

Сокращенная повторная преамбула для механизма вытеснения в Wi-Fi 8¹

А. А. Третьяков^{*,**}, И. А. Левицкий^{*}, Е. М. Хоров^{*}

^{*}Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

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

Поступила в редколлегию 01.10.2025 г. Принята 12.12.2025 г.

Аннотация—Приложения промышленной автоматизации и дополненной реальности требуют низких задержек при обслуживании трафика в беспроводных сетях. Механизм вытеснения является одним из потенциальных технических решений для этой цели в будущем стандарте Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn). Вытеснение позволяет прерывать длинные кадры для передачи срочных данных в освободившихся интервалах времени. В данной работе предложен формат сокращенной преамбулы для вытесняемых кадров, который минимизирует накладные расходы, не снижая вероятность успешной доставки этих кадров. На основе программно-определяемого радио разработан прототип устройства Wi-Fi с поддержкой вытеснения. Эксперименты показали, что предложенная сокращенная преамбула уменьшает не только накладные расходы, но и долю битовых ошибок по сравнению с альтернативами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: IEEE 802.11bn, Wi-Fi 8, механизм вытеснения, преамбула, гарантированные низкие задержки, URLLC.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_714

1. ВВЕДЕНИЕ

За два последних десятилетия технология Wi-Fi значительно эволюционировала благодаря многочисленным дополнениям к стандарту IEEE 802.11. Однако требования приложений реального времени (англ.: Real-Time Applications, RTA) к беспроводным сетям становятся строже. Допустимая задержка сокращается до десятков миллисекунд (в задачах дополненной реальности) и даже одной миллисекунды (в системах промышленной автоматизации и на «умных» предприятиях) [1]. Современные сети Wi-Fi не всегда способны обеспечить такую производительность в перегруженном нелицензируемом спектре [2]. Сети последнего поколения Wi-Fi 7 используют различные подходы для обеспечения низкой задержки, например механизм пробуждения по расписанию с ограниченным резервированием (англ. Restricted Target Wake Time, R-TWT) [3, 4], однако они могут быть недостаточно эффективны в случаях аperiodического трафика приложений реального времени.

Разрабатываемый стандарт IEEE 802.11bn, известный как Wi-Fi 8, нацелен на обеспечение сверхвысокой надежности (англ.: Ultra-High Reliability, UHR) и вводит набор функций для гарантированного обслуживания трафика с задержкой менее 1 мс [5]. Перспективным нововведением является *механизм вытеснения* (англ.: preemption), призванный сократить задержку доступа к каналу (англ.: channel access latency) [6]. В худшем случае эта задержка доступа может достигать времени передачи длинного кадра, то есть нескольких миллисекунд.

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00816

Механизм вытеснения позволяет прервать текущую передачу, уменьшая время до начала отправки срочного кадра. Эта идея заимствована из стандарта IEEE 802.1Qbu для проводных сетей, чувствительных к задержке (англ.: Time-Sensitive Networking, TSN) [7].

В Wi-Fi 8 рассматривается, в частности, вытеснение на уровне кадра (англ.: physical protocol data unit, PPDU). Длинный кадр делится на *сегменты*, передаваемые с короткими паузами — интервалами вытеснения. В эти паузы устройства со срочным трафиком могут получить доступ к среде (например, с помощью сигналов занятости), прерывая текущую передачу. Если запрос не поступает, передача возобновляется.

Однако механизм вытеснения вносит дополнительные издержки. Каждый сегмент прерываемого кадра должен содержать заголовок физического уровня, или *повторную преамбулу* (англ.: secondary preamble). Передающее устройство должно остановить передачу, перейти в режим приёма и, если запроса на передачу срочного кадра не поступило, вернуться к передаче. За это время могут измениться параметры канала и физические характеристики, например, частота и фаза гетеродина, что потребует повторной синхронизации.

Естественным кандидатом на роль повторной преамбулы является основная преамбула кадра. Однако, в стандарте Wi-Fi 8 ее длительность составляет не менее 56 мкс, и ее использование без изменений приводит к значительным накладным расходам: более 25% при интервалах вытеснения 0,2 мс, необходимых для обеспечения низкой задержки в промышленных приложениях. Таким образом, актуальна задача разработки компактного формата повторной преамбулы, который минимизирует накладные расходы, не снижая надежности приема.

В данной работе впервые предложен и исследован новый формат сокращенной повторной преамбулы, обеспечивающий минимальные накладные расходы без снижения вероятности успешной передачи. Проанализированы функции преамбулы кадров Wi-Fi и предложены методы повторного использования служебной информации из основной преамбулы. Для учета возможных аппаратных несовершенств разработана экспериментальная установка на базе программно-определяемой радиосистемы. Проведено практическое сравнение производительности предлагаемого формата повторной преамбулы с полной преамбулой. Показано, что предложенный формат не только сохраняет высокую надежность исходного формата кадра 802.11, но и в ряде случаев превосходит ее.

Статья структурирована следующим образом. В разделе 2 приведено краткое описание механизма вытеснения и обзор литературы. В разделе 3 описаны рассматриваемые форматы повторной преамбулы. В разделе 4 представлена схема эксперимента и анализ результатов. В разделе 5 сформулированы выводы.

2. ОБЗОР МЕХАНИЗМА ВЫТЕСНЕНИЯ

Первоначально механизм вытеснения был разработан для сетей Ethernet с поддержкой TSN [7, 8], где длительные передачи крупных кадров вызывают неприемлемые задержки для чувствительного трафика. Решением стало введение дополнения IEEE 802.3br с возможностью прерывания кадров.

В сотовых сетях 5G реализация вытеснения имеет свою специфику [9, 10]. В нисходящем канале базовая станция может отменять заранее запланированные передачи для одних пользователей, переназначая ресурсы другим с более строгими требованиями к задержке. Последующее уведомление об отмене передается с помощью контрольных сообщений. Аналогичный механизм применяется и для восходящего канала.

Если выделенные ресурсы были переназначены лишь частично, пользователь предпринимает попытку повторно декодировать оставшуюся часть принятого сигнала. Также, базовая станция может отозвать ресурсы, выделенные на передачу в восходящем канале, для прио-

ритизации пользователей, требующих низкую задержку. В сочетании с другими механизмами вытеснение позволило обеспечить сверхнадежную связь с малой задержкой в сетях 5G [10]. Ключевой задачей остается разработка эффективных планировщиков, удовлетворяющих требованиям чувствительного к задержке трафика без существенных потерь производительности для всего остального трафика [11–13].

Механизм вытеснения рассматривается и целевой группой IEEE 802.11bn (TGbn), стандартизирующей технологию Wi-Fi 8 [2, 5, 14]. Впервые для Wi-Fi 8 идея вытеснения предложена вместе с концепцией агрегации PPDU в [15]. Передатчик периодически прерывает собственный кадр, чтобы дать возможность для передачи срочного кадра. Идея получила развитие в [16] с предложением «двумерного» A-PPDU, объединяющего PPDU разных поколений с использованием множественного доступа с ортогональным частотным разделением (англ.: orthogonal frequency division multiple access, OFDMA). Точка доступа может обслуживать устройства разных поколений одновременно, в одном из компонентов «двумерного» A-PPDU поддерживаются прерывания.

Другой подход — это вытеснение на канальном уровне (англ.: TXOP-level preemption). Он основан на механизме TXOP (англ.: Transmission Opportunity), который позволяет устройству Wi-Fi резервировать канал на некоторое время для обмена кадрами без вмешательств от посторонних устройств. Вытеснение на канальном уровне позволяет устройствам передавать кадры со срочным трафиком внутри чужих TXOP с более низким приоритетом [17]. Для этого вводятся ограничения на длину передаваемых кадров в течении таких TXOP. Моделирование показывает, что вытеснение может сократить максимальную задержку [18, 19] в 10 раз, если 6-миллисекундные PPDU разделить на сегменты по 1 мс.

Вытеснение на физическом уровне обеспечивает меньшие накладные расходы по сравнению с вытеснением на канальном уровне, поскольку сокращает количество преамбул и заголовков в сегментах прерываемого кадра. Несмотря на это преимущество, вытеснение на физическом уровне до сих пор мало изучено. Особое внимание следует уделить проектированию формата повторной преамбулы. Примечательно, что, хотя TGbn рассматривает новую конструкцию преамбулы кадра [20, 21], группа фокусируется исключительно на начальной преамбуле.

В статье [22] разработана аналитическая модель слотированного метода доступа к каналу для механизма вытеснения, позволяющая оценить задержку для трафика реального времени и пропускную способность основного трафика прерываемых передач. Используя эту модель, авторы вычисляют оптимальное количество интервалов вытеснения для выполнения требований качества обслуживания трафика реального времени.

Концептуально похожим на повторные преамбулы элементом являются мидамбулы (англ.: midambles), предназначенные для предотвращения устаревания информации о быстро меняющемся состоянии канала. В сценариях с высокой мобильностью устройств состояние канала может измениться во время передачи длинного кадра, и устаревшая оценка канала увеличивает вероятность ошибок приема к концу кадра. Мидамбулы содержат пилотные сигналы и добавляются в длинные кадры с определенным периодом. Приемник использует эти сигналы для регулярного обновления оценки канала. В исследованиях показано, что мидамбулы эффективно справляются с устареванием и повреждением оценки канала по начальной преамбуле, улучшая надежность приема [23]. Хотя мидамбулы концептуально схожи с повторными преамбулами, они не были протестированы в сценариях, где передача прерывается, а затем возобновляется, как в механизме вытеснения. Прерывание передачи приводит к резкому изменению некоторых параметров, например, смещению несущей частоты и скачку фазы гетеродина. Это контрастирует со сценариями с непрерывным изменением канала, рассмотренным в исследованиях мидамбулы.

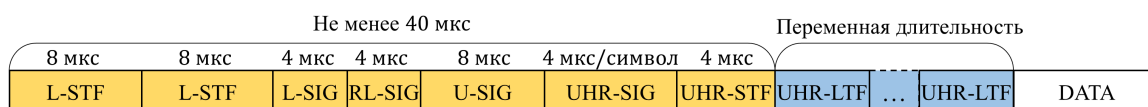


Рис. 1. Форматы кадра Wi-Fi 8 без поддержки вытеснения.

В итоге, ни одно исследование в литературе не рассматривает разработку повторных преамбул, необходимых для механизма вытеснения на физическом уровне. Это остается открытой и важной задачей. В данной работе впервые предлагается формат повторной преамбулы для кадров Wi-Fi, поддерживающих механизм вытеснения.

3. АНАЛИЗ ПРЕАМБУЛЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОРМАТА ПОВТОРНОЙ ПРЕАМБУЛЫ

Рассмотрим структуру и назначение компонентов (полей) преамбулы в стандарте 802.11 [24, 25]. Для примера рассмотрим формат кадра 802.11bn. Поля преамбулы можно разделить на три функциональные группы:

1. Поля Short Training Field (STF) служат для обнаружения кадра, синхронизации по времени, автоподстройки усиления (англ.: Automatic Gain Control, AGC) и грубой оценки смещения несущей частоты (англ.: Carrier Frequency Offset, CFO) [25].
2. Поля Long Training Field (LTF) используются для оценки состояния канала и, совместно с пилотными поднесущими, для точной оценки CFO. Количество LTF увеличивается с ростом числа пространственных потоков.
3. Поля Signaling (SIG) содержат служебную информацию о кадре: длину, сигнально-кодую конструкцию (СКК), полосу пропускания и т. д.

Преамбула начинается с так называемой Legacy-части (L-STF, L-LTF, L-SIG), обеспечивающей обратную совместимость со устройствами предыдущих поколений. За ней следует основная часть, которая реализует расширенные функции современных стандартов.

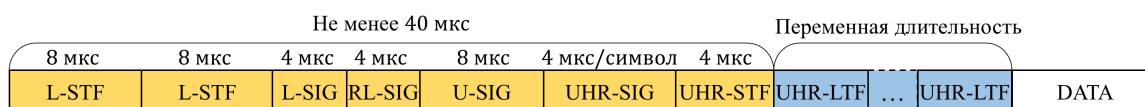
Наиболее прямолинейным подходом к формированию повторной преамбулы является использование всей преамбулы целиком. Назовем такой формат *Полной* повторной преамбулой. Он должен гарантировать надежное восстановление синхронизации, но вносит существенные накладные расходы: не менее 56 мкс на каждый интервал вытеснения.

Проанализируем функции полей, чтобы определить, какие из них можно исключить из повторной преамбулы без ущерба для работоспособности.

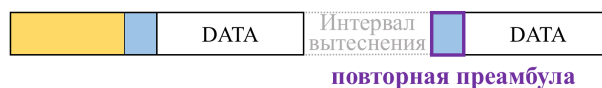
Детектирование кадра и временная синхронизация. Если длительность интервала вытеснения заранее известна, а запрос на прерывание не поступил, то моменты возобновления передачи предсказуемы для всех устройств. Если интервал вытеснения кратен длительности OFDM-символа, приемник отсчитывает необходимое их количество и возобновит прием точно в заданный момент без дополнительных синхронизирующих сигналов.

Автоподстройка усиления. Уровень принимаемого сигнала определяется мощностью передатчика и затуханием в среде. В типичных условиях обе эти величины не претерпевают резких изменений в течение одной передачи [26]. Соответственно, настройка усиления, сделанная по основной преамбуле, остается корректной и после интервала вытеснения.

Грубая оценка смещения несущей частоты. Основные источники CFO — это разность частот гетеродинов и эффект Доплера [27]. Первый фактор не вызывает проблем для восстанов-



а) Стандартный кадр Wi-Fi 8 без поддержки вытеснения

б) Кадр с поддержкой вытеснения и Полной повторной преамбулойв) Кадр с поддержкой вытеснения и Сокращенной повторной преамбулой**Рис. 2.** Форматы стандартного (а) и прерываемых (б, в) кадров Wi-Fi.

ления синхронизации, поскольку частоты гетеродинов остаются стабильными в течение передачи даже длинного кадра [28]. Значимое изменение частоты из-за эффекта Доплера нерелистично. Например, относительное ускорение устройств порядка 10 м/с^2 в течение кадра максимальной длительности (5 мс) приведет к сдвигу частоты на 0.8 Гц, что на четыре порядка ниже точности гетеродинов в типичных устройствах Wi-Fi. В оборудовании, используемом в эксперименте, эта точность составляет $2,5 \times 10^{-6}$ [29].

Таким образом, поля STF можно исключить из повторной преамбулы. Перейдем к анализу функций полей LTF.

Оценка канала. Хотя состояние беспроводного канала обычно не меняется резко в течение одного кадра, переключение между режимами передачи и приема во время интервала вытеснения может вызвать скачкообразное изменение фазы гетеродина [26]. Следовательно, повторная оценка фазы необходима для корректного продолжения приема.

Точная оценка смещения несущей частоты. Остаточное CFO после грубой компенсации по STF приводит к фазовому набегу между OFDM-символами. Обычно этот сдвиг отслеживается и корректируется с помощью пилотных поднесущих в каждом символе [28, 30].

Следовательно, поля LTF исключать полностью нельзя. Однако можно отказаться от L-LTF, так как все необходимые функции могут выполнять UHR-LTF. Рассмотрим оставшиеся поля типа SIG.

Метаданные. Считается, что параметры передачи (СКК, количество пространственных потоков и др.) одинаковы для всех сегментов прерываемого кадра. Параметры механизма вытеснения могут быть согласованы заранее, например, на этапе ассоциации устройства. Поэтому поля SIG также могут быть исключены из повторной преамбулы без потери функциональности.

Итак, анализ показывает, что для повторной преамбулы критически необходимо реализовать лишь две функции: оценка канала и точная компенсация CFO. Остальные оценки, выполненные по основной преамбуле, остаются корректными и после интервала вытеснения. Следовательно, поля STF и SIG могут быть исключены из повторной преамбулы. Поля Legacy также могут быть опущены, так как станции старших поколений должны воспринимать канал как занятый на протяжении всей передачи прерываемого кадра. Дополнительно защитить

Таблица 1. Параметры экспериментов

| Параметр | Значение |
|------------------------------------|---------------------|
| Размер кадра | 4096 Б |
| СКК | MCS8 (256-QAM, 3/4) |
| Вид кода | Сверточный |
| Ширина канала | 20 МГц |
| Центральная частота | 5,5 ГГц |
| Форматы повторных преамбул | Полная, Сокращенная |
| Количество интервалов вытеснения | 0, 1 |
| Длительность интервалов вытеснения | 16 мкс |
| Длительность измерения | 30 с |

кадр от интерференции со стороны таких устройств можно с помощью механизма RTS/CTS (англ.: Request To Send, Clear To Send).

На основе этого вывода предложим новую конструкцию, названную *Сокращенной* повторной преамбулой. Она состоит исключительно из полей UHR-LTF. Это решение экономит как минимум 40 мкс, сокращая длительность преамбулы с 56 до 16 мкс (для случая одного 4-мкс символа UHR-SIG). Таким образом, накладные расходы уменьшаются на 20% при интервалах вытеснения 0,2 мс, что позволяет достичь целевой задержки менее 1 мс для приложений реального времени.

Важно, что количество полей LTF должно совпадать во всех сегментах кадра. Оно должно быть не меньше числа пространственных потоков и может быть увеличено для повышения точности оценки канала и CFO. В данной работе рассматриваются сценарии с одним пространственным потоком, поэтому в дальнейшем будем рассматривать Сокращенную преамбулу, содержащую одно поле LTF.

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки влияния форматов повторных преамбул на надежность приема разработан прототип устройства Wi-Fi с поддержкой механизма вытеснения. Прототип создан на базе программно-определяемого радио USRP-2944R [29] и основан на ПО National Instruments 802.11 Application Framework из LabVIEW Communications Suite [31]. В данной работе в ПО добавлена поддержка механизма вытеснения с форматами *Полной* и *Сокращенной* повторной преамбулы.

Отметим следующие технические особенности реализации механизма вытеснения.

- В Полной повторной преамбуле поле L-SIG содержит длительность оставшихся сегментов кадра. Это обеспечивает совместимость с потенциальными устройствами предыдущих поколений, которые могут начать прием прерываемого кадра в середине передачи.
- Для восстановления синхронизации после интервала вытеснения приемник обрабатывает все поля STF и LTF аналогично основной преамбуле, выполняя все стандартные оценки.
- Метаданные из полей SIG в повторных преамбулах игнорируются, так как не требуются для продолжения приема.

В экспериментах не генерируются сигналы запроса на прерывание и кадры с низкой задержкой, поскольку целью экспериментов является анализ повторных преамбул. На практике при реальном прерывании передача возобновляется с нового кадра. Таким образом, повторные преамбулы используются только для синхронизации после пустого интервала вытеснения.

Эксперименты проводятся в стационарном сценарии с прямой видимостью: устройства расположены друг напротив друга на расстоянии 1 м, любые перемещения отсутствуют. Отдель-

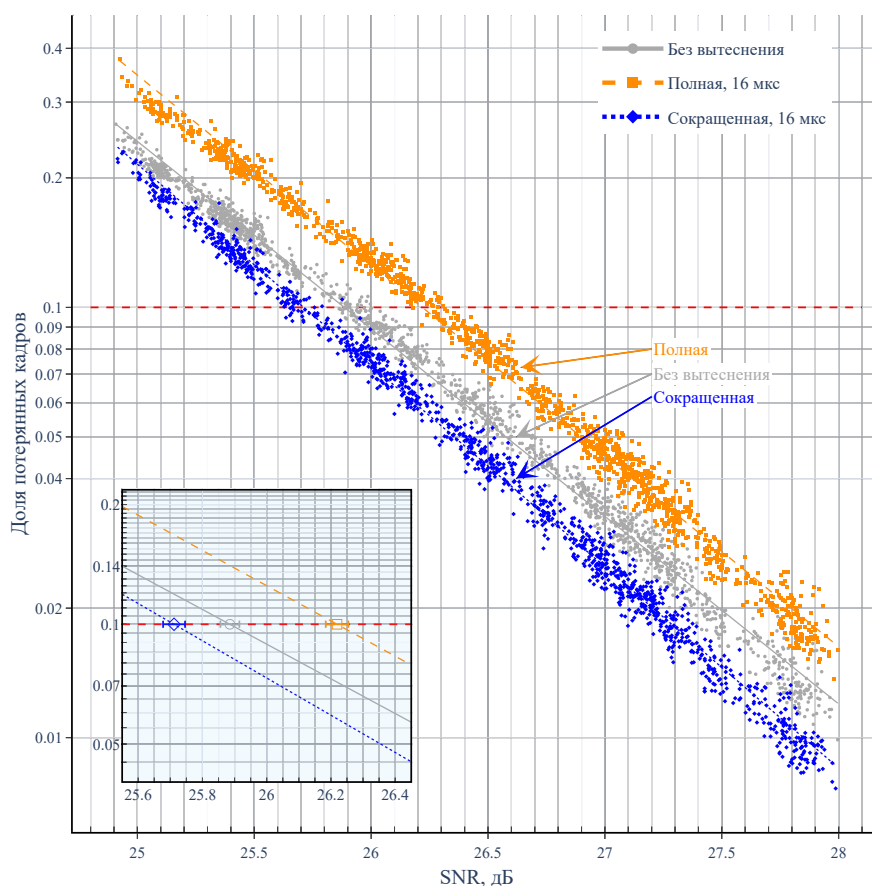


Рис. 3. Зависимость PER от SNR для различных форматов повторной преамбулы и длительностей интервалов вытеснения.

ное устройство Wi-Fi осуществляет мониторинг канала, чтобы убедиться в отсутствии сторонних передач. Наивысшей СКК, обеспечивающей стабильный прием в данных условиях, является MCS8.

Сравнивается надежность приема кадров без поддержки механизма вытеснения и прерываемых кадров с двумя форматами повторных преамбул: Сокращенная и Полная. В прерываемых кадрах содержится один интервал вытеснения, расположенный в середине поля DATA. Его длительность составляет 16 мкс, является минимальной из рассматриваемых TGbn для данного механизма и равна короткому межкадровому интервалу (англ.: Short Interframe Space, SIFS).

В качестве показателя надежности используется зависимость доли потерянных пакетов (англ.: Packet Error Ratio, PER) от соотношения сигнал-шум (англ. Signal-to-Noise Ratio, SNR). Значения SNR выбираются таким образом, чтобы PER находилась в рабочем диапазоне (примерно до 10%), при котором устройства еще не переключаются на более низкую СКК. Для регулировки SNR изменяется мощность передачи. Уровень шума на приемнике в полосе 20 МГц составляет -96 дБм. Параметры экспериментов приведены в Таблице 1.

На рис. 3 представлена зависимость PER от SNR. Каждая точка на графике соответствует 30-секундному измерению, в течение которого передается около 60000 кадров. Мощность приема фиксируется каждые 100 мс, а значение SNR для точки вычисляется как среднее по 300 измерениям. Из-за флуктуаций мощности точки образуют облака вокруг целевых значений SNR. Зависимость $\log(\text{PER})$ от $\log(\text{SNR})$ аппроксимируется линейной функцией с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Сравнение проводится по полученным аппроксимиру-

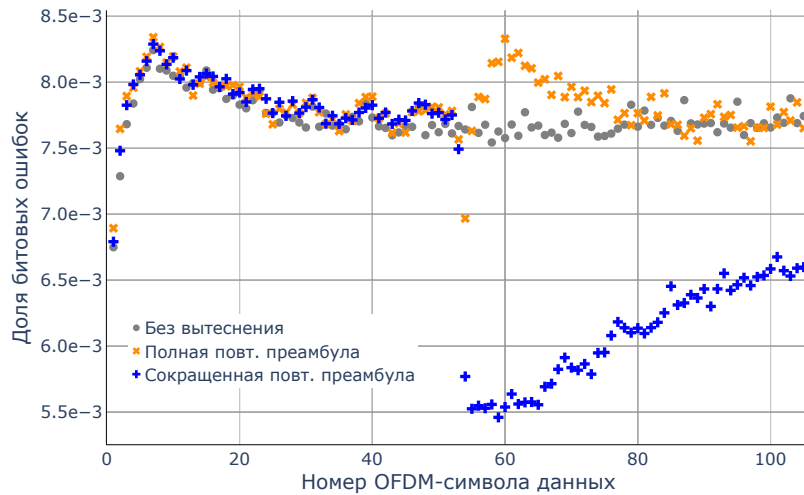


Рис. 4. Доля битовых ошибок, LOS, MCS8, 4096 В

ющим прямым. Результаты показывают, что для достижения одинакового уровня PER прерываемые кадры с Полной повторной преамбулой требуют SNR на 0,3 дБ выше, чем обычные кадры без вытеснения. В то же время, кадры с Сокращенной повторной преамбулой достигают того же PER при SNR на 0,2 дБ ниже.

Причина этого эффекта заключается в методе точной оценки остаточного CFO. После грубой оценки CFO по полям L-STF в основной или Полной повторной преамбуле, остаточное смещение несущей вызывает линейный набег фазы между последовательными OFDM-символами. Это набег отслеживается по пилотным поднесущим, которые присутствуют во всех OFDM-символах, кроме полей STF и LTF. Предварительные испытания подтвердили, что остаточный CFO остается постоянным в течение кадра, а значит, фазовый сдвиг накапливается линейно.

Разработанный прототип использует МНК для оценки данного фазового смещения $\hat{\phi}_n$ в символе под номером n по формуле

$$\hat{\phi}_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \phi_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^{n-1} k_i^2} \cdot k_n,$$

где i итерируется по всем OFDM-символам с пилотными поднесущими после последнего принятого L-STF, ϕ_i — измеренный фазовый сдвиг в символе i , а k_i — это позиция символа i относительно последнего принятого LTF.

Детальнее изучим этот эффект по зависимости доли битовых ошибок (англ.: Bit Error Ratio, BER) в данных до декодирования от номера OFDM-символа. Полученный график для обычных и прерываемых кадров с двумя форматами повторных преамбул представлен на рис. 4. Для сравнения, на рис. 5 показана аналитически рассчитанная средняя абсолютная ошибка оценки фазового сдвига в зависимости от номера символа. При расчете предполагалось, что измеренные значения фазы зависят от номера символа линейно и искажены шумом с нормальным распределением и постоянной дисперсией.

В начале кадра ошибка оценки фазы растет вместе с накапливающимся сдвигом, достигает пика, а затем уменьшается по мере роста числа измерений, используемых для оценки. Для прерываемого кадра с Полной повторной преамбулой это поведение повторяется после интервала вытеснения, поскольку приемник выполняет новую грубую оценку CFO по STF и сбрасывает все данные, накопленные в первой части кадра.

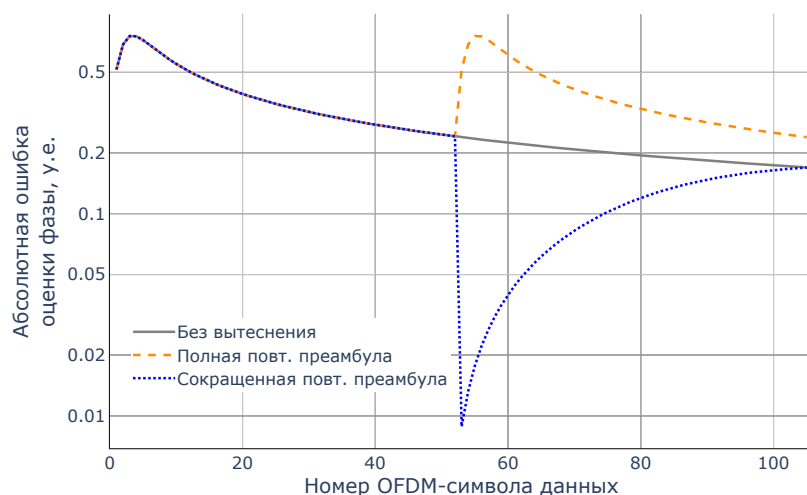


Рис. 5. Абсолютная ошибка оценки фазы

В случае Сокращенной повторной преамбулы накопленные данные об остаточном CFO остаются актуальными и позволяют лучше оценить ошибку. Следовательно, снижение BER во втором сегменте кадра способствует общему снижению PER. Графики на рис. 4–5 демонстрируют сходство основных тенденций, подтверждая предложенную гипотезу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривается механизм вытеснения для стандарта Wi-Fi 8, призванный обеспечить гарантированно низкую задержку. Для этого механизма разработан формат Сокращенной повторной преамбулы для прерываемых кадров, состоящей только из одного OFDM-символа LTF для одного пространственного потока. Она многократно сокращает длительность преамбулы и экономит как минимум 40 мкс при каждом интервале прерывания. Такая экономия составляет 20% от длительности кадра при размещении интервалов прерывания связи каждые 0,2 мс, что позволяет достичь целевой задержки менее 1 мс для наиболее требовательных приложений.

Для сравнения надежности приема кадров проведен эксперимент с использованием разработанного прототипа устройства Wi-Fi с поддержкой механизма вытеснения. Показано, что Сокращенная повторная преамбула не снижает вероятность успешной передачи кадра. Более того, прерываемый кадр с такой преамбулой демонстрирует более высокую помехоустойчивость: для достижения PER 10% ему требуется значение SNR на 0,2 дБ ниже, чем обычному кадру без прерываний. Это улучшение объясняется эффективным повторным использованием накопленных данных для точной оценки остаточного смещения несущей частоты (CFO) после интервала вытеснения. Открытыми вопросами остаются влияние длительности, количества и положения интервалов вытеснения в пределах одного кадра, что будет рассмотрено в будущих исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability / Karamyshev A., Levitsky I., Bankov D., and Khorov E. // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 2. — P. 164–21.
2. Reshef Ehud, Cordeiro Carlos. Future directions for Wi-Fi 8 and beyond // IEEE Communications Magazine. — 2022. — Vol. 60, no. 10. — P. 50–55.

3. Performance Evaluation of Wi-Fi 7 Networks with Restricted Target Wake Time / Bankov DV, Lyakhov AI, Stepanova EA, and Khorov EM // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 233–254.
4. Shlapak MV, Stepanova EA, Khorov EM. Efficiency Analysis of TWT and R-TWT Mechanisms while Serving Delay-Sensitive Traffic // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 3.
5. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability / Galati-Giordano Lorenzo, Geraci Giovanni, Carrascosa Marc, and Bellalta Boris // IEEE Communications Magazine. — 2024. — Vol. 62, no. 8. — P. 126–132.
6. Naik Gaurang, Ogbе Dennis, Park Jung-Min Jerry. Can Wi-Fi 7 support real-time applications? On the impact of multi link aggregation on latency // ICC 2021-IEEE International Conference on Communications / IEEE. — 2021. — P. 1–6.
7. Finn Norman. Introduction to time-sensitive networking // IEEE Communications Standards Magazine. — 2018. — Vol. 2, no. 2. — P. 22–28.
8. Messenger John L. Time-sensitive networking: An introduction // IEEE Communications Standards Magazine. — 2018. — Vol. 2, no. 2. — P. 29–33.
9. Takeda Kazuki et al. Understanding the heart of the 5G air interface: An overview of physical downlink control channel for 5G new radio // IEEE Communications Standards Magazine. — 2020. — Vol. 4, no. 3. — P. 22–29.
10. Shafi Mansoor et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // IEEE journal on selected areas in communications. — 2017. — Vol. 35, no. 6. — P. 1201–1221.
11. Adou Yves, Markova Ekaterina, Gaidamaka Yuliya. Modeling and Analyzing Preemption-Based Service Prioritization in 5G Networks Slicing Framework // Future Internet. — 2022. — Vol. 14, no. 10. — P. 299.
12. Esswie Ali A, Pedersen Klaus I, Mogensen Preben E. Preemption-aware rank offloading scheduling for latency critical communications in 5G networks // 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring) / IEEE. — 2019. — P. 1–6.
13. Efficient multiplexing of downlink eMBB and URLLC traffic with massive MU-MIMO / Krasilov Artem, Lebedeva Irina, Yusupov Ruslan, and Khorov Evgeny // 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2022. — P. 185–190.
14. Val Inaki et al. TSN and Time Sensitive Wireless // Doc: IEEE 802.11-23/1173r1. — 2023. — July.
15. Yang Boyce Bo et al. Further Improve Latency Performance in 11be // Doc: IEEE 802.11-21/670r0. — 2021. — April.
16. Lee Wook Bong et al. Latency Reduction Scheme for UHR // Doc: IEEE 802.11-22/1393r0. — 2022. — September.
17. Ryu Kiseon et al. TXOP Preemption Follow Up // Doc: IEEE 802.11-23/1174r0. — 2023. — July.
18. Handte Thomas et al. Latency and Reliability enhancements for UHR // Doc: IEEE 802.11-22/1880r1. — 2022. — November.
19. Fang Juan et al. Preemption for Low Latency Application // Doc: IEEE 802.11-23/92r0. — 2023. — January.
20. Schelstraete Sigurd et al. UHR preamble design follow-up // Doc: IEEE 802.11-24/774r1. — 2024. — May.
21. Schelstraete Sigurd et al. Further Considerations for UHR preamble // Doc: IEEE 802.11-24/1267r0. — 2024. — July.
22. Modeling of Preemptive Channel Access in Wi-Fi Networks / Riterman A., Bankov D., Lyakhov A., and Khorov E. // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 4. — P. 327–334.
23. Recovering CSI and Data in Dense Network Environments using IEEE 802.11ax Midamble / Lee Kanghyun, Shin Juhun, Park Jongyeon, Son Youngwook, and Bahk Saewoong // IEEE Access. — 2023.

24. Rahbari Hanif, Krunz Marwan. Exploiting frame preamble waveforms to support new physical-layer functions in OFDM-based 802.11 systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2017. — Vol. 16, no. 6. — P. 3775–3786.
25. Gast Matthew. 802.11 Wireless Networks: the Definitive Guide. — ” O’Reilly Media, Inc.”, 2005.
26. Design and implementation of synchronization and AGC for OFDM-based WLAN receivers / Jimenez Victor P Gil, Garcia MJF-G, Serrano FJ González, and Armada Ana Garcia // IEEE Transactions on Consumer Electronics. — 2004. — Vol. 50, no. 4. — P. 1016–1025.
27. Lee Il-Gu. Digital pre-distortion of carrier frequency offset for reliable Wi-Fi enabled IoTs // Future Internet. — 2017. — Vol. 9, no. 3. — P. 46.
28. Sourour Essam, El-Ghoroury Hussein, McNeill Dale. Frequency offset estimation and correction in the IEEE 802.11 a WLAN // IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 / IEEE. — 2004. — Vol. 7. — P. 4923–4927.
29. USRP-2944 Specifications. — <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2944-specs/page/specs.html>. — (Accessed on 28/03/2025).
30. Primer Wi-Fi. Overview of the 802.11 physical layer and transmitter measurements // Beaverton: Tektronix Inc. — 2013. — P. 4–7.
31. LabVIEW Communications 802.11 Application Framework 2.5 Manual - National Instruments. — https://download.ni.com/evaluation/labview/appframework/802.11AFW_Manual_ver_2.5.pdf. — (Accessed on 17/12/2024).

Short Secondary Preamble for the Preemption Mechanism in Wi-Fi 8

A. A. Tretiakov, I. A. Levitsky, E. M. Khorov

Applications such as industrial automation and augmented reality require low latency when serving traffic in wireless networks. Preemption is a potential technical solution for this purpose in the upcoming Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) standard. Preemption allows long frames to be interrupted to transmit urgent data in the freed-up time slots. This paper develops a preamble format for preemptive frames that minimizes overhead without reducing the probability of successful delivery. We build a prototype Wi-Fi device supporting preemption using software-defined radio. Experiments show that the proposed Short Preamble reduces not only overhead but also bit error rate compared to alternatives.

KEYWORDS: IEEE 802.11bn, Wi-Fi 8, preemption mechanism, preamble, guaranteed low latency, URLLC