

Планирование канальных ресурсов для минимизации задержки при передаче данных в сетях IEEE 802.11ax*

А.А. Диденко, Д.В. Банков, Е.М. Хоров

{dida, bankov, khorov}@iitp.ru

ИППИ РАН

Аннотация В новом дополнении к стандарту беспроводных сетей Wi-Fi, IEEE 802.11ax, вводится ряд нововведений, позволяющих повысить эффективность процесса передачи данных в плотных сетях. Одним из наиболее важных нововведений является использование технологии OFDMA, позволяющей повысить суммарную скорость передачи данных в случае передачи несколькими устройствами в восходящем потоке. В данной работе описаны особенности использования технологии OFDMA для передачи восходящих потоков данных в сетях Wi-Fi и предлагается новый планировщик ресурсов MUTAX, который позволяет уменьшить задержку при передаче данных. Приведено сравнение его эффективности с известными планировщиками, адаптированными к сетям 11ax.

Введение

В настоящее время технология Wi-Fi стала основной технологией для беспроводных локальных сетей. Чтобы удовлетворить высокие и постоянно растущие требования к пропускной способности в беспроводных сетях Wi-Fi, комитет IEEE 802 разрабатывает IEEE 802.11ax: новое дополнение к стандарту IEEE 802.11. Оно включает в себя различные способы повышения эффективности Wi-Fi в известных сценариях.

Большое количество устройств Wi-Fi, а также огромное количество развёрнутых плотных сетей приводят к помехам, связанным с интерференцией. Стандарт рассматривает такие сценарии, где много сетей находятся рядом друг с другом и требуется снизить их влияние друг на друга. Другая часть решений направлена на улучшение процесса передачи в случае одиночной точки доступа.

Главной особенностью стандарта 11ax и одним из способов улучшить эффективность сетей Wi-Fi является применение технологии OFDMA, которая расширяет стандартный CSMA/CA путём введения возможности разделения ресурсов канала в частотной области. Начиная со стандарта IEEE

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счёт гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10687)

802.11a, устройства Wi-Fi используют технологию OFDM. Однако с OFDM все поднесущие используются для передачи данных для всего лишь одного пользователя в один момент времени, тогда как OFDMA позволяет назначать различные тоны для использования различными пользователями в один и тот же момент времени. С другой стороны, эффективность применения OFDMA значительно зависит от того, как тоны распределяются между пользователями. При этом стандарт 11ах предоставляет всего лишь гибкий набор инструментов для распределения ресурсов без каких-либо предопределённых алгоритмов планирования.

Стоит отметить, что технология OFDMA существовала и ранее: она используется в сотовых сетях, которые работают в лицензированном спектре, в частности — в сетях LTE. Для технологии Wi-Fi OFDMA является совершенно новым механизмом.

Упомянутая проблема планирования ресурсов между пользователями была тщательно исследована в сотовых сетях LTE. Таким образом, на первый взгляд, стоит использовать один из существующих для сетей LTE планировщиков и адаптировать его к особенностям применения OFDMA в Wi-Fi. Поскольку фундаментальные принципы работы OFDMA в Wi-Fi отличаются от принципов ее работы в сетях LTE, очевидно, что этот процесс адаптации сам по себе непрост. Более того, предположения, используемые при разработке планировщиков ресурсов в LTE, и вовсе становятся неверными относительно сетей 11ах. Как следствие, никто не может гарантировать, что лучший планировщик LTE останется таким же хорошим после его адаптации к сетям 11ах.

В данной работе рассматривается проблема планирования ресурсов в сетях IEEE 802.11ах с использованием OFDMA. Также ставится цель уменьшить среднее время передачи данных, для достижения которой разрабатывается новый планировщик ресурсов. Показывается, что этот планировщик работает лучше известных аналогов для сетей 11ах.

Дальнейшее изложение устроено следующим образом. В разделе 1 дано подробное описание объекта исследования и постановка задачи. В разделе 2 приведён обзор литературы. Раздел 3 описывает планировщик, разработанный для уменьшения времени доставки в сетях 11ах. В конце главы даны численные результаты. В заключении приведены основные выводы, которые можно сделать в результате исследования гибридного доступа при передаче данных в сетях IEEE 802.11ах.

1 Сценарий и постановка задачи

1.1 Особенности применения технологии OFDMA в Wi-Fi

У технологии OFDMA есть ряд принципиальных особенностей, которые ограничивают возможности планировщика ресурсов в Wi-Fi.

Кадры OFDMA начинаются с общей преамбулы, которую можно декодировать устройствами даже предыдущих поколений. Получив преамбулу,

Канал может быть разбит в наборы OFDMA-поднесущих (тонов). В сетях 11ах группа тонов, отведённых одной станции, называется ресурсным блоком (РБ). Стандарт IEEE 802.11ах определяет ресурсные блоки размером в 26, 52, 106, 242, 484, 996 и 2×996 OFDM тонов. Набор доступных РБ зависит от ширины канала: так, например, в канале 40 МГц, станция может использовать РБ размером до 484 тонов.

26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
52	52	26	52	52	52	52	52	26	52	52						
106	26	106				106	26	106								
242								242								
484 ТОНОВ																

В сетях LTE планировщик может выделять произвольное подмножество РБ, предназначенных для нисходящих потоков данных, на пользователя или произвольный интервал РБ в восходящих потоках на пользователя. 11ax накладывает гораздо более строгие ограничения на распределение РБ,

поскольку как в нисходящих потоках, так и в восходящих, одной станции не может быть назначено более одного ресурсного блока. При этом размер этого ресурсного блока может варьироваться указанным выше способом. Другими словами, например, для полосы в 40 МГц (здесь всей полосе соответствуют 484 тона) имеется всего 18 26-тоновых ресурсных блоков. В дальнейшем размер ресурсного блока измеряется в размерах самого маленького ресурсного блока (26 тонового). Иначе говоря, в случае канала в 40 МГц планировщик может разделять ресурсы канала в группы размера 1, 2, 4, 9, 18 таким образом, чтобы суммарный размер остался меньше или равен 18. Согласно стандарту, данное ограничение о специфичном разбиении на ресурсные блоки появляется из-за надобности в служебных тонах для передачи в нелицензированном спектре, которые должны располагаться в непосредственной близости у каждого выделяемого РБ в частотной полосе.

Также стандарт запрещает использование низкоскоростных сигнально-кодовых конструкций (СКК) в РБ малого размера. Размер ресурсного блока определяет набор СКК, которые могут быть использованы для передачи в РБ. В частности, новый QAM-1024 может использоваться только в 242-тоновых и больших РБ. Следует отметить, что передача в более широком РБ не всегда означает, что станция будет передавать на большей скорости. Станция использует одну и ту же мощность как для широких, так и для узких РБ. Отсюда следует ожидать большее значение отношения сигнал-шум в узких РБ. А значит, в узких РБ станции могут использовать более скоростные СКК. Такие ограничения затрудняют задачу планирования ресурсов в сетях 11ах.

Конфигурации ресурсных блоков могут содержать блоки с различным количеством тонов, однако все РБ внутри кадра должны иметь одинаковую продолжительность. Для этого станции могут использовать новую гибкую фрагментацию, предусмотренную в стандарте.

Все передачи внутри одного кадра OFDMA должны быть синхронизированы, то есть начинаться и заканчиваться одновременно. Это можно легко реализовать в нисходящих потоках данных, где кадр OFDMA генерируется точкой доступа. Однако для обеспечения синхронизации для восходящих потоков данных точка доступа может использовать триггер-кадр (ТК). Синхронизация проводится следующим образом. Точка доступа отправляет ТК пользовательским станциям, после этого, через SIFS после приёма ТК, станции передают свои части кадра с использованием OFDMA. При необходимости точка доступа подтверждает приём каждой части, отправив набор кадров подтверждений внутри кадра OFDMA или отправив блочное подтверждение (БП) нескольким станциям через SIFS после кадра станций.

В 802.11ах точка доступа определяет СКК, длительность передачи, распределение РБ и другие параметры OFDMA. Такая информация может передаваться в заголовках кадров для нисходящих и в триггер-кадре для восходящих потоков. Если необходимо, то точка доступа подтверждает приём данных от каждой клиентской станции, передавая наборов кадров-подтверждений

в многопользовательском блочном подтверждении. Пример передачи в восходящих потоках с помощью OFDMA показан на рис. 2.

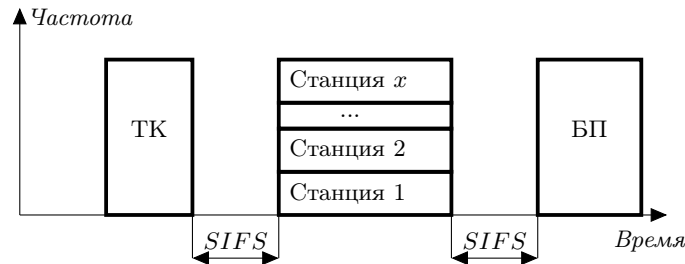


Рис. 2: Восходящие потоки данных в OFDMA.

Как видно, OFDMA имеет много достоинств. Во-первых, передача становится более надёжной при частотно-избирательных замираниях и затуханиях. Это особенно важно для широких каналов с частотой 160 МГц, введённых в дополнение IEEE 802.11ac. Во-вторых, с помощью OFDMA возможна «склейка» коротких пакетов, предназначенных разным станциями или передаваемых разными станциями, что значительно снижает накладные расходы, вызванные заголовками физического уровня технологии Wi-Fi, и тем самым снижает время доступа к каналу. В-третьих, для передачи восходящих потоков с помощью станций, находящихся на пороге чувствительности мощности, имеет смысл использовать узкие каналы вместо широких. Действительно, поскольку станции пространственно разделены, они могут одновременно передавать с максимальной допустимой мощностью без нарушения законных ограничений на излучаемую энергию. Таким образом, уменьшая ширину РБ, мы увеличиваем спектральную плотность мощности, получаемую от станции, и можем использовать более высокие СКК. Другими словами, увеличивается принятая кумулятивная спектральная мощность по сравнению со случаем, когда передаёт всего лишь одна станция. Для этих станций увеличение спектральной плотности мощности приводит к более высокоскоростной СКК, поэтому средний объём данных, полученных из кадра OFDMA, выше, чем у ранее использованных технологий. Таким образом, в отличие от LTE в сетях 802.11ac скорости в ресурсных блоках, используемых для восходящих потоков, не являются аддитивными, то есть если станция передаёт в вдвое большем РБ, не гарантируется, что она передаст вдвое больше данных. Возможны даже сценарии, когда она передаст меньшее количество информации в подобном случае, что подчеркивает необходимость разработки нового планировщика для сетей 11ac.

1.2 Организация гибридного доступа в сетях 802.11ac

Стандарт 11ac перемещает механизм принятия решений от станций к точке доступа, которая и определяет: какая станция будет передавать; ко-

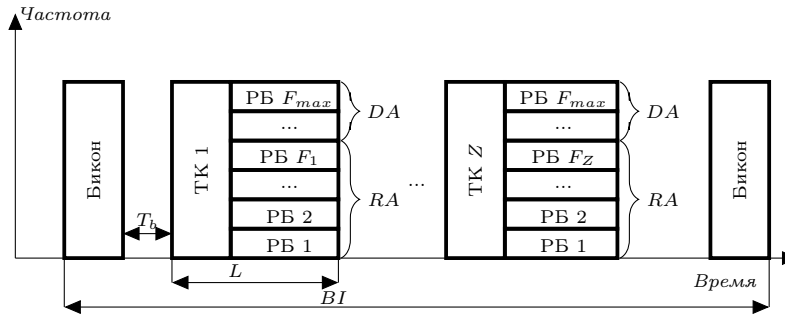


Рис. 3: Процесс передачи данных

гда, в каком ресурсном блоке, сколько данных должно передаваться и т.п. Чтобы принять правильное решение, точка доступа должна быть осведомлена о буферизованном трафике станций и об условиях в канале. Один подход для организации передачи буферизованного трафика пользовательскими станциями — это использование случайного доступа OFDMA (СД) наряду с планировщиком ресурсов, работающим по заранее определённому алгоритму. Передачу данных, осуществляющуюся с помощью планировщика ресурсов будем называть детерминированным доступом (ДД). Благодаря методу СД, точка доступа может быстро получить информацию о новых кадрах, буферизованных подключёнными к данной точке доступа станциями, ожидающих передачи в восходящих потоках к станции. В этом случае, чтобы организовать передачу данных с использованием OFDMA в течение интервала между биконами (бикон-интервала), точка доступа периодически отправляет триггер-кадры (ТК). Назовём периоды между триггер-кадрами триггер-интервалами. Такой процесс передачи данных показан на рис. 3.

Заметим, что для передачи запросов полосы станции в сети IEEE 802.11ax могут использовать не только случайный доступ в OFDMA, но и стандартный метод случайного доступа EDCA, в те интервалы времени, когда точка доступа не использует частотное разделение канала. Подобные интервалы возникают в тех ситуациях, когда ни одна станция в сети ещё не запросила ресурсы у точки доступа и нет необходимости выделения ресурсов в OFDMA для передачи. А значит, согласно стандарту она не рассылает триггер-кадры и не распределяет ресурсы между станциями, поскольку никакая из станций не показала необходимость в предоставлении ей некоторых ресурсов. В таком случае клиентские станции при появлении данных на передачу начинают соревноваться за доступ к каналу, используя метод доступа EDCA. Когда точка доступа успешно получает запрос полосы, то она начинает рассылать триггер-кадры и вся работа переходит в режим гибридного доступа, описанного выше. Также можно использовать случайный доступ, детерминированный и отводить некоторое время в слоте под передачу запросов полосы в EDCA.

Остановимся подробнее на вопросе объединения случайного и детерминированного доступа в сетях 802.11ax: гибридного доступа. С точки зрения станции можно выделить две фазы, в которых последняя может находиться:

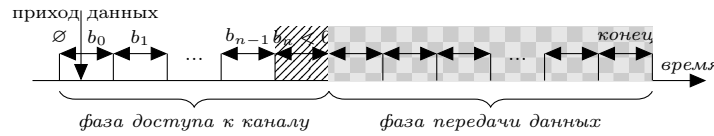


Рис. 4: Передача данных с точки зрения станции

- фазу случайного доступа СД (в ней станция пытается конкурентно с другими станциями отправить запрос на полосу для дальнейшей передачи данных);
- фазу детерминированного доступа ДД (в которую станция переходит при успешной передаче упомянутого запроса на полосу и которая полностью определяется планировщиком ресурсов).

Также стоит отметить, что есть два типа ресурсных блоков: РБ, используемый для СД и РБ, используемый для ДД.

Пусть сеть Wi-Fi состоит из точки доступа, к которой подключена группа из N станций, которым время от времени приходят конечные потоки данных на передачу для точки доступа. Данный сценарий изображён на рис. 5. Будем считать, что при получении станцией потока данных, точка доступа достаточно быстро узнаёт об этом. Т.е. в данной статье не затрагиваются вопросы, касающиеся случайного доступа при передаче данных. Чтобы минимизировать суммарное время передачи данных в детерминированном доступе нужно решать задачу наилучшего разбиения канала на РБ, а также их назначения передающим станциям.

В данной работе мы рассматриваем следующую проблему: *разработать планировщик ресурсов для передачи данных в восходящих потоках, который минимизирует среднюю задержку.*

2 Обзор литературы

Несмотря на то, что комитет IEEE 802 планирует опубликовать стандарт IEEE 802.11ax только в 2019 году, он уже широко исследован в литературе [1–5].

Авторы [1] изучают производительность сети, состоящей как из станций, поддерживающих стандарт современного Wi-Fi, так и станций, которые могут работать согласно стандарту IEEE 802.11ax. Авторы предлагают подход для оптимального выбора значений параметров канала, которые гарантируют справедливость в распределении ресурсов между современными

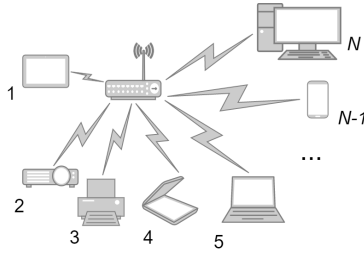


Рис. 5: Сетевой сценарий

станциями и станциями 802.11ах, и значительно увеличивает количество OFDMA-передач для последних. Однако модель, описанная в [1], позволяет только оценивать количество OFDMA-передач в сети, но не возможно достигаемую скорость передачи данных.

Многие исследования производительности сетей 802.11ах были представлены на совещаниях групп IEEE 802.11ах, например, [4, 5]. Однако, хотя многие сетевые топологии уже были изучены, единственным рассмотренным планировщиком был случайный планировщик со статически зафиксированной конфигурацией ресурсных блоков.

Проблема планирования ресурсов в восходящих потоках данных в сетях 11ах рассмотрена в [3], в которой основное внимание уделяется выбору длительности ресурсных блоков. Авторы изначально предполагают, что точка доступа не знает количество данных, которые станции имеют на передачу, и, следовательно, не знает, какой длительности ресурсные блоки должны быть выделены. Авторы предлагают схему, которая может использоваться точкой доступа для получения этой информации и описывают лучший способ выбрать продолжительность передачи станций с точки зрения пропускной способности и потребления энергии. Однако они не рассматривают какой-либо конкретный способ разделить канал на ресурсные блоки и назначить блоки станциям. Они также не рассматривают случайный доступ и возможность использования станциями для доставки запросов на передачу данных путём агрегирования их с передаваемыми данными.

Случайный доступ для восходящих потоков данных OFDMA в 802.11ах изучен в [6]. Авторы рассматривают сценарий, в котором станции передают насыщенные потоки данных и используют только случайный доступ для передачи. Они описывают математическую модель передачи с применением метода случайного доступа OFDMA и используют её для анализа и оптимизации производительности сети с точки зрения пропускной способности и процента успешных РБ. Методология, предложенная в статье, может быть использована для настройки случайного доступа для восходящих потоков данных OFDMA, однако использование детерминированного доступа более целесообразно с точки зрения эффективности канала для изучаемого сценария. Следует также отметить, что передача насыщенных потоков данных в восходящем потоке не является типичным сценарием для пользовательских

сетей Wi-Fi, т.к. обычно трафик в восходящем потоке состоит из коротких и редко передаваемых пакетов, например, HTTP-запросов.

В литературе ещё не было исследовано совместное использование случайного и детерминированного доступов в сетях Wi-Fi IEEE 802.11ax, что указывает на актуальность поставленной в дипломной работе задачи.

3 Исследование планирования ресурсов в OFDMA

3.1 Предпосылки и описание известного планировщика ресурсов

Проблема распределения ресурсов в сотовых сетях широко изучена. Во многих работах она сформулирована как некоторая задача оптимизации. Рассмотрим сеть с базовой станцией (БС) и n ассоциированных с ней пользователей, у которых есть данные на передачу. Периодически базовая станция запускает планировщик, который распределяет m ресурсных блоков между пользователями таким образом, чтобы максимизировать некоторую функцию полезности, зависящую от параметров клиентских станций и сети.

Из литературы известен планировщик (SRTF) Shortest Remaining Time First, целью которого является обеспечивать минимальное среднее время загрузки, если свойства канала не изменяются со временем, и скорость в разных РБ одинакова и аддитивна. Причём данный планировщик не использует возможность частотного разделения канала и всегда выдаёт весь канал какой-то станции.

За исключением ожидания, время, необходимое для передачи потока i , равно $t_i = \frac{D_i}{r_i}$, где $D_i(t)$ — это оставшийся объем данных пользователя i , r_i — его скорость во всем канале. Первая станция заканчивает доставку потока к моменту времени t_1 . Вторая станция начинает свою передачу сразу после первой и доставляет свой поток по времени $t_1 + t_2$ и т. д. В результате общее время передачи для существующих потоков равняется

$$T = t_1 + (t_1 + t_2) + (t_1 + t_2 + t_3) + \dots = \sum_{i=1}^n (n - i + 1) t_i.$$

Очевидно, чтобы минимизировать суммарное время передачи, нужно сортировать станции в порядке возрастания по t_i . Таким образом, SRTF распределяет все РБ пользователю, для которого $\frac{D_i(t)}{r_i}$ минимальный. То есть, планировщик расставляет станции по возрастанию этого параметра, как показано на рис. 6.

3.2 Описание разработанного планировщика

В этом разделе описывается новый планировщик MUTAX (Minimizing Upload Time in 11AX networks), направленный на то, чтобы уменьшить время передачи в сетях 11ax. Для этого модифицируем планировщик SRTF, чтобы получить новый, более эффективный планировщик для сетей IEEE

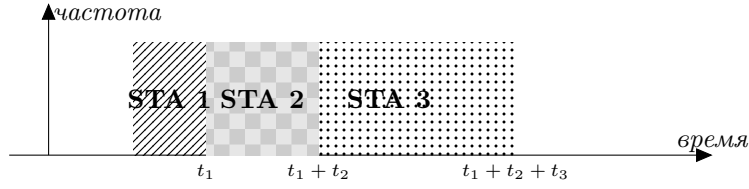


Рис. 6: Работа планировщика SRTF

802.11ax. Здесь пренебрегаем эффектами, связанными с различными накладными расходами (включая агрегацию и фрагментацию). Кроме того, для краткости мы рассматриваем только n станций с потоками данных и предполагаем, что каждая станция имеет только один поток. Пусть станция (как и соответствующий ей поток) обозначены номером i , $i = 1, \dots, n$.

Назовем слотом временной интервал между двумя последующими триггер-кадрами. Следует отметить, что слоты могут иметь разную продолжительность. Максимальная продолжительность связана со стандартным пределом 5484 мкс для продолжительности блока данных физического протокола (PPDU). Длительность слота определяется по самой длительной передаче.

Алгоритм MUTAX имеет два этапа работы. На первом этапе вычисляется время доставки всех известных потоков так, как если бы использовалось исчерпывающее обслуживание. На втором этапе алгоритм пытается улучшить это суммарное время передачи, параллельно используя несколько потоков.

Давайте подробно рассмотрим шаги. На первом этапе проводится расчёт с предположением, что каждый поток обслуживается исчерпывающим образом, т.е. подобно алгоритму планировщика SRTF, в котором точка доступа предоставляет весь канал одной станции для передачи данных. Кроме ожидания, время, необходимое для передачи потока данных станции i , равно $t_i = \frac{D_i}{r_i}$, где r_i — скорость станции i , передающей во всей частотной полосе. В таком случае первая станция заканчивает доставку потока к моменту времени t_1 . Вторая станция начинает свою передачу сразу после первой и доставляет свой поток ко времени $t_2 + t_1$ и т. д. В результате общее время передачи для существующих потоков равняется

$$T_{step1} = \sum_{i=1}^n (n - i + 1) t_i.$$

Очевидно, чтобы минимизировать суммарное время передачи, нужно сортировать станции в порядке возрастания по t_i , что и делает на первом этапе планировщик MUTAX.

На втором этапе алгоритм предполагает деление канала на несколько РБ в текущем слоте, как показано на рис. 7. Заметим, что на рисунке приведен пример конфигурации, когда некоторая часть ресурсов отведена под случайный доступ. Итак, пусть m — количество РБ и j , $1 \leq j \leq m$ — порядковый номер РБ в рассмотренной конфигурации ресурсов. Обозначим x_i^j за

индикаторную величину, которая равняется 1, если станция i ассоциирована с блоком j , и 0, в противном случае. Также пусть X — это двумерная матрица $\{x_i^j\}$, описывающая связь между РБ и станциями.

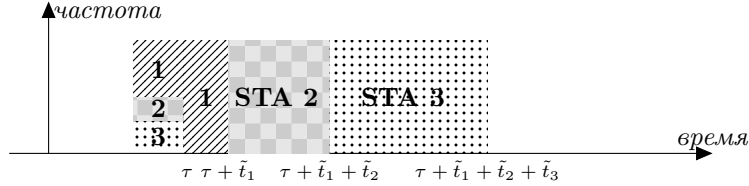


Рис. 7: К планировщику MUTAX

При введенных обозначениях общее время загрузки $T(X)$ существующих потоков отличается от T_{step1} следующим образом. Во-первых, время передачи каждого из n потоков увеличивается на длительность текущего временного слота τ . Во-вторых, если $x_i^j=1$, оставшийся объем данных потока уменьшается на размер данных, которые станция передает в РБ j текущего слота: $\Delta D_i^j = \min \{D_i, \tau \times r_i^j\}$. Таким образом,

$$T(X) = n\tau + \sum_{i=1}^n (n-i+1) \frac{D_i - \sum_{j=1}^m x_i^j \Delta D_i^j}{r_i}$$

Поскольку τ и ΔD_i^j зависят от распределения ресурсов X , минимизация $T(X)$ требует поиска по возможным способам распределения РБ для станций, и для упрощения задачи здесь предлагается эвристический подход, основанный на двух предположениях. Во-первых, допустимо пренебрегать изменением $n\tau$ для разных распределений, поскольку слот не может быть слишком длинным из-за стандартных ограничений. Во-вторых, сортируем станции в порядке возрастания t_n только один раз, прежде чем рассматривать разные способы назначения РБ станциям. В этих предположениях, чтобы минимизировать $T(X)$, нужно максимизировать следующее выражение

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (n-i+1) \frac{\Delta D_i^j}{r_i}.$$

Определим параметр $\lambda_i^j = (n-i) \frac{\Delta D_i^j}{r_i}$, и тогда задача планирования ресурсов сводится к следующей оптимизационной задаче:

$$\max \sum_i \sum_j x_i^j \lambda_i^j; \quad (3.1)$$

$$\text{при } \sum_i x_i^j \leq 1, \quad \forall j; \quad (3.2)$$

$$\sum_j x_i^j \leq 1, \quad \forall i; \quad (3.3)$$

$$\sum_i \sum_j x_i^j \leq m, \quad (3.4)$$

в которой условие (3.2) олицетворяет тот факт, что одной станции не может быть назначено больше, чем один ресурсный блок согласно ограничениям применения технологии OFDMA; условие (3.3): одному ресурсному блоку не может быть поставлено в соответствие больше одной станции; последнее условие (3.4) — суммарно всего имеем m ресурсных блоков.

Эта задача известна как проблема назначения, которая может быть решена в полиномиальное время с использованием венгерского алгоритма [7], известного также как алгоритм Куна—Манкреса или алгоритм Манкреса решения задачи о назначениях. Его решением является назначение $\hat{X}$, дающее время $T(\hat{X})$.

Следует заметить, что такая задача оптимизации — это общая математическая задача. Например, если взять за параметр λ_i^j величину, равную r_i^j/S_i , то, получится адаптация планировщика PF к сетям 802.11ax.

Отметим, что назначение найдено для конкретной конфигурации РБ. Чтобы в конце концов минимизировать время загрузки, необходимо рассматривать различные способы разделения канала на РБ. Поскольку эффективность алгоритма планировщика MUTAX значительно зависит от того, как канал разделен на РБ, то для каждой конфигурации РБ решается задача оптимизации и находится $T(X)$ для каждой известной X и, таким образом, найдя минимальное время среди всех полученных результатов находим наилучшую конфигурацию ресурсов канала и их лучшее назначение среди всех доступных. Перебор конфигураций РБ может быть ускорен за счёт исключения конфигураций, которые явно хуже известных альтернатив, например, если у нас есть две станции и канал 20 МГц, рассматривая конфигурацию с одним 106-тоновым РБ, одним 52-тоновым РБ и тремя 26-тоновыми, можно исключить конфигурацию с одним 106-тоновым РБ и пятью 26-тоновыми РБ.

3.3 Численные результаты

Были реализованы планировщик MUTAX, а также адаптации планировщиков PF, MR и SRTF для сетей 11ax. Поскольку производительность алгоритма планировщика PF значительно зависит от того, как канал разделен на РБ, то для его работы находим лучшую конфигурацию РБ перебором.

Имитационное моделирование проводилось в следующем сценарии. Сеть работает в канале 40 МГц на частоте 5 ГГц. Размеры потока берутся из усеченного логнормального распределения с минимальными, средними и максимальными значениями 1 КБ, 500 КБ и 5 МБ соответственно. Когда поток доставляется, следующий поток генерируется после случайной задержки, полученной из усеченного экспоненциального распределения с минималь-

ными, средними и максимальными значениями 0.1 с, 0.3 с и 0.6 с соответственно. В первом эксперименте станции расположены равномерно в пре-

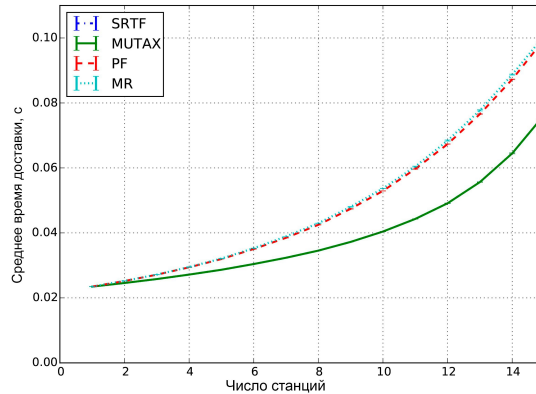


Рис. 8: Зависимость времени доставки от количества станций с применением разных планировщиков, когда станции находятся на расстоянии 5 метров

делах небольшого круга радиуса $R = 5$ м вокруг точки доступа. В таком случае качество канала настолько хорошее, что станции используют максимально доступную СКК для передачи в РБ любой ширины. Очевидно, что в этом случае OFDMA не может принести никакой прибыли против SRTF, поскольку разделение канала без изменения СКК не может увеличить скорость передачи данных при условии, что СКК может справиться с шумом. Этот результат поддерживается результатами моделирования, см. рис. 8, который показывает, что если канал для всех станций является идеальным, MUTAX дает одинаковое время загрузки, как SRTF, и они оба превосходят PF и MR планировщики на 30%.

Второй эксперимент соответствует случаю, когда станции расположены в большем круге радиуса $R=20$ м. Такие условия обеспечивают разнообразие выбора СКК, поэтому становится целесообразным разделить канал между разными пользователями. Согласно результатам моделирования, см. рис. 9, в этом случае для минимизации времени передачи классический SRTF работает намного хуже, чем даже адаптация PF для сетей 11ах. В то же время MUTAX показывает на 20% меньшее время передачи, чем PF.

Результаты показывают, что в этом случае планировщики, основанные на исчерпывающем обслуживании (MR и SRTF), намного менее эффективны, чем планировщики разбиения каналов (MUTAX и PF), а разрыв между ними увеличивается с количеством клиентских станций. В сценарии большого круга выигрыш в MUTAX по сравнению с SRTF и MR составляет почти 100%.

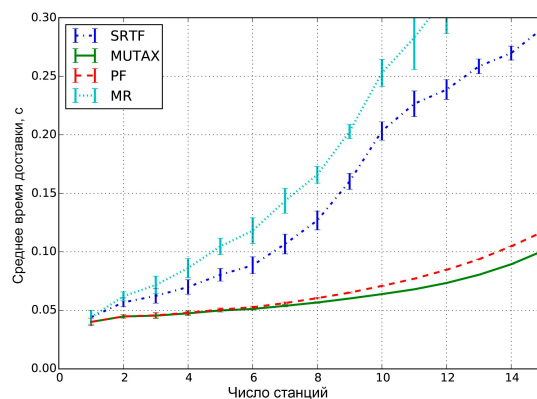


Рис. 9: Зависимость времени доставки от количества станций с применением разных планировщиков, когда станции находятся на расстоянии 20 метров

Заключение

В данной работе был исследован гибридный доступ в сетях IEEE 802.11ax. В данном дополнении появилась возможность передавать данные с использованием технологии OFDMA. При этом процесс передачи данных делится на две фазы: случайный доступ для передачи запроса канальных ресурсов и детерминированный — для непосредственной передачи данных. В данной работе была рассмотрена задача планирования ресурсов при детерминированном доступе устройств к каналу. Поставленной задачей было организовать передачу таким образом, чтобы сократить среднее время доставки потоков данных всех клиентских станций.

Для решения задачи был разработан планировщик MUTAX, который работает лучше чем аналоги известных планировщиков ресурсов, интерпретированных для сетей Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ax.

Список литературы

1. Khorov Evgeny, Loginov Vyacheslav, Lyakhov Andrey. Several EDCA parameter sets for improving channel access in IEEE 802.11 ax networks // Wireless Communication Systems (ISWCS), 2016 International Symposium on / IEEE. — 2016. — P. 419–423.
2. Bellalta Boris. IEEE 802.11 ax: high-efficiency WLANs // IEEE Wireless Communications. — 2016. — Vol. 23, no. 1. — P. 38–46.
3. Resource management for OFDMA based next generation 802.11 WLANs / Mehmet Karaca, Saeed Bastani, Basuki Endah Priyanto et al. // Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2016 9th IFIP / IEEE. — 2016. — P. 57–64.
4. Kim Suhwook, Park Hyunhee, Kim Jeongki et al. — 11ax PAR Verification through OFDMA, 2017. — January. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/16/11-16-1363-01-00ax-11ax-par-verification-through-ofdma.ppt>.

5. Su Hongjia, Pang Jiyong, Zhu Jun et al. — Preliminary 11ax PAR Verification, 2016. — September. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/16/11-16-1363-01-00ax-11ax-par-verification-through-ofdma.ppt>.
6. Performance Analysis of the 802.11ax UL OFDMA Random Access Protocol in Dense Networks / Leonardo Lanante, Hiroshi Ochi, Tatsumi Uwai et al. // Communications, 2017. ICC'17. IEEE International Conference on / IEEE. — 2017.
7. Bourgeois François, Lassalle Jean-Claude. An extension of the Munkres algorithm for the assignment problem to rectangular matrices // Communications of the ACM. — 1971. — Vol. 14, no. 12. — P. 802–804.