

Планирование ресурсов в сетях IEEE 802.11ax для случая частотно-селективного канала*

Д.В. Банков, С.А. Тутельян, Е.М. Хоров

{bankov, tutelian, khorov}@iitp.ru

ИППИ РАН

Аннотация В данной работе рассмотрен процесс передачи в восходящем канале в новом стандарте IEEE 802.11ax. В нем впервые для сетей 802.11 вводится технология множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов, которая предоставляет возможность одновременных многопользовательских передач. В работе исследована задача распределения ресурсов между пользователями в условиях частотно-селективных замираний. Предложен жадный подход к планированию ресурсов точкой доступа, который был выбран по причине высокой вычислительной сложности задачи. Приведено сравнение данного подхода с планировщиками, не учитывающими частотную селективность, и планировщиками, не допускающими одновременные передачи в канале.

1 Введение

Сети стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) прочно вошли в жизнь большинства людей. Они удовлетворяют большому количеству различных требований к локальным сетям передачи данных, будь то требование максимально быстрой работы в домашней сети или желание надежной работы сети в общественном месте. 802.11ax является новым дополнением данного стандарта, в котором основной упор сделан на повышение эффективности работы пользователей с сетью. В условиях большого количества точек доступа и еще большего количества подключенных к ним устройств задача обеспечить приемлемую работу с сетью для каждого устройства становится довольно важной и непростой.

Начиная с версии 802.11a, в сетях Wi-Fi предусмотрено использование технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) в диапазоне 5 ГГц, которая представляет из себя способ модуляции сигналов при помощи большого количества поднесущих. Основным нововведением стандарта 802.11ax является применение множественного доступа с ортогональным частотным

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

разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA). Данная технология позволяет разделять по частоте весь доступный канал между различными пользователями, т. е. одновременно могут передавать или принимать несколько устройств.

Производительность OFDMA зависит от способа частотного разделения канала по пользователям (станциям). Один из самых простых вариантов заключается в выделении всего канала только одному пользователю. Такое управление каналом может оказаться неэффективным в случае, когда многим станциям надо передавать небольшие порции данных: выделение всего канала каждой избыточно. Поэтому возникает задача планирования ресурсов — построения «хорошего» частотного разбиения канала по пользователям. В данной работе эта задача рассматривается для случая передачи в восходящем канале (т. е. от станций к точке доступа), так как в нисходящем канале данное планирование осуществляется проще. Также передаваемые сигналы подвержены частотно-селективным замираниям, и необходимо учитывать их влияние при планировании ресурсов.

В разделе 2 дано описание основ применения OFDMA в стандарте 802.11ах. В разделе 3 приведен обзор литературы. Раздел 4 содержит постановку задачи планирования. В разделе 5 предложен жадный подход решения поставленной задачи. В разделе 6 представлены результаты численного исследования. Раздел 7 содержит заключение.

2 Передачи с использованием OFDMA

При использовании OFDMA весь канал делится на группы поднесущих (тонов) — ресурсные блоки (РБ). РБ может состоять из следующего количества тонов: 26, 52, 106, 242, 484, 996 и 2×996 . Доступные наборы РБ отличаются для каналов разной ширины. Например, структура РБ для канала 40 МГц показана на рис. 1. 484-тоновый РБ занимает весь канал целиком. Данный РБ состоит из двух 242-тоновых РБ. Эти РБ, в свою очередь, состоят из РБ меньшего размера.

Согласно стандарту 802.11ах, управление OFDMA-передачей лежит на точке доступа. Она выбирает, каким пользователям когда и как передавать. Каждой станции для передачи может быть выделено не более одного РБ. При этом РБ может быть любого доступного размера. Количество передаваемых данных зависит от ширины РБ и от используемой сигнально-кодовой конструкции (СКК). Чем шире РБ и чем быстрее СКК, тем больше данных способна передать станция в единицу времени. Конкретные значения скоростей передачи в зависимости от СКК и размера РБ представлены в табл. 1. Стоит отметить, что высокоскоростные СКК 1024-QAM доступны для использования только в широких РБ.

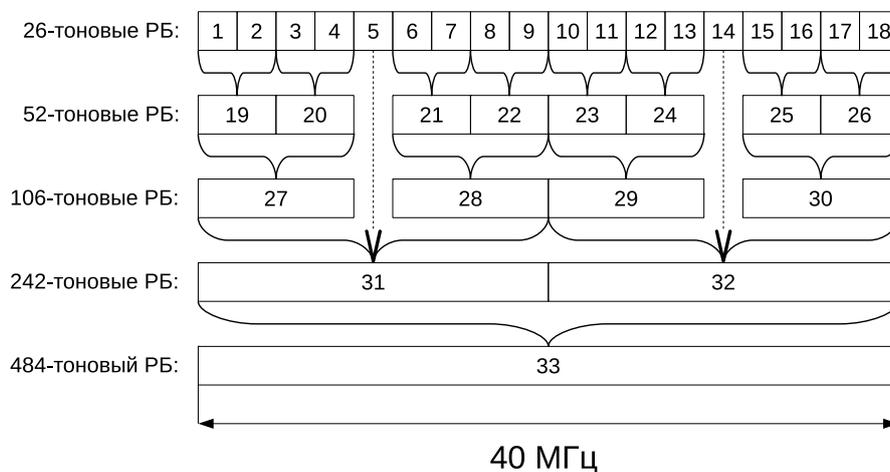


Рис. 1: Структура ресурсных блоков в канале 40 МГц

№	СКК	26 тонов	52 тона	106 тонов	242 тона	484 тона	996 тонов
1	BPSK, 1/2	0.8	1.7	3.5	8.1	16.3	34
2	QPSK, 1/2	1.7	3.3	7.1	16.3	32.5	68.1
3	QPSK, 3/4	2.5	5	10.6	24.4	48.8	102.1
4	16-QAM, 1/2	3.3	6.7	14.2	32.5	65	136.1
5	16-QAM, 3/4	5	10	21.3	48.8	97.5	204.2
6	64-QAM, 2/3	6.7	13.3	28.3	65	130	272.2
7	64-QAM, 3/4	7.5	15	34.9	73.1	146.3	306.3
8	64-QAM, 5/6	8.3	16.7	35.4	81.3	162.5	340.3
9	256-QAM, 3/4	10	20	42.5	97.5	195	408.3
10	256-QAM, 5/6	11.1	22.2	47.2	108.3	216.7	453.7
11	1024-QAM, 3/4	—	—	—	121.9	243.8	510.4
12	1024-QAM, 5/6	—	—	—	135.4	270.8	576.1

Таблица 1: Скорость передачи, Мбит/с

Выбор РБ и СКК для передачи зависит от отношения сигнал/шум. Чем быстрее СКК и чем шире РБ, тем более высокое соотношение сигнал/шум требуется для успешной передачи. Для этого необходимо выделять больше мощности на передачу, однако каждая станция имеет собственное ограничение на максимальную мощность и, следовательно, ограничена в выборе пары РБ и СКК.

Еще одним ограничением [1] на выбор РБ и СКК является то, что станции должны передавать данные с такой мощностью, чтобы уровень приходящего на точку доступа сигнала был приблизительно одинаков для всех одновременно передающих станций. Если отношение сигнал/шум будет сильно

различаться для разных РБ одного OFDMA-кадра, то точка доступа может принять данные с ошибкой.

Ситуация, когда точка доступа выделяет ресурсы конкретной станции, называется детерминированным доступом. Также 802.11ax предусматривает возможность стандартного для Wi-Fi случайного доступа к каналу. Однако для упрощения модели в данной работе рассматривается только детерминированный доступ. Общий вид процесса передачи в восходящем канале без случайного доступа показан на рис. 2.

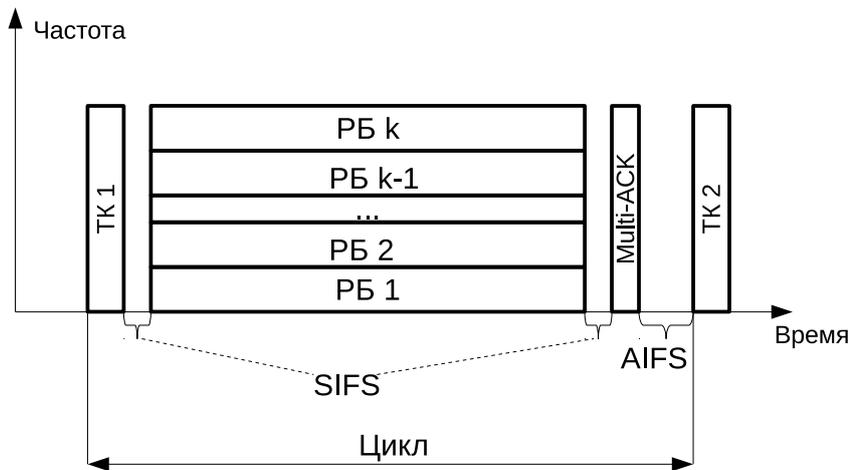


Рис. 2: OFDMA передача

Передачи внутри одного OFDMA-кадра должны начинаться и заканчиваться одновременно. Для этого используются триггер-кадры (ТК), которые отправляются точкой доступа, если у станций есть данные на передачу. В них указываются назначения для станций: длительность передачи, СКК, мощность, РБ для передачи и другие параметры. После этого все станции, получившие назначения РБ, передают данные. Затем точка доступа отправляет кадр подтверждения, в котором указывается, данные каких станций удалось принять.

3 Обзор литературы

Несмотря на то, что окончательный вариант стандарта 802.11ax запланирован для публикации лишь в 2019 году, основные его положения известны и вряд ли изменятся. Поэтому уже проводятся исследования его эффективности. В работе [2] рассматривались различные планировщики для разбиения всего канала между пользователями. Показано, что использование возможности одновременной передачи несколькими пользователями дает уменьше-

ние задержки передачи потоков, а так же ощутимо увеличивает пропускную способность, по сравнению со случаем, когда одновременно передавать может лишь один. Однако данное исследование было проведено без учета частотно-селективных замираний, что исправляет настоящая работа.

В работе [3] рассматриваются многопользовательские передачи в восходящем потоке. Показано, что 802.11ах превосходит 802.11ас по пропускной способности и задержке. При этом делается допущение, что каналные условия для всех станций одинаковы, а планировщик просто разделяет весь канал поровну.

В работе [4] исследована задача распределения РБ для пользователей разных категорий обслуживания (VoIP, видеотрафик), принимая во внимание такие факторы, как заполненность буферов передачи, параметры QoS, индикаторы справедливости обслуживания. Также предложен подход предсказания с помощью известных методов регрессии (например, метод k -ближайших соседей) значений некоторых из этих факторов в случае, если их значения редко обновляются.

Случайный доступ в передачах с помощью OFDMA в восходящем канале был изучен в работе [5]. Показано, что необходим баланс в выделении ресурсов для детерминированного и случайного доступа. Уменьшение количества ресурсов для случайного доступа ведет к повышению пропускной способности, но в то же время повышает время доставки отчетов о текущем состоянии буфера, что может приводить к большим задержкам передачи некоторых потоков.

4 Задача планирования

Рассматривается следующая модель сети: дана точка доступа, вокруг нее в некотором круге равномерно распределены N станций. Через случайные промежутки времени у станций появляются потоки данных на передачу. В данной работе не учитывается случайный доступ, поэтому считается, что при возникновении потока, точка доступа сразу узнает об этом. Следовательно, в любой момент времени t точка доступа знает, у каких станций есть данные на передачу. Этим станциям точка доступа должна выделить ресурсы.

Каждой станции из некоторого подмножества станций, у которых есть данные на передачу, назначается один РБ. Эти назначения посылаются в триггер-кадре, который передается на самой медленной СКК, и предполагается, что его принимает каждая станция. Станции, которым выделены ресурсы, передают в соответствующих РБ. После этих передач точка доступа снова планирует ресурсы и генерирует следующий триггер-кадр.

Согласно стандарту, при планировании точка доступа должна назначить РБ станциям, удовлетворяя следующим *ограничениям*:

- Каждой станции может быть выделено не более одного РБ. Ширина РБ может быть любой допустимой (26 тонов, 52 тона и т. д.).

- Один и тот же частотный отрезок полосы не может быть выделен двум и более станциям одновременно. Например, для структуры РБ с рис. 1 если одной станции был выделен РБ под номером 1, то другим станциям не могут быть выделены РБ с номерами 19, 27, 31, 33.

Также точка доступа выбирает мощность и СКК, на которых будут передавать станции.

Для решения задачи планирования задается некоторая функция полезности U , значение которой планировщик должен максимизировать. Пусть дано множество станций $S = \{s_i\}_{i=1}^n$, где n — количество станций, у которых есть данные на передачу, а также множество всех РБ для данного канала $R = \{r_j\}_{j=1}^J$. r_j отличаются друг от друга шириной и расположением в полосе. Например, все РБ для канала 40 МГц пронумерованы на рис. 1. Множество назначений РБ станциям — множество пар $X = \{(s_i, r_j)\}$, где (s_i, r_j) означает, что станции s_i был выделен РБ r_j . Исходя из структуры РБ, можно определить операции включения и пересечения различных РБ. $r_i \subset r_j$, если r_j содержит все частоты, которые содержит r_i . Например, на рис. 1 $r_1 \subset r_{19}$, $r_{24} \subset r_{32}$ и так далее. $r_i \cap r_j = r_i$, если $r_i \subset r_j$; $r_i \cap r_j = r_j$, если $r_j \subset r_i$; $r_i \cap r_j = \emptyset$, если $r_i \not\subset r_j$ и $r_j \not\subset r_i$. Стоит отметить, что не может быть частично перекрывающихся РБ: если 2 разных РБ имеют общие частоты, то один из них полностью содержится в другом. Для упрощения записи $s \in X \iff \exists(s, r) \in X$ и $r \in X \iff \exists(s, r) \in X$.

С помощью данных операций можно определить указанные выше ограничения на X :

$$\begin{aligned} s_i &\neq s_j, \forall s_i, s_j \in X, \\ \bigcap_{r \in X} r &= \emptyset. \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть теперь H — множество всех назначений, удовлетворяющих условиям (1), C — множество доступных СКК. $\lambda(s, r, c)$ — прирост функции полезности в случае, если алгоритм выделил станции s РБ r на СКК $c \in C$. Если станция не поддерживает передачу на данной СКК в данном РБ (например, из-за отсутствия необходимой мощности), то $\lambda = 0$.

В разделе 2 отмечено, что кадры от разных станций должны приходиться к точке доступа с приблизительно одинаковой мощностью. Для этого требуем, чтобы станции передавали на одной СКК. В этом случае для любого множества назначений X выравнивание мощностей происходит по станции с наихудшими канальными условиями, что довольно просто. Если выбирать разные СКК для разных станций, то необходима более сложная процедура: она должна учитывать, что станции могут менять не только выходную мощность, но и СКК для выравнивания.

5 Построение назначений

Как уже было отмечено, точка доступа должна максимизировать функцию полезности для построения назначений. Пусть СКК $c \in C$ фиксирована.

Тогда задачу максимизации функции полезности можно записать так:

$$\max_{X \in H} \sum_{(s,r) \in X} \lambda(s, r, c). \quad (2)$$

Так как в условиях частотной селективности все РБ отличаются друг от друга, то прямой перебор по всем $X \in H$ является вычислительно затратным. Поэтому в данной работе предлагается использование жадного алгоритма для приближенного решения задачи (2).

5.1 Жадный алгоритм

Схема работы жадного алгоритма выглядит следующим образом. Все станции сортируются по убыванию метрик — приращений функции полезности. После этого первой станции в списке ставится в соответствие самый широкий доступный РБ, затем второй станции самый широкий из оставшихся и т. д. Назначения продолжаются до исчерпания РБ или станций в списке. В итоге получается множество назначений при фиксированной СКК c . Точка доступа строит такие множества для каждой СКК из C и затем выбирает наилучшее. Далее шаги данного алгоритма рассмотрены более подробно.

Сначала для каждой станции вычисляются значения $\lambda(s, r, c)$, для $r \in R_{242}$, где R_{242} — множество 242-тоновых РБ (ширина ≈ 20 МГц). Канальные условия в этих РБ могут сильно отличаться из-за частотно-селективных замираний, причем их влияние различно для разных станций. Из данных значений берется максимум, т. е. $\lambda_s = \max_{r \in R_{242}} \lambda(s, r, c)$. Для сравнения были выбраны значения метрик для каналов шириной 20 МГц, так как данные РБ довольно крупные, и поэтому значения метрик характеризуют «среднее» качество канала у станции. При этом более крупные РБ не были взяты из-за того, что канал обычно разделяют по частоте несколько станций, и передача в очень широких РБ происходит сравнительно редко.

Станции сортируются по убыванию полученных значений λ_s . Затем первой станции в получившемся списке выделяется самый широкий РБ, в котором она может передавать на СКК c . После этого выбирается следующая станция в списке, и ей выделяется наиболее широкий РБ из оставшихся допустимых. Получившиеся назначения X для двух станций должны удовлетворять ограничениям (1). Так повторяется для всех станций до конца списка или до исчерпания допустимых РБ, т. е. до случая, когда для следующей станции в списке нельзя назначить какой-либо РБ, чтобы $X \in H$.

Далее для получившегося множества назначений считается значение выражения:

$$\sum_{(s,r) \in X} \lambda(s, r, c). \quad (3)$$

Описанная процедура повторяется для всех $c \in C$. В результате выбирается та СКК c и соответствующее ей множество назначений X , для которых значение выражения (3) максимально.

5.2 Вычисление приоритетов

Для работы описанного жадного алгоритма необходимо вычислять значения λ , которые являются приоритетом: станция с большим значением λ обычно получает больше ресурсов. Рассмотрим несколько подходов к их вычислению.

Наиболее простым способом является максимизация пропускной способности Max Rate (MR). Планировщик стремится передать максимальное количество данных по каналу за промежуток времени t , несмотря на то, какие именно станции будут передавать. В этом случае λ считается следующим образом:

$$\lambda(s, r, c) = \text{rate}(r, c),$$

где $\text{rate}(r, c)$ — скорость передачи на СКК c в РБ r . Как уже было отмечено, если станция s не может передавать на СКК c в РБ r , то $\lambda = 0$. Поэтому для простоты записи данный случай не включается в выражения для λ .

Следующим рассмотрим подход Proportional Fair (PF). В этом случае планировщик учитывает не только количество данных, которое может передать станция, но еще и то количество данных, которое станция уже успела передать к этому моменту, так, что станция, которая мало успела передать имеет высокий приоритет. Таким образом, получается справедливое распределение ресурсов, и

$$\lambda(s, r, c) = \frac{\text{rate}(r, c)}{Q(s)},$$

где $Q(s) = \frac{A(s)}{TT(s)}$ — усредненная скорость передачи данных, $A(s)$ — количество уже переданных данных, $TT(s)$ — время, когда у станции были данные на передачу.

Последним рассмотренным планировщиком является Shortest Remaining Processing Time (SRPT). Этот планировщик стремится минимизировать время, за которое поток будет полностью передан. В данной работе рассмотрена следующая версия данного подхода. Сортировка для жадного алгоритма производится по значениям

$$\lambda(s) = \frac{D(s)}{\text{rate}(r_{entire}, c_{best})},$$

где $D(s)$ — количество данных потока, оставшихся для передачи, r_{entire} — РБ, занимающий весь канал, c_{best} — самая быстрая СКК, с которой станция s может передавать во всем канале. Данное значение $\lambda(s)$ является временем передачи потока, если этой станции выделить весь канал. Чем меньше это время, тем быстрее станция может передать (при выделении всего канала) оставшуюся часть своего потока, и тем выше у нее приоритет, т. е. сортировка происходит по возрастанию.

Значения $\lambda(s)$ не зависят от выбранной СКК, поэтому порядок сортировки для всех СКК является одинаковым. При этом вместо выражения (3)

после построения множества назначений для СКК c вычисляется следующее:

$$\sum_{(s,r) \in X} \frac{D(s) - \min\{D(s), \tau_{max} \times rate(r, c)\}}{rate(r_{entire}, c_{best})} + \sum_{(s,r) \notin X} \frac{D(s)}{rate(r_{entire}, c_{best})}, \quad (4)$$

где $\tau_{max} = 5484$ мкс — максимальная длительность передачи, согласно стандарту. $\tau_{max} \times rate(r, c)$ определяет максимальное количество данных, которые передаст станция, если ей назначить РБ r и СКК c . Следовательно, числитель левой суммы является количеством оставшихся данных потока после выполнения передачи, т. е. новым значением $D(s)$. Таким образом, выражение (4) определяет суммарное время передачи оставшихся потоков всех станций, если бы им выделяли весь канал. Выбирается множество назначений для той СКК, при которой значение выражения минимально.

5.3 Адаптация информации о состоянии канала

Частотная селективность означает, что замирания дают различный эффект для разных частот сигнала, т. е. разные ресурсные блоки внутри одного канала могут испытывать различное усиление/ослабление мощности. В данной работе используется следующая модель потерь мощности сигнала (конкретные числовые выражения находятся в разделе 6):

$$PL(s, r) = PL(s_{dist}) + P(r_{size}) + Fading(s, r) + const, \quad (5)$$

где $PL(s_{dist})$ — потери, зависящие от расстояния от станции до точки доступа, $P(r_{size})$ — учет ширины РБ (чем меньше РБ, тем больше плотность мощности), $Fading(s, r)$ — изменения мощности, вызванные замираниями. Точка доступа знает значения $PL(s, r)$ для каждой станции и каждого РБ и определяет, может ли станция передать на данной СКК в данном РБ, на основании чего строятся назначения. Однако значения $Fading(s, r)$, которые знает точка доступа, могут отличаться от актуальных.

Пусть $F(s, r)$ — оценка значения $Fading(s, r)$, имеющаяся у точки доступа. Пусть информация о влиянии замираний на каждую станцию, а именно значения $F(s, r)$, обновляется на точке доступа с некоторым периодом T_{fd} . Тогда спустя некоторое время после последнего обновления оценка $F(s, r)$ может оказаться неактуальной, и тогда точка доступа выделит станции такие РБ и СКК, что данные не будут приняты из-за ухудшившихся канальных условий, и станции придётся сделать новую попытку передачи данных.

Для уменьшения количества повторных передач предлагается алгоритм, который улучшает оценку $F(s, r)$, исходя из результатов прошлых передач. Если станция s неуспешно передала в РБ r некоторое количество раз подряд, то это означает, что канальные условия ухудшились по сравнению с моментом обновления, и поэтому потери мощности для этой станции в данном РБ увеличиваются. Если же произошло несколько успешных передач подряд, то потери мощности уменьшаются. Далее алгоритм описан более подробно.

Пусть $F_{\{T_{fd}\}}(s, r)$ — значения $Fading(s, r)$ в момент последнего обновления. Для каждой станции для каждого РБ $r \in R$ заводятся счетчики успешных и неуспешных передач $count_{success}(s, r)$ и $count_{fail}(s, r)$. Также заводятся переменные $add(s, r)$, которые показывают, как нужно изменить (уменьшить или увеличить и насколько) значения $F_{\{T_{fd}\}}(s, r)$. Увеличение (уменьшение) данного значения означает увеличение (уменьшение) потерь $PL(s, r)$.

В начале работы системы все указанные переменные равны нулю. Ниже показан псевдокод алгоритма изменения переменной $F(s, r)$ в случае успешной/неуспешной передачи станцией s в РБ r :

Параметры:

e_{down} — количество повторных неуспешных попыток передач для увеличения переменной $F(s, r)$;

e_{mid} и e_{up} — количество повторных успешных передач для уменьшения переменной $F(s, r)$;

$step$ — шаг уменьшения/увеличения $F(s, r)$;

Пусть жадный алгоритм назначил станции s передачу в РБ r .

if Передача неуспешна **then**

$count_{fail}(s, r) \leftarrow count_{fail}(s, r) + 1$;

$count_{success}(s, r) \leftarrow 0$;

if $count_{fail}(s, r) \geq e_{down}$ **then**

$count_{fail}(s, r) \leftarrow 0$;

$add(s, r) \leftarrow add(s, r) + 1$;

end

else

$count_{success}(s, r) \leftarrow count_{success}(s, r) + 1$;

$count_{fail}(s, r) \leftarrow 0$;

if $add(s, r) > 0$ **then**

$e \leftarrow e_{mid}$;

else

$e \leftarrow e_{up}$;

end

if $count_{success}(s, r) \geq e$ **then**

$count_{success}(s, r) \leftarrow 0$;

$add(s, r) \leftarrow add(s, r) - 1$;

end

end

$F(s, r) = F_{\{T_{fd}\}}(s, r) + add(s, r) \times step$

По полученным значениям $F(s, r)$ вычисляются $PL(s, r)$, и, исходя из этих обновленных значений, строятся назначения в следующем цикле. Два различных параметра для уменьшения переменной $F(s, r)$ нужны, чтобы станция быстрее (при $e_{mid} < e_{up}$) уменьшала данные значения, если до этого они были повышены, что позволяет быстро «исправить» оценку, когда качество канала переоценено.

Далее выполняются попытки передачи и вычисляются новые значения $count_{success}(s, r)$, $count_{fail}(s, r)$ и $add(s, r)$ по описанному выше алгоритму. Эти переменные обнуляются при получении актуальных значений (обновлении) $Fading_{\{T_{fd}\}}(s, r)$.

6 Результаты моделирования

Общая модель системы была описана в разделе 4. Рассматривается канал на частоте 5 ГГц шириной 40 МГц. Структура РБ показана на рис. 1. Размеры потока берутся из усеченного логнормального распределения с минимальным, средним и максимальным значениями 1 КБ, 1 МБ и 10 МБ соответственно. Время ожидания нового потока берется из усеченного экспоненциального распределения с минимальным, средним и максимальным значениями 1 с, 3 с и 6 с соответственно.

Для вычисления $PL(s_{dist})$ из формулы (5) была использована следующая модель затуханий сигнала [6]:

$$PL(s_{dist}) = 40.05 + 20lg(f_c/2.4) + 20lg(\min(s_{dist}, 5)) + \mathbb{I}(s_{dist} > 5) \times 35lg(s_{dist}/5),$$

где f_c — центральная частота в ГГц, \mathbb{I} — индикаторная функция, s_{dist} — расстояние от станции до точки доступа. Данная формула показывает потери мощности с расстоянием, выраженные в децибелах.

Размеры РБ учитываются так: $P(r_{size}) = 10lg(r_{size}/18)$. Здесь r_{size} — количество 26-тоновых РБ, из которых состоит РБ r , согласно схеме 1. Например, 52-тоновый РБ состоит из 2-х 26-тоновых РБ, 242-тоновый РБ — из 9. 18 — максимальная ширина РБ. Значения $Fading(s, r)$ рассчитываются по модели TGas D NLOS [7], рекомендованной в [6].

Для проведения экспериментов был реализован описанный в разделе 5 жадный алгоритм для метрик MR, PF и SRPT (обозначаются на графиках как ax-MR, ax-PF и ax-SRPT соответственно). Также были рассмотрены 6 планировщиков из работы [2] для проверки их эффективности в условиях замираний: 3 планировщика (обозначения на графиках: old ax-MR, old ax-PF и old ax-SRPT), разделяющих по частоте канал, но считающих, что каналные условия в каждом РБ одинаковы (считающих, что канал плоский), а также 3 планировщика, не разделяющих по частоте канал (обозначения на графиках: MR, PF, SRPT).

В первой серии экспериментов станции распределены в круге радиуса $R = 5$ метров. Также было рассмотрено 2 варианта обновления информации о замираниях: в любой момент времени известна актуальная информация ($T_{fd} = 0$ с), или данные обновляются с периодом 0.5 с ($T_{fd} = 0.5$ с).

Были построены графики зависимости пропускной способности и среднего времени передачи потока от количества станций. Они показаны на рис. 3 и 4. На таком расстоянии все станции почти всегда способны передавать на самой быстрой СКК в любом РБ, и поэтому разделение по частоте канала между несколькими станциями не увеличивает общую пропускную способность по сравнению с ситуацией, когда канал не разделяется, что и показано

на рис. 3. Однако по среднему времени передачи потока алгоритмы SRPT превосходят алгоритмы MR и PF.

При $T_{fd} = 0.5$ с заметно небольшое увеличение времени передачи для всех алгоритмов, связанное с неактуальностью данных о замираниях. Потери в пропускной способности для этого случая являются незначительными.

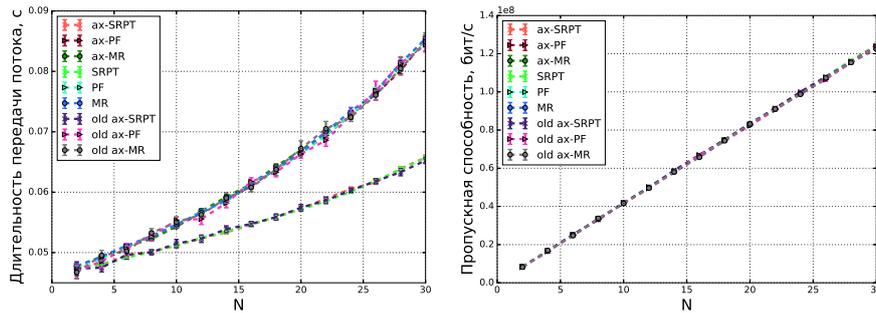


Рис. 3: $R = 5$ м, $T_{fd} = 0$ с

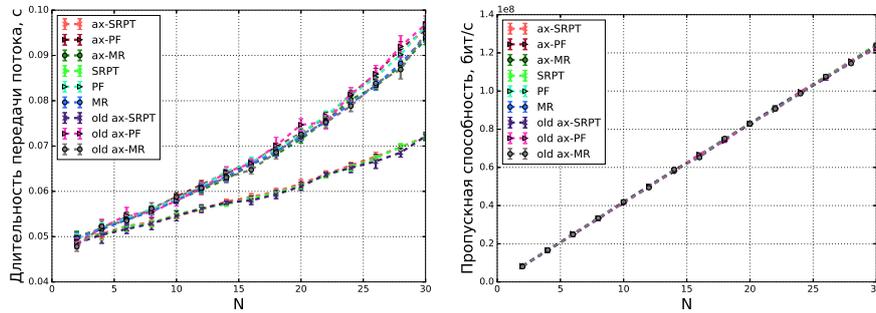


Рис. 4: $R = 5$ м, $T_{fd} = 0.5$ с

Во второй серии экспериментов $R = 40$ м. Результаты показаны на рис. 5 и 6. По этим графикам видно, что предложенные в данной работе алгоритмы имеют значительное превосходство по пропускной способности и по среднему времени передачи потока. При $T_{fd} = 0.5$ с все алгоритмы теряют в эффективности, однако наибольшие потери проявляются у алгоритмов семейства PF. PF справедливо дает долю канала станциям с плохими канальными условиями. Он продолжает это делать даже при постоянных ошибках передач, связанных с неактуальностью данных о канале, что ведет к сильному падению производительности.

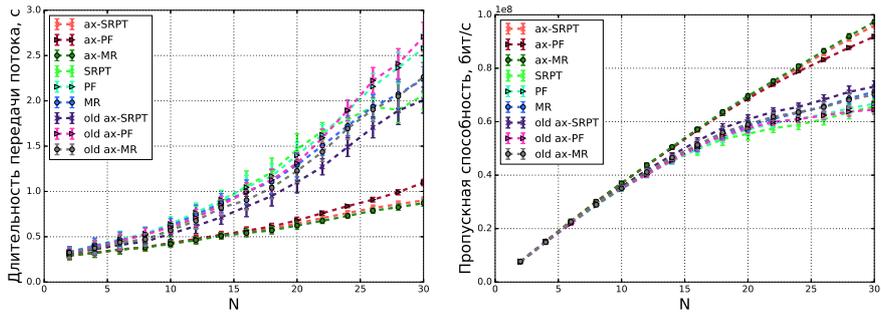


Рис. 5: $R = 40$ м, $T_{fd} = 0$ с

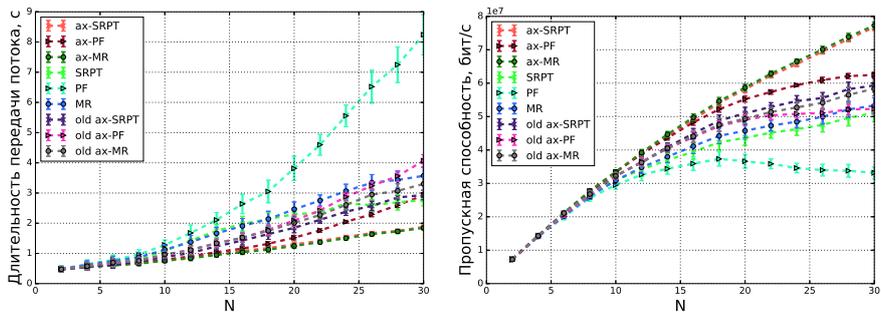


Рис. 6: $R = 40$ м, $T_{fd} = 0.5$ с

Также была проведена проверка эффективности работы алгоритма изменения информации о канальных условиях (см. раздел 5.3). Результаты представлены на рис. 7, 8. При $R = 5$ м заметно небольшое уменьшение времени передачи при использовании адаптации. Если $R = 40$ м, то адаптация дает значительное преимущество. Особенно это заметно для алгоритма PF: нет такого резкого ухудшения, как в случае, когда адаптация отсутствует.

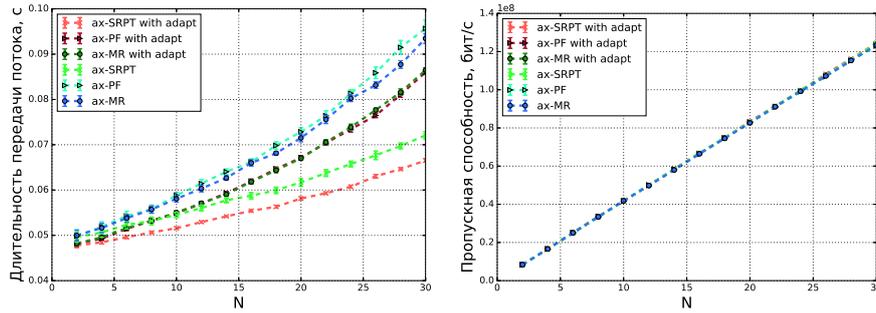


Рис. 7: $R = 5$ м, $T_{fd} = 0.5$ с

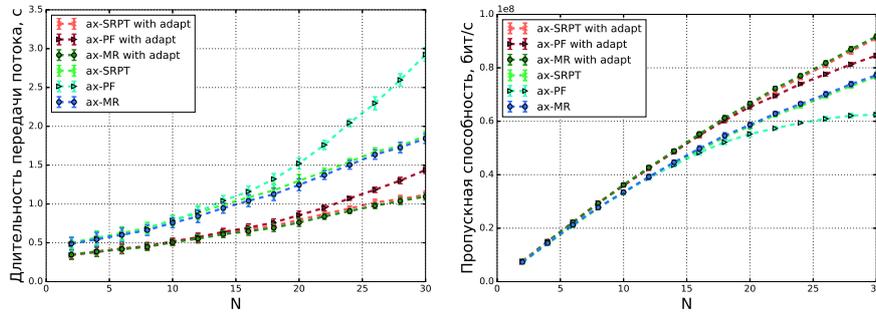


Рис. 8: $R = 40$ м, $T_{fd} = 0.5$ с

7 Заключение

В данной работе были рассмотрены передачи с использованием OFDMA в восходящем канале в условиях частотно-селективных замираний. Предложен жадный подход назначения РБ для трех различных метрик: MR, PF и SRPT. Было показано, что данный подход работает лучше алгоритмов, не

разделяющих по частоте канал, и алгоритмов, не учитывающих частотную-селективность, в терминах пропускной способности и средней длительности передачи потока.

Также в работе был введен механизм адаптивного изменения информации о канальных условиях для случая, когда данная информация обновляется с некоторым периодом. Показано, что такое адаптивное изменение также увеличивает пропускную способность и уменьшает время передачи потоков за счёт того, что точка доступа при планировании канальных ресурсов располагает более актуальными данными о качестве канала для станций.

Список литературы

1. Oteri K, Yang R. Power Control for Multi-User Transmission in 802.11 ax // IEEE, doc. IEEE.
2. OFDMA Uplink Scheduling in IEEE 802.11ax Networks / Dmitry Bankov, Andrey Didenko, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov // Communications (ICC), 2018 International Conference on / IEEE. — 2018.
3. Sharon Oran, Alpert Yaron. Scheduling Strategies and Throughput Optimization for the Uplink for IEEE 802.11 ax and IEEE 802.11 ac Based Networks // Wireless Sensor Network. — 2017. — Vol. 9, no. 08. — P. 250.
4. Resource Allocation in 802.11ax Networks / Mukesh Taneja, Bibek Sahu, Ramachandra Murthy et al. — 2018.
5. Naik Gaurang, Bhattarai Sudeep, Park Jung-Min Jerry. Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA in IEEE 802.11 ax // Communications (ICC), 2018 IEEE International Conference on, IEEE. — 2018.
6. ax High Efficiency WLAN Study Group et al. 11-14-0980-14 TGax simulation scenarios. — 2016.
7. Committee TGac Channel Models Special et al. TGac channel model addendum // IEEE 802.11-09/0308r0. — 2009.