

Анализ технологии МАРС в стандарте IEEE 802.11bn

И. С. Тараторин

Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

taratorin.ilya@mail.ru

А. С. Викулов

Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

vikulov.as@sut.ru

Аннотация. В условиях роста потребности в сверхвысоконадёжных сетях с ультрамалыми задержками особую актуальность приобретает стандарт IEEE 802.11bn, призванный увеличить надёжность и снизить задержки в БЛВС. Цель работы – проанализировать технологию МАРС, предполагающуюся в IEEE 802.11bn. Был использован метод сравнения технологий стандарта IEEE 802.11bn с технологиями предыдущих поколений стандарта. Установлены различия между технологиями разных поколений и выявлены преимущества использования технологии МАРС. Сделаны выводы о преимуществе использования технологий МАРС для сверхвысоконадёжных сетей с ультрамалыми задержками на основе стандарта IEEE 802.11bn по сравнению с предыдущими поколениями.

Ключевые слова: беспроводные сети; IEEE 802.11bn; Multi Access Point Coordination

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий к 2030 году и формирование концепции сетей шестого поколения ставит задачи, выходящие за рамки увеличения пропускной способности. Ожидается, что сети связи следующего поколения будут приспособлены к голографическому вещанию, интерактивному телеприсутствию и тактильному интернету. Перечисленные сервисы обладают высокими требованиями не только к скорости передачи данных, но и к низким и предсказуемым задержкам и к сверхвысокой надёжности сети.

IEEE 802.11 является распространённой технологией связи в беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС). Дополнение IEEE 802.11bn ожидается к 2028 г., от дополнения ожидаются существенные изменения в надёжности сети, в отличие от предыдущих поколений, в которых одним из важнейших факторов была пропускная способность.

В основе сверхвысокой надёжности ожидаются технологии совместной работы нескольких точек доступа (ТД) и переработка механизмов координирования [1]. К механизмам координирования относится технология Multi Access Point Coordination (МАРС), принципы работы которой будут рассматриваться и сравниваться с предшествующими технологиями в рамках данной статьи.

II. ТЕХНОЛОГИЯ МАРС

Ожидание отрасли БЛВС от МАРС представляет собой смену парадигмы в сетях IEEE 802.11: переход от

традиционной модели, в которой Basic Service Set (BSS) конкурируют за беспроводные ресурсы нелицензируемых диапазонов частот, к модели, в которой BSS взаимодействуют для оптимизации производительности. МАРС должно позволить точкам доступа координировать свои передачи, что делает возможным принятие решений на уровне всей сети, которые потенциально гарантируют более высокую эффективность [2]. Однако это имеет свою цену: накладные расходы, необходимые для координации, и усложнение работы самих точек доступа. Тем не менее, достижения в области аппаратного и программного обеспечения ТД позволяют справляться с этой вычислительной нагрузкой.

Если в предыдущих поколениях взаимодействие между соседними сетями Overlapping BSS (OBSS) ограничивалось лишь пассивным избеганием коллизий, то МАРС внедрит механизмы явного обмена информацией и совместного принятия решений для оптимизации сетевых ресурсов. Эта концепция реализуется через набор специализированных схем, каждая из которых направлена на устранение помехи и повышение эффективности в различных доменах: пространственном, временном и частотном [2].

В основе технологического стека МАРС ожидаются следующие ключевые решения:

- Coordinated Spatial Reuse (Co-SR) – координированное пространственное повторное использование
- Coordinated Beamforming (Co-BF) – координированное формирование луча
- Coordinated Orthogonal frequency-division multiple access (Co-OFDMA) – координированный множественный доступ с ортогональным частотным разделением
- Coordinated Time Division Multiple Access (Co-TDMA) – координированный множественный доступ с разделением по времени

Интеграция вышеперечисленных технологий в единый стек МАРС позволяет достичь существенного снижения задержек и увеличения стабильности работы сети.

A. Coordinated Spatial Reuse

Координированное пространственное повторное использование – технология, позволяющая нескольким AP одновременно передавать данные на одних и тех же

частотных ресурсах за счет точного управления мощностью передачи и минимизации взаимных помех. Технология направлена на повышение спектральной эффективности в сверхплотных сетях [3] с большим количеством ассоциированных КУ на ТД, например, в концертных залах и на спортивных стадионах.

Технология Co-SR является качественным развитием механизмов пространственного использования, заложенных в IEEE 802.11ax. BSS Color – числовой идентификатор (цвет), введенный в стандарте 802.11ax, который позволяет устройству отличать кадр собственной сети от кадра сторонней OBSS. Если устройство приняло сигнал чужой сети с уровнем ниже определённого порога, оно может одновременно начать передачу, но обязано снизить уровень мощности, не зная, как влияет её уровень на чужую сеть.

Co-SR позволяет нескольким ТД разных BSS одновременно передавать данные на одних частотных и временных ресурсах за счёт совместного управления мощностью передачи. Взаимодействие в рамках данной технологии строится на 2 ролях: Sharing AP (Разделяющая ТД) и Shared AP (Разделяемая ТД). Sharing AP – точка доступа, которая получает Transmission Opportunity (TXOP) и позволяет другим ТД передавать данные в это же время. Shared AP – ТД, которая получает право передачи от Sharing AP. Процедура работы Co-SR включает следующие этапы:

1. Сбор информации: Sharing AP собирает данные о состоянии буферов и уровне принимаемого сигнала (RSSI/CSI) от соседних ТД и их клиентов.
2. Вычисление необходимой мощности: на основе полученных данных Sharing AP вычисляет оптимальные уровни мощности для всех участников. Цель – гарантировать, что суммарные помехи не снизят отношение сигнала к помехе и шуму (SINR) у приемников ниже критического порога.
3. Координационный триггер: Sharing AP отправляет специальный триггерный фрейм, который содержит правила передачи и ограничения по мощности для Shared AP.
4. Передача: все назначенные ТД могут начать передачу данных одновременно, строго соблюдая лимиты мощности.

Внедрение технологии Co-SR способно обеспечить значительное преимущество в сетях 802.11:

- Повышение эффективности использования спектральных ресурсов за счёт передачи данных разных BSS в одной полосе частот.
- Снижение задержек благодаря возможности одновременной передачи несколькими BSS.
- Повышение надёжности соединения относительно стандарта 802.11ax за счёт минимизации рисков из-за точного расчёта SINR.

Ожидается, что Co-SR покажет себя наиболее эффективна в сценариях, где точки доступа расположены на достаточном расстоянии друг от друга, что позволяет находить больше возможностей для качественной параллельной работы.

B. Coordinated Beamforming

Координированное формирование луча – механизм, использующий антенные решетки для фокусировки сигнала на своих клиентах и одновременного создания «нулей» излучения (radiation nulls) в направлении устройств соседних сетей, что исключает их взаимное влияние [4].

Технология Co-BF является архитектурным развитием Multi-User Multiple-Input and Multiple-Output (MU-MIMO), представляющим собой переход от управления пространственными ресурсами внутри одной BSS к координации в рамках всего домена. MU-MIMO точка доступа использует антенную решетку для формирования лучей в сторону целевых станций и создания зон «нулевого» сигнала (nulls) в направлении других станций своей собственной BSS, чтобы минимизировать мешающее воздействие, в то время как сигналы от соседних BSS воспринимались как помехи. Технология Co-BF использует свои пространственные степени свободы чтобы сформировать нули в направлении соседних BSS, что превращает помеху в отсутствие сигнала в точке приёма.

Co-BF использует пространственные степени свободы многоантенных ТД для одновременного обслуживания своих клиентов и подавления помех в сторону соседних сетей. Этапы работы технологии:

1. Процедура зондирования – ТД необходимо знать характеристики не только своих каналов, но и устройств соседних BSS. Совместное зондирование – процесс, при котором ТД инициирует отправку процесс отправки измерительных фреймов (NDP), клиентские устройства (КУ) сетей передают обратную связь.
2. Математическая обработка сигнала – на основе информации о состоянии канала (CSI) ТД модифицирует стандартный фильтр пространственного мультиплексирования. Для этого используются алгоритмы цифрового прекодирования, такие как Zero Forcing (ZF) или Minimum Mean Square Error (MMSE).
3. Режим работы – технология может работать в режиме полного зануления (full nulling), устраняя все помехи OBSS, или частичного зануления (partial null), фокусируясь на наиболее сильных источниках.
4. Использование нулей излучения (radiation nulls) – ТД формирует направленный луч для передачи данных своим станциям (STA) и одновременно создает зоны нулевого сигнала в направлении устройств соседнего OBSS.

Применение технологии координированного формирования луча отличии от Co-SR, принесёт преимущество в использовании полной мощности передатчика, поскольку помеха устраняется пространственно. При этом Co-BF позволит станциям соседних BSS передавать данные одновременно без ожидания освобождения канала, что уменьшит и сделает более предсказуемыми задержки.

C. Coordinated OFDMA

Координированный множественный доступ с ортогональным частотным разделением является важным компонентом стека координации нескольких точек доступа в разрабатываемом стандарте 802.11bn. Он переносит принципы частотного разделения ресурсов с уровня одного устройства на уровень взаимодействия всей сети [5].

Технология Co-OFDMA является развитием технологии OFDMA, внедрённой в стандарт 802.11ax. OFDMA работает внутри одной BSS. ТД разделяет канал на Resource Unit (RU) и распределяет между КУ, что позволяет обслуживать несколько пользователей от одной точки доступа в один период времени. Технология Co-OFDMA распространяет этот принцип на межаппаратный уровень. При использовании технологии RU могут делиться между несколькими ТД, что позволяет снизить конкуренцию за занятие канала и увеличить эффективность частотного спектра.

С технической стороны Co-OFDMA представляет собой механизм распределения частотного спектра между соседними ТД, принадлежащими разным BSS, для их одновременной работы. Основные аспекты реализации технологии:

- Роли: Sharing AP, получившая TXOP и Shared AP, получившая возможность использования выделенных RU.
- Управление: для эффективного планирования Sharing AP должна предварительно запросить у соседних ТД информацию об их состоянии каналов и статусе буферов. На основе этих данных принимается решение о том, какую часть спектра выделить каждой ТД.

Ожидается, что внедрение координированного OFDMA способно принести сети IEEE 802.11 значительные преимущества, к которым относятся снижение задержки ввиду увеличения эффективности использования спектра.

D. Coordinated Time Division Multiple Access

Co-TDMA – это схема координации нескольких точек доступа в стандарте 802.11bn, которая позволяет соседним ТД совместно использовать временные ресурсы среды.

Развитие Co-TDMA является логическим расширением механизмов планирования, которые ранее ограничивались рамками одной BSS. Технология Target Wake Time (TWT) позволяла ТД и КУ договариваться о графике пробуждения с целью экономии электроэнергии и снижения конкуренции внутри BSS. Технология Restricted TWT ввела зарезервированные периоды обслуживания для трафика, чувствительного к задержкам, и гарантирующая ему приоритетный доступ в рамках одного BSS. Технологии Co-TDMA / Co-RTWT выводит концепцию TWT на межаппаратный уровень [6]. Точки доступа координируют графики, что приводит от пассивного избегания коллизии к активному временному мультиплексированию между BSS.

С технической стороны Co-TDMA представляет собой механизм разделения TXOP между несколькими AP во временной области. Основные этапы работы:

- Ролевая модель: Взаимодействие происходит между Sharing AP (владельцем TXOP, выигравшим состязание за канал) и Shared AP, получающими часть этого времени.
- Процесс координации: Sharing AP собирает информацию о требованиях к трафику и состоянии буферов соседних ТД. На основе этой информации она динамически выделяет временные слоты для Shared AP.
- Обмен кадрами: Sharing AP отправляет кадр объявления расписания (schedule announcement), указывая примерное время начала и длительность выделенного слота. Shared AP подтверждает получение кадром CTS, после чего Sharing AP передает управление каналом специальным кадром распределения TXOP.
- Возврат ресурсов: Shared AP используют выделенное время для связи со своими клиентами и могут возвращать неиспользованные остатки временного слота Sharing AP, чтобы избежать простоев.

Технология Co-TDMA должна будет обеспечивать снижение задержки за счёт исключения ожидания освобождения канала, прирост пропускной способности и увеличение эффективности работы сетей при сбалансированных нагрузках. Однако успешное развёртывание Co-TDMA требует сложной синхронизации и накладных расходов на координацию.

III. ОСОБЕННОСТИ MAPC

MAPC будет являться кардинально новым подходом к организации БЛВС на основе IEEE 802.11. Технология позволяет свести к минимуму негативное влияние соседних ТД друг на друга, однако следует помнить о различных особенностях, которые усложняют работу сети и удорожают сетевое оборудование.

К особенностям, усложняющим работу, относится необходимость тактовой синхронизации между всеми точками доступа [7], необходимая для работы технологий MAPC. Увеличение накладных расходов на опрос сети и сигнализацию, которое необходимо учитывать на этапе планирования сети.

К удорожанию сетевого оборудования относятся ТД с большим количеством антенн. Для работы Co-BF лучше использовать ТД с конфигурацией антенн 8x8 или 16x16. Также работа MAPC может быть тесно связана с AI/ML, что позволяет ТД или контроллеру с большей точностью анализировать сеть, но приводит к удорожанию оборудования.

IV. ВЫВОДЫ

Проведённый анализ технологии MAPC в рамках перспективного стандарта IEEE 802.11bn позволяет сделать выводы о сдвиге в парадигме построения БЛВС. Переход к модели активного взаимодействия между BSS открывает принципиально новые возможности создания UHR сетей.

Ключевой эффект от интеграции технологического стека MAPC, включающего координацию в пространственном, временном и частотном доменах, заключается в достижении ультрамалых и предсказуемых задержек. Технологии Co-SR и Co-BF позволят минимизировать взаимные помехи и эффективно использовать спектр за счет точного управления мощностью и формирования «нулей» излучения. В свою очередь, механизмы Co-OFDMA и Co-TDMA обеспечат гибкое распределение частотных ресурсов и временных слотов на межаппаратном уровне, что исключает длительное ожидание освобождения канала и повышает общую стабильность соединений в условиях высокой плотности устройств.

Стандарт IEEE 802.11bn с технологией MAPC представляет собой качественную эволюцию беспроводной связи. Совокупный эффект от использования предложенных методов координации позволяет преодолеть ограничения предыдущих поколений стандартов, ориентированных преимущественно на рост пропускной способности, и обеспечить требуемый уровень качества обслуживания в самых сложных сценариях развертывания для приложений и инфраструктуры, нуждающихся в

сверхвысоконадежных сетях с ультрамалыми задержками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Скоробогатова С.А., Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ эволюционного развития сетей Wi-Fi за первую четверть 21 века. // Труды учебных заведений связи. 2025. №6.
- [2] Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, Marc Carrascosa, Boris Bellalta What Will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability. // IEEE Communications Magazine (Volume: 62, Issue: 8, August 2024) p. 126–132.
- [3] David D. Coleman, David A. Westcott. Certified Wireless Network Administrator Study Guide Exam CWNA-107 Fifth Edition. С 505–506.
- [4] Serhat Erkucuk Senior Technical Staff Coordination of Multiple Access Points in Wi-Fi 8. // 2023 21st Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet) p. 4–6.
- [5] Francesc Wilhelmi, Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, Boris Bellalta, Gianluca Fontanesi, and David Nuñez Throughput Analysis of IEEE 802.11bn Coordinated Spatial Reuse.
- [6] Iñaki Val, David López-Pérez, Aleksandra Kijanka, Sigurd Schelstraete Luis Muñoz, Diego Arlandis, Marcos Martínez. Wi-Fi 8 Unveiled: Key Features, Multi-AP Coordination, and the Role of C-TDMA.
- [7] Викулов А.С., Скоробогатова С.А. Обзор механизмов тактовой синхронизации в сетях IEEE 802.11. // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): Сб. науч. статей. В 3 т. Санкт-Петербург, 2025. С 3–4.