных потоков, а также нотация метода: «OMNI» или «1 : n», где последнее означает, что  $\hat{T} = n \cdot T = n \cdot 5$  мс.

В то время как актуальная информация о канале позволяет выбирать более скоростные СКК, из-за отсутствия этой информации для всенаправленной передачи должна быть выбрана более робастная СКК, удлинняяющая передачу. Заметим, что при частом проведении про-

(а) Передача одной станции ( $N = 1$ ) в нисходящем канале



(б) OFDMA-передача  $N = 9$  станциям в нисходящем канале

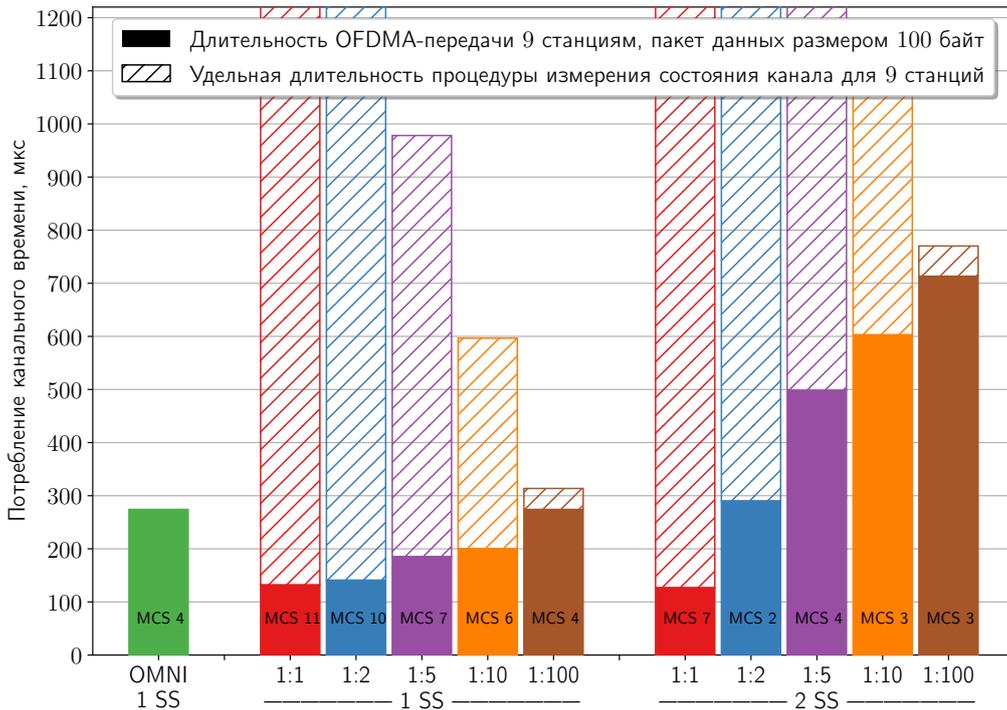


Рис. 1. Сумма длительности передачи кадра и удельной (в пересчете на период отправки кадра данных, равный  $T = 5$  мс) длительности процедуры измерения состояния канала на СКК, обеспечивающей уровень потерь не более, чем  $10^{-6}$ .

цедуры измерения состояния канала (столбцы «1 : 1» и «1 : 2») накладные расходы на эту процедуру превышают возможный выигрыш. Согласно представленным результатам, за счет формирования пространственных потоков можно выиграть около 22% канального времени передачи рассмотренного кадра, что есть относительная разница между зеленым «OMNI» и рыжим «2 SS, 1 : 10» столбцами.

Однако рассмотренный эксперимент представляет передачу одной станции, в то время как сценарий, описанный в разделе 3, предполагает передачу множеству устройств. При большом числе станций объем накладных расходов стремительно растет, что нивелирует выигрыш относительно всенаправленных передач. На рис. 1(б) представлен аналогичный набор результатов для доставки пакетов размером 100 байт в канале 20 МГц для  $N = 9$  станций при помощи OFDMA в нисходящем канале. Можно видеть, что для  $N = 9$  станций длительность процедуры измерения состояния канала превышает возможный выигрыш от формирования пространственных потоков. Для значений  $N > 9$  ситуация будет усугубляться и длительность процедуры измерения состояния канала превысит длительность замкнутого цикла обмена сообщениями, представляющего интерес для сценариев IoT.

Кроме того, описанный эксперимент не включает в себя возможные потери в процессе измерения состояния канала. В цикле обязательно присутствуют межкадровые интервалы и промежутки отсчета отсрочки, длительность которых не снижается от увеличения номинальных скоростей передачи данных, из-за чего общий выигрыш по длительности цикла от формирования пространственных потоков составляет менее 5%. Как результат, оказывается выгодным вовсе отказаться от MIMO и MU-MIMO, т. е. от проведения процедуры измерения состояния канала и формирования пространственных потоков, и использовать всенаправленные передачи, не требующие получения информации о канале.

Однако необходимо отметить, что всенаправленная передача не запрещает многоантенный прием, который заключается в эквализации (англ.: equalization) канала. Процедуры выравнивания, например, использование алгоритма, минимизирующего средний квадрат ошибки измерений (англ.: Minimum Mean Square Error, MMSE), дает значительный выигрыш в надежности, что будет продемонстрировано в следующем подразделе.

## OFDMA

Другим способом снижения доли накладных расходов является использование технологии OFDMA, поддержка которой добавлена в рамках стандарта Wi-Fi 6 [13]. OFDMA повышает эффективность распределения ресурсов путем агрегирования передач в частотной области и мультиплексирования преамбул физического уровня.

OFDMA позволяет использовать для передачи узкие частотные ресурсы, называемые ресурсными блоками (англ.: Resource Units, RUs). Благодаря этому в рамках одной OFDMA-передачи в разных RU могут одновременно передаваться данные от/для различных устройств. При этом длительности передач во всех RU должны быть выровнены. Каждый RU может состоять из определенного числа поднесущих: 26, 52, 106, 242, 484, 996,  $2 \times 996 = 1992$ . В зависимости от ширины RU и ширины используемого канала одна OFDMA-передача может использовать разное число RU. В таблице 2 для каналов разной ширины представлено максимальное количество одинаковых RU.

В режиме OFDMA все передачи инициируются точкой доступа. В случае нисходящего канала точка доступа сообщает информацию о назначенных RU в преамбуле физического уровня. В восходящем канале схема передачи состоит из двух этапов. Во-первых, точка доступа должна каким-то образом узнать, какие станции имеют данные для передачи. Для этого, по умолчанию, станции информируют точку доступа об объеме данных, которое они готовы отправить в специальном поле заголовка канального уровня. Затем точка доступа получает доступ к кана-

Таблица 2. Максимальное количество одинаковых RU для каналов разной ширины.

Число поднесущих в RU	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц
26	9	18	37	74
52	4	8	16	32
106	2	4	8	16
242	1	2	4	8
484	—	1	2	4
996	—	—	1	2
1992	—	—	—	1

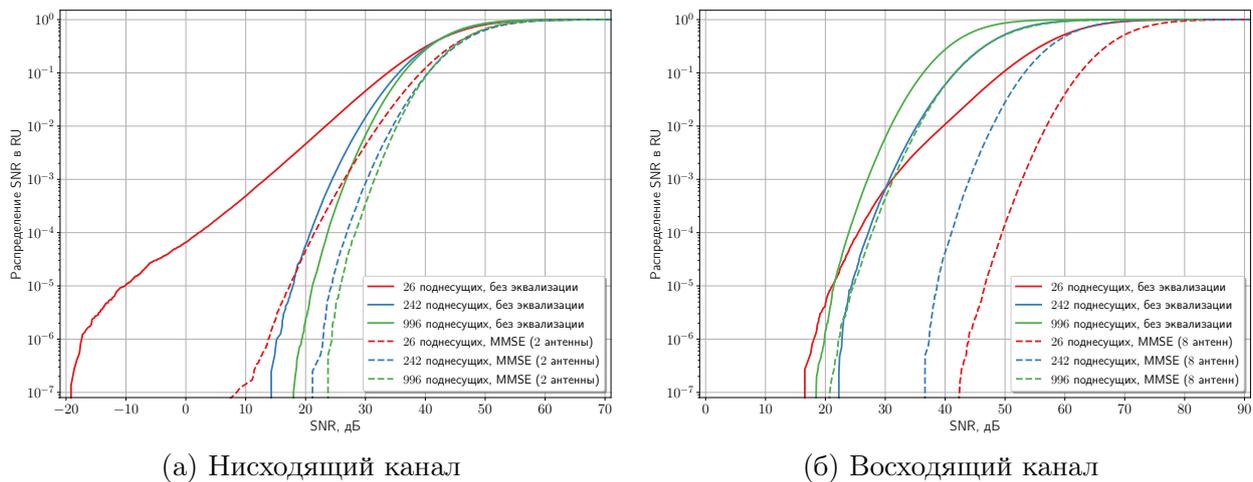
лу и отправляет специальный триггер-кадр (англ.: Trigger Frame, TF), в котором содержится информация о назначенных RU, используемые СКК, а также продолжительность передачи. В ответ на TF, в соответствии с полученной информацией, станции начинают свои передачи в восходящем канале. Стоит отметить, что стандарт позволяет использовать дополнительные механизмы для получения информации о размере буфера станций, например, механизмы Traffic Specification (TSPEC) или Stream Classification Service (SCS).

За счет управления доступом к среде с помощью TF точка доступа может повысить эффективность использования канала станциями. Она также может деприоритизировать или даже полностью отключить классический случайный доступ станций к каналу [26]. Для этого точка доступа отправляет служебные кадры, называемые биконами, с определенными наборами параметров доступа к каналу (MU-EDCA Parameter Set) для станций, использующих OFDMA.

Использование OFDMA имеет ряд преимуществ по сравнению с широкополосными передачами в сетях Wi-Fi. Во-первых, OFDMA мультиплексирует обязательные преамбулы физического уровня для разных пакетов в одну. Следовательно, когда несколько пакетов передаются с помощью OFDMA, они потребляют меньше частотно-временных ресурсов на передачу преамбулы, и доля накладных расходов снижается. Во-вторых, OFDMA в восходящем канале улучшает спектральную плотность мощности на получателе, поскольку каждая из станций может использовать полную мощность в более узких RU. Это увеличивает отношения сигнал-шум (англ.: Signal to Noise Ratio, SNR) и сигнал-шум плюс помехи (англ.: Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) на приемнике, что повышает надежность передачи и/или позволяет выбрать более скоростную СКК и снизить время доставки. В-третьих, OFDMA в восходящем канале в совокупности с отключенным механизмом CSMA/CA у станций уменьшает время доставки за счет снижения накладных расходов на доступ к среде [13].

В то же время передачи OFDMA в нисходящем канале имеют ту же спектральную плотность мощности, что и передачи в широком канале. Более того, следуя выводам раздела 4.1, заключаем, что процедура измерения состояния канала является слишком затратной в рассматриваемом сценарии. В отсутствие этой процедуры точка доступа не имеет информации о состоянии канала и не может использовать частотную избирательность. Следовательно, она может назначать частотные ресурсы для OFDMA-передач только случайным образом, что математически эквивалентно случайной выборке из распределения SNR на стороне получателя. При этом в более узких RU частотные замирания более коррелированы, в результате чего эффективный SNR канала имеет большую дисперсию и более «тяжелый» хвост распределения в области низких SNR.

Рассмотрим следующий эксперимент. Точка доступа использует канал шириной 80 MHz, однако не обладает информацией о частотной селективности при назначении RU для передачи. На рис. 2(а) представлены функции распределения SNR на получателе в нисходящем канале в зависимости от ширины используемого RU в случаях отсутствия и наличия



**Рис. 2.** Функции распределения SNR в RU различной ширины в случаях отсутствия и наличия MMSE-эквалазации.

MMSE-эквалазации. При этом предполагается, что используется полное заполнение канала одинаковыми RU, то есть каждой ширине RU соответствует их число в полосе 80 МГц, указанное в таблице 2. В этом случае вся мощность точки доступа равномерно делится на весь частотный канал (и все RU), то есть спектральная плотность мощности в RU остается постоянной. Как показывает рис. 2(а), разница в квантиле SNR по уровню  $10^{-6}$  между RU, состоящими из 26 и 996 поднесущих, в отсутствие эквалазации достигает нескольких десятков децибел. Применение MMSE-эквалазации на двух антеннах повышает средние показатели SNR, а также уменьшает разницу SNR на низких квантилях, которая, однако, остается значительной. Следовательно, при использовании одинаковой СКК широкополосные передачи в нисходящем канале имеют большое преимущество над OFDMA по показателю надежности.

Более того за счет снижения накладных расходов широкополосная групповая рассылка агрегированного кадра выигрывает у доставки пакетов с использованием OFDMA по показателю длительности передачи. Так, на рис. 3 в зависимости от числа станций  $N$  изображены длительности передач Groupcast и OFDMA в нисходящем канале с отключенным механизмом подтверждений на разных СКК в канале 20 МГц. Результаты представлены для одного пространственного потока в соответствии с выводами раздела 4.1. В случае одинаковой СКК время, затраченное на групповую рассылку агрегированного кадра, примерно в два раза меньше, чем длительность OFDMA-передачи. Отметим, что групповая рассылка обеспечивает лучшую надежность. В результате для обеспечения одного уровня надежности использование групповой рассылки позволяет выбирать более скоростные СКК, что отражается в более чем двукратном выигрыше по длительности передачи. В итоге заключаем, что в нисходящем канале предпочтительнее использовать групповую передачу и A-MSDU, состоящий из пакетов, адресованных разным станциям. Благодаря этому удастся как повысить надежность передачи за счет использования более широкого канала, так и уменьшить накладные расходы на заголовки канального уровня и межкадровые интервалы.

Также рассмотрим функции распределения SNR на получателе в восходящем канале на рис. 2(б). В этом случае каждая станция излучает сигнал только в рамках назначенного RU, поэтому мощность в RU оказывается постоянной величиной, а спектральная плотность мощности изменяется обратно пропорционально ширине RU. Интересно заметить, что увеличение спектральной плотности мощности в отсутствие процедуры эквалазации не покрывает отрицательный эффект коррелированности в узком канале: SNR по уровню  $10^{-6}$  в RU шириной 26 поднесущих оказывается немного ниже аналогичного квантиля SNR в широкополосных RU.

Однако при использовании MMSE-эквализации данный эффект пропадает. При этом средний SNR в узких RU оказывается намного выше, что позволяет выбирать более высокие СКК и превзойти широкие RU по показателю времени доставки. Кроме того, для узких RU возрастает максимальное число участвующих в передаче станций, как это показано в таблице 2, что уменьшает относительную долю накладных расходов в восходящем канале. Последнее позволяет сделать вывод о том, что в отсутствие информации о частотной селективности максимизация числа станций, передающих с использованием OFDMA, является эффективной техникой назначения RU. В итоге можно заключить, что в восходящем канале OFDMA помогает существенно уменьшить время доставки.

#### 4.2. Обеспечение детерминированной доставки сообщений

Ключевой потребностью индустриальных сценариев является обеспечение детерминированной доставки сообщений, что формализуется в виде строгих QoS-требований: низкого времени и высокой надежности доставки сообщений. Эти требования берут начало из необходимости точной синхронизации сообщений между устройствами, например, из сценариев совместной робототехники, когда двум или более роботам дается команда на совместное выполнение некоторых задач.

Технология Wi-Fi исторически подразумевает наличие неконтролируемых конкурирующих устройств в нелицензируемом спектре частот. При этом базовый случайный метод доступа к каналу, основанный на CSMA/CA, позволяет Wi-Fi работать в условиях конкуренции большого числа устройств. К сожалению, ценой этому является ненулевая вероятность появления

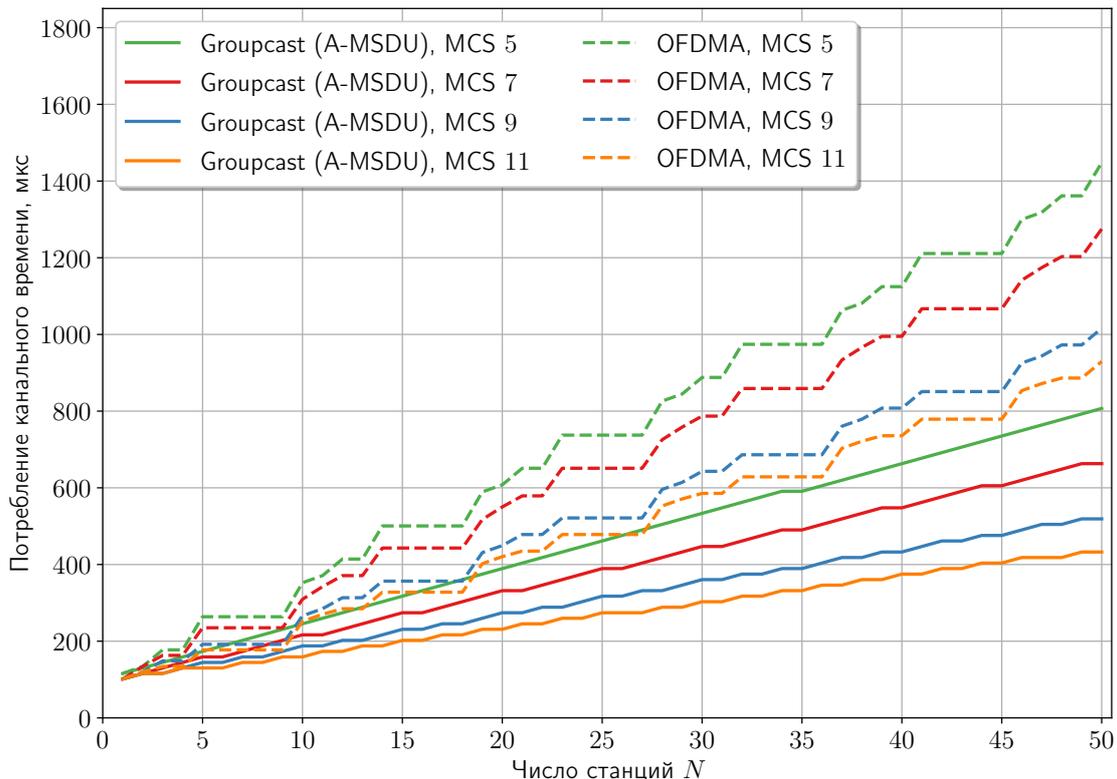


Рис. 3. Длительности передач  $N$  станциям для групповой рассылки и OFDMA на различных СКК в канале шириной 20 МГц в нисходящем канале.

коллизий между устройствами, влекущая за собой непредсказуемость производительности сети, особенно с точки зрения времени детерминированной доставки пакетов.

Однако современные версии стандарта Wi-Fi содержат ряд механизмов, которые позволяют улучшить производительность Wi-Fi с точки зрения обеспечения детерминированной доставки сообщений.

### Синхронизация по времени

Детерминированная доставка сообщений требует точной синхронизации устройств по времени. Механизмы синхронизации позволяют устройствам избежать и/или скомпенсировать различные случайные и неизвестные заранее задержки при генерации, планировании и обработке пакетов. Например, отправитель может указать в пакете точное время, когда пакет должен быть передан протоколу верхнего уровня на получателе.

В сетях Wi-Fi для решения задачи синхронизации введена специальная функция синхронизации времени (англ.: Time Synchronization Function, TSF). В каждой BSS точка доступа является опорным устройством синхронизации. Точка доступа периодически рассылает биконы, в которых содержится значение таймера TSF точки доступа. Станции, принимающие биконы, должны поддерживать свои значения таймера TSF в соответствии с рассылаемым. Однако TSF предназначена только для синхронизации устройств в рамках одной BSS, в то время как для обеспечения детерминированной доставки сообщений в рамках всей сети требуется синхронизация всей системы, т. е. нескольких BSS.

Дополнительно современный Wi-Fi определяет механизм объявления времени (англ.: Timing Advertisement, TA), позволяющий организовать синхронизацию часов по всей сети на основании некоторого внешнего источника времени. Точка доступа, которая действует как координатор часов, в специальных полях TA элемента в биконах сообщает смещение между таймером TSF точки доступа и источником внешнего времени. Станции используют свое значение таймера TSF, полученное значение таймера TSF и смещение для вычисления текущего времени. Исследования показывают, что TA позволяет достичь точности синхронизации порядка 5 мкс [27], что укладывается в классическое ограничение джиттера в несколько десятков мкс [3].

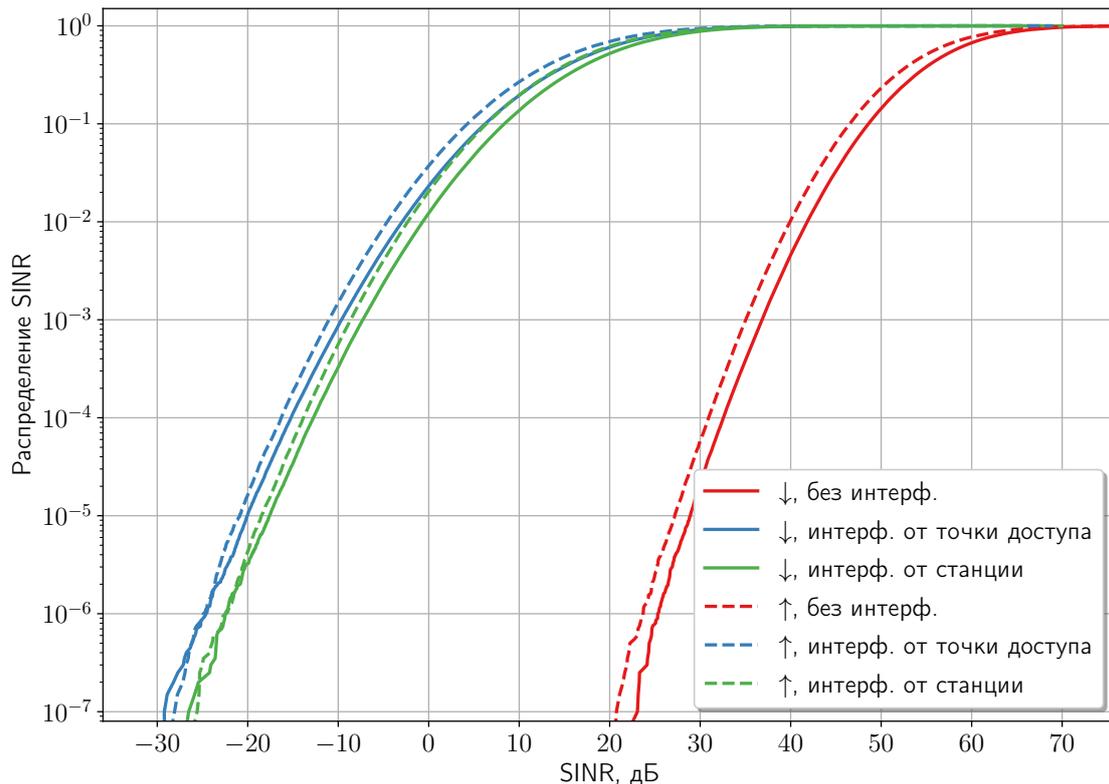
После установления единой синхронизации часов в рамках всей сети приложения, работающие на всех устройствах, могут построить общее расписание своих коммуникационных циклов. В частности, они должны их выровнять. Иными словами, в пределах одной BSS сообщения всех станций для точки доступа должны генерироваться в один момент времени, так же как и все сообщения на точке доступа для станций должны формироваться к одному (другому) моменту времени. Такое расписание имеет следующие преимущества. Во-первых, оно повышает эффективность механизмов, описанных в разделе 4.1. В случае синхронизации генерации пакетов на станциях получится передать все пакеты в одной OFDMA-передаче в восходящем канале, затратив время на доступ к среде лишь единожды. В случае синхронизации генерации пакетов на точке доступа повысится эффективность механизмов агрегации и снизится относительная доля накладных расходов на преамбулы и доступ к среде. Во-вторых, при составлении единого строгого расписания такой подход гарантирует, что только одно устройство в сети имеет пакеты для передачи в определенный момент времени, а значит, снижается число устройств, конкурирующих за канал, что снижает вероятность коллизий.

### Избежание интерференции

Объем доступного спектра частот ограничен, поэтому в крупномасштабных сценариях с большим числом точек доступа несколько BSS вынужденно сосуществуют в одном частотном

канале. Интерференция между такими BSS приводит к ухудшению SINR, что влечет за собой невозможность удовлетворить строгие QoS-требования.

Чтобы продемонстрировать этот эффект, рассмотрим следующий эксперимент. Пусть в канале шириной 20 MHz сосуществуют две BSS. Центры интерферирующих BSS, в которых находятся точки доступа, удалены друг от друга на расстояние около 45 м. Следуя изложенной в разделе 4.1 идее, предположим, что при назначении частотно-временных ресурсов у точки доступа отсутствует какая-либо информация о канале. В этом случае реализация SINR на получателе эквивалентна выборке значения из свертки распределений, описывающих затухание сигнала, крупномасштабные и мелкомасштабные замирания. Аналогичным образом оценивается распределение интерференции, источником которой являются точка доступа или случайная станция из соседней BSS. После чего подсчитывается распределение SINR.



**Рис. 4.** Функции распределения SINR в различных интерференционных сценариях.

На рис. 4 представлены полученные распределения SINR на случайной станции (в нисходящем канале, ↓) и на точке доступа (в восходящем канале, ↑) в различных интерференционных сценариях:

- отсутствие интерференции,
- наличие интерференции от точки доступа соседней BSS,
- наличие интерференции от случайной станции из соседней BSS.

Небольшое различие в поведении кривых SINR в случае нисходящего и восходящего каналов обусловлено их различными свойствами, например, различными высотами, на которых располагаются антенны точек доступа и станций.

При наличии интерференции SINR деградирует на величину более 35 дБ на всем диапазоне вероятностей. Чтобы преодолеть это обстоятельство, необходимо сильно понижать ин-

декс СКК, что в разы увеличивает длительности передач и время доставки пакета. Если не понижать СКК, то высокая вероятность коллизии не позволит выполнить требования к надежности доставки пакетов, а случайная природа повторов не позволит выполнить требование к детерминированному времени доставки сообщений.

Таким образом, наличие одновременных передач в одном частотном канале делает невозможным выполнение QoS-требований ПоТ. Для одновременных передач требуется выбирать различные частотные каналы, а в случаях, когда это невозможно, необходимо разносить передачи по времени. Последнее предложение эквивалентно тому, что приложения, принадлежащие к различным BSS, использующие один и тот же канал, должны планировать свои коммуникационные циклы так, чтобы в каждый момент времени канал занимал только одна из BSS. Альтернативой временному разнесению передач является использование методов координированных передач для избегания интерференции между соседними BSS. Примером такого метода является подстройка мощности в рамках механизма пространственного разнесения: Overlapping BSS Packet Detect (OBSS PD) [28] и Parametrized Spatial Reuse (PSR) [29].

### Доступ по расписанию

В разделе 4.2 отмечается, что генерация пакетов по расписанию снижает долю накладных расходов. Естественным продолжением этой идеи является не только генерация, но и осуществление передач в соответствии со строгим расписанием.

При помощи TF точка доступа может поддерживать строгое расписание передач. Одним из вариантов настройки случайного доступа станций при помощи MU-EDCA Parameter Set является его периодический запрет. В этом случае инициатором передачи может выступать только точка доступа, что исключает возможность коллизии внутри одной BSS.

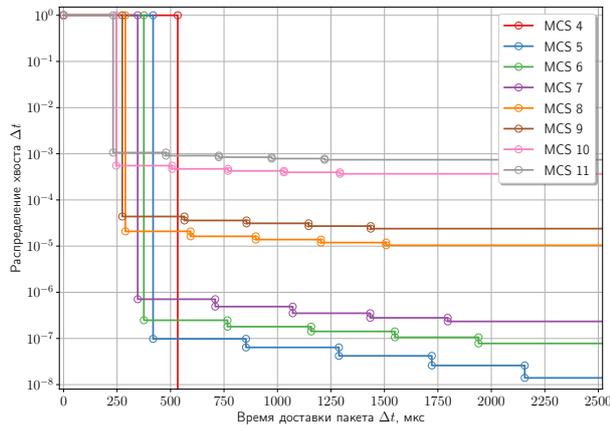
Если при составлении расписания генерации пакетов на все BSS учесть межкадровые интервалы и временные промежутки, требуемые на отсчет отсрочки, то в отсутствие сторонних источников трафика точки доступа будет получать доступ к среде мгновенно. Такой подход убирает случайность механизма доступа к среде. Однако стоит заметить, что для составления расписания требуется точное знание длительности всех передач вместе с их повторами, если они есть, природа которых носит случайный характер.

### Повторные передачи

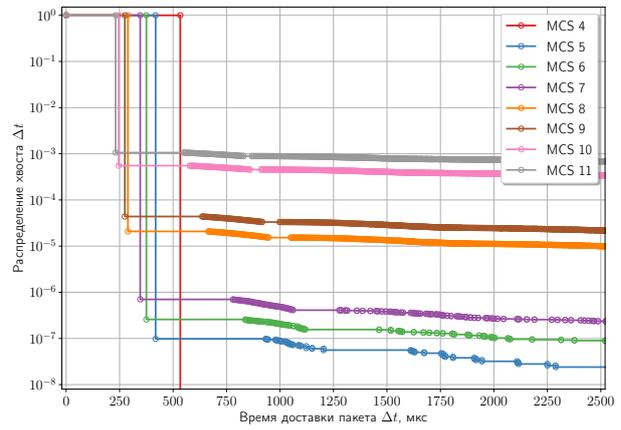
Одним из наиболее часто используемых способов повышения надежности в условиях строгих ограничений на долю потерянных пакетов и детерминированное время доставки является использование безусловных (слепых) повторов.

Однако временное разнесение повторных передач может быть недостаточным для достижения существенного выигрыша в надежности. Чтобы продемонстрировать этот эффект, рассмотрим следующий сценарий. Пусть в канале 20 МГц точка доступа периодически отправляет контроллеру кадр размером 2932 байт (соответствует A-MSDU, включающему в себя 25 MSDU размером 100 байт), повторяя его еще четыре раза.

На рис. 5(а) представлены распределения хвоста (дополнения функций распределения до единицы) времени доставки пакетов для различных СКК, т. е. распределения вероятности того, что кадр задержится дольше, чем на  $\Delta t$ . Каждое изменение вероятности, т. е. ступенька на графике, обрамленная маркерами, отражает ненулевую вероятность успешной доставки очередной попытки при условии неуспеха всех предыдущих. Плато после  $\sim 400$  мкс означает, что повторные передачи не дают значительного выигрыша в надежности: если первая передача не удалась, то повторные попытки передачи будут потерянны с вероятностью, близкой к 1. Причиной этого является слабое изменение SNR на масштабе длительности процедуры повторной



(а) Использование 5 безусловных попыток передачи



(б) Использование стандартного механизма повторных передач Wi-Fi

**Рис. 5.** Распределение хвоста (дополнение кумулятивной функции распределения до единицы) времени доставки пакетов  $\Delta t$ .

передачи, несмотря на высокую скорость перемещения устройств. В результате оказывается выгоднее изначально выбирать более надежную СКК для передачи как с точки зрения надежности, так и с точки зрения времени доставки пакета.

Альтернативой механизму безусловных повторов является повторы на основе обратной связи, организованной при помощи подтверждений доставки пакетов. На рис. 5(б) показаны распределения хвоста времени доставки пакетов в случае работы стандартного механизма повторных передач Wi-Fi на основе передачи подтверждений доставки, использующего одинаковую СКК как для изначальной, так и для повторных передач. В этом случае изначальный выбор более робастной СКК также оказывается предпочтительным. Кроме того, случайная природа появления ошибок и механизма доступа к среде при повторной передаче влечет за собой необходимость увеличения длительности цикла обмена сообщениями и нарушение детерминированной доставки.

Таким образом, использование механизма подтверждений по совокупности показателей надежности и детерминированного времени доставки сообщений оказывается менее эффективным, чем изначальный выбор надежной СКК для единственной передачи. Следуя этой идее, предлагается деактивировать стандартный механизм повторов и подтверждения сетей Wi-Fi, т. е. использовать политику отсутствия подтверждений (англ.: NoAck policy). Такой подход дополнительно снижает долю накладных расходов за счет отсутствия передач подтверждений. При этом статистика о надежности доставки пакетов, если она требуется, может собираться на уровне приложения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализировано влияние механизмов Wi-Fi 6 на ключевые показатели производительности системы в промышленных сценариях, такие как время и надежность доставки сообщений. В частности, было показано, как и какие существующие механизмы Wi-Fi 6 могут быть использованы для улучшения производительности в сценариях с характерными для IIoT строгими QoS-требованиями. Например, продемонстрировано, что использование групповой рассылки в широком канале имеет преимущество над использованием OFDMA в нисходящей линии связи как с точки зрения времени доставки, так и с точки зрения надежности доставки передаваемых сообщений. Показано, что использование MIMO может не давать привычного выигрыша в производительности системы из-за особенностей IIoT сценария, в то время как

применения эквализации оказывается полезным. Представленные в работе результаты указывают на то, что использование механизмов подтверждений и повторных передач может не давать значимого выигрыша по показателю надежности, потребляя при этом большой объем канальных ресурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of Things and industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 17–27.
2. E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, and M. Gidlund. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, no. 11, pp. 4724–4734.
3. K. Montgomery, R. Candell, Y. Liu, and M. Hany. *Wireless user requirements for the factory workcell*. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2020.
4. M. Luvisotto, Z. Pang, and D. Dzung. High-performance wireless networks for industrial control applications: New targets and feasibility. *Proceedings of the IEEE*, 2019, vol. 107, no. 6, pp. 1074–1093.
5. A. Aijaz. High-performance industrial wireless: Achieving reliable and deterministic connectivity over IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2020, vol. 1, pp. 28–37.
6. W. Liang, J. Zhang, H. Shi, K. Wang, Q. Wang, M. Zheng, and H. Yu. An experimental evaluation of WIA-FA and IEEE 802.11 networks for discrete manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, no. 9, pp. 6260–6271.
7. J. Song, S. Han, A. Mok, D. Chen, M. Lucas, M. Nixon, and W. Pratt. WirelessHart: Applying wireless technology in real-time industrial process control. *2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2008, pp. 377–386.
8. A. Aijaz, A. Stanoev, and U. Raza. GALLOP: Toward high-performance connectivity for closing control loops over multi-hop wireless networks. *Proceedings of the 27th International Conference on Real-Time Networks and Systems*, 2019, RTNS '19, (New York, NY, USA), p. 176–186, Association for Computing Machinery.
9. Z. Pang, M. Luvisotto, and D. Dzung. Wireless high-performance communications: The challenges and opportunities of a new target. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 20–25.
10. O. Seijo, J. A. Lopez-Fernandez, and I. Val. W-SHARP: Implementation of a high-performance wireless time-sensitive network for low latency and ultra-low cycle time industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 3651–3662.
11. A. Aijaz. Private 5G: The future of industrial wireless. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2020, vol. 14, no. 4, pp. 136–145.
12. A. Karamyshev, E. Khorov, A. Krasilov, and I.F. Akyildiz. Fast and accurate analytical tools to estimate network capacity for URLLC in 5G systems. *Computer Networks*, 2020, vol. 178.
13. E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi. A tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 197–216.
14. E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov. Enabling Massive Real-Time Applications in IEEE 802.11be Networks. *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2019, pp. 1–6.
15. R. Maldonado, A. Karstensen, G. Pocovi, A. A. Esswie, C. Rosa, O. Alanen, M. Kasslin, and T. Kolding. Comparing Wi-Fi 6 and 5G downlink performance for industrial IoT. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 86928–86937.
16. X. Jiang, M. Luvisotto, Z. Pang, and C. Fischione. Reliable minimum cycle time of 5G NR based on data-driven channel characterization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, no. 11, pp. 7401–7411.

17. X. Jiang, M. Luvisotto, Z. Pang, and C. Fischione. Latency performance of 5G New Radio for critical industrial control systems. *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2019, pp. 1135–1142.
18. K. Bhimavarapu, Z. Pang, O. Dobrijevic, and P. Wiatr. Unobtrusive, accurate, and live measurements of network latency and reliability for time-critical Internet of Things. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 38–43.
19. J. Perez-Ramirez, O. Seijo, and I. Val. Time-critical IoT applications enabled by Wi-Fi 6 and beyond. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 44–49.
20. S. Avallone, P. Imputato, and D. Magrin. Controlled channel access for IEEE 802.11-based wireless TSN networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 90–95.
21. R. Wenqi. Wi-Fi 6E Performance Evaluation in Industrial Scenarios. Master’s programme degree project, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS), 2022.
22. P. Nain, D. Towsley, B. Liu, and Z. Liu. Properties of random direction models. *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, 2005, vol. 3, pp. 1897–1907.
23. T. Jiang, J. Zhang, P. Tang, L. Tian, Y. Zheng, J. Dou, H. Asplund, L. Raschkowski, R. D’Errico, and T. Jämsä. 3GPP standardized 5G channel model for IIoT scenarios: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, no. 11, pp. 8799–8815.
24. “Network simulator 3 (ns-3).” <https://www.nsnam.org>. Дата обращения: 01-09-2023.
25. S. Jaeckel. QuaDRiGa - Quasi Deterministic Radio Channel Generator, User Manual and Documentation. Technical Report. Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2021. Version 2.6.1.
26. E. Khorov, V. Loginov, and A. Lyakhov. Several EDCA parameter sets for improving channel access in IEEE 802.11ax networks. *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2016, pp. 419–423.
27. A. Mahmood, R. Exel, and T. Sauter. Performance of IEEE 802.11’s Timing Advertisement Against SyncTSF for Wireless Clock Synchronization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, vol. 13.
28. A. Krotov, A. Kiryanov, and E. Khorov. Rate Control With Spatial Reuse for Wi-Fi 6 Dense Deployments. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 168898-168909.
29. K. Chemrov, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov. Support of Real-Time Applications in Wi-Fi 6 with Multi-Ap Coordinated Parameterized Spatial Reuse. *2023 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2023, pp. 226-231.

## A Study of Wi-Fi 6 Capability to Satisfy Requirements of the Industrial Internet of Things

**A.Y. Karamyshev, M.V. Liubogoshchev, A.I. Lyakhov, E.M. Khorov**

In recent years, wireless Industrial Internet of Things systems have been rapidly developing. However, the selection and configuration of wireless technologies for IIoT systems pose a challenge, as they need to satisfy stringent quality of service requirements for a large number of devices while also being readily available. A promising technology in this regard is Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax). Despite its potential, the effective use of Wi-Fi 6 in IIoT scenarios is still an open question. The paper analyzes the impact of Wi-Fi 6 mechanisms on key performance indicators, such as latency and reliability of message delivery. By examining these mechanisms, the paper reveals how and which Wi-Fi 6 mechanisms can be leveraged to improve performance under stringent requirements in industrial scenarios.

**KEYWORDS:** IIoT, QoS, Wi-Fi 6.